



**Desarrollo de herramientas de evaluación técnica y económica mediante
modelación para la aplicación industrial de la pirólisis de residuos sólidos en
la ciudad de Guatemala**

TESIS DOCTORAL

que para obtener el Grado de Ph.D.

DOCTOR EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

PRESENTA

Luis Ernesto Núñez González

ASESOR

Dr. Marco Antonio Zamora Antuñano

México, 2025

La presente Tesis Doctoral debe ser citada como:

Núñez, Luis (2025). *Desarrollo de herramientas de evaluación técnica y económica mediante modelación para la aplicación industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala*. [Tesis de Doctorado de la Universidad de Investigación e Innovación de México - UIIX]



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Se permite la reproducción total o parcial y la comunicación pública de la obra con reconocimiento de la autoría y mención de la Universidad de Investigación e Innovación de México - UIIX.

No se permite el uso comercial ni la creación de obras derivadas.

Resumen

En esta tesis doctoral se presenta el tema de investigación: “Desarrollo de herramientas de evaluación técnica y económica basadas en métodos de modelación para la aplicación industrial de pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala”, definiendo como objetivo general establecer herramientas técnicas y económicas para evaluar la aplicación industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, empleando metodologías de modelaje de reacción, procesos y evaluación económica, para comparar la diferencia que puede existir en función de la composición del residuo evaluado. Para la metodología, se consideró que el enfoque más adecuado era el mixto, diseño por modelaje y de tipo inductivo-deductivo. Respecto a las poblaciones de interés, se consideró la población de residuos disponibles de Guatemala como el enfoque de simulación, empleando los registros de su disponibilidad y características.

Los resultados indicaron que es posible generar herramientas basadas en modelaje para la evaluación de la técnica de pirólisis con diferentes tipos de residuos sólidos. Habiendo aplicado un modelo multivariable para evaluar la aplicación de la técnica con diferentes residuos, modelos cinéticos específicos para conocer el comportamiento de la reacción y modelos de simulación de procesos para conocer las necesidades de equipo, se consigue evaluar la prefactibilidad técnica, mientras que al emplear simulación de flujos de caja proyectados e indicadores financieros se consigue evaluar la prefactibilidad económica de los proyectos que consideren aplicar la técnica de pirólisis en tratamiento de residuos sólidos. Estos modelos son prometedores para la evaluación en Guatemala al haber usado las condiciones, costos y premisas locales, pero tienen el potencial de impactar en otras localidades al hacer los ajustes necesarios en los modelos desarrollados.

Palabras claves: Residuos sólidos, pirólisis, biocombustibles, modelaje, herramientas técnicas y económicas, Guatemala.

Abstract

This doctoral thesis presents the research topic: "Development of technical and economic evaluation tools based on modeling methods for the industrial application of solid waste pyrolysis in Guatemala City." The general objective is to establish technical and economic tools to evaluate the industrial application of solid waste pyrolysis in Guatemala City, using reaction, process, and economic evaluation modeling methodologies to compare the differences that may exist depending on the composition of the waste being evaluated. For the methodology, the most appropriate approach was considered to be a mixed approach, design by modeling and an inductive-deductive approach. Regarding the populations of interest, the available waste population in Guatemala was considered the simulation approach, using records of their availability and characteristics.

The results showed that it is possible to generate modeling-based tools for evaluating the pyrolysis technique with different types of solid waste. By applying a multivariate model to evaluate the application of the technique to different waste products, specific kinetic models to understand reaction behavior, and process simulation models to determine equipment requirements, the technical prefeasibility can be assessed. Using simulations of projected cash flows and financial indicators, the economic prefeasibility of projects that consider applying the pyrolysis technique to solid waste treatment can be assessed. These models are promising for evaluation in Guatemala, having used local conditions, costs, and assumptions, but they have the potential to impact other locations by making the necessary adjustments to the developed models.

Key words: Solid waste, pyrolysis, biofuels, modeling, technical and economic tools, Guatemala.

Agradecimientos

Quiero comenzar expresando mi más profunda gratitud a Dios, por ser mi guía constante, fuente de fortaleza y luz en cada paso de este largo y desafiante camino. Sin su gracia, nada de esto habría sido posible.

A mis padres, el Dr. Luis Alfredo Núñez Ramírez y la Dra. Ana Patricia González Hidalgo, les agradezco por su amor incondicional, por su ejemplo de dedicación y excelencia, y por enseñarme con su vida el valor del conocimiento, la perseverancia y la humildad. Su apoyo ha sido mi mayor sostén.

A mi hermana, la Dra. Mariana Núñez González, gracias por ser una inspiración constante, por tu consejo sabio, tu compañía y por caminar a mi lado en cada etapa de esta travesía académica y personal.

Al Dr. Marco Antonio Zamora Antuñano, mi asesor, le expreso mi sincero agradecimiento por su guía, exigencia académica, y valiosas observaciones que enriquecieron este trabajo. Su compromiso con la investigación y la formación de nuevos científicos ha sido una inspiración para mí.

Agradezco profundamente a la Universidad del Valle de Guatemala por proporcionarme los equipos, el espacio y las condiciones necesarias para la realización de las pruebas experimentales. Su apoyo fue determinante para el desarrollo práctico de este estudio.

A la Universidad de Investigación e Innovación de México (UIXX), gracias por brindarme la oportunidad de llevar a cabo esta investigación, así como por facilitarme los recursos y el entorno académico necesarios para lograrlo. De manera especial, agradezco a los docentes de la UIXX por su acompañamiento, enseñanza y disposición constante para compartir su conocimiento. Su orientación ha sido fundamental en la formación académica y el desarrollo crítico que dieron forma a este trabajo.

A mis colegas y amigos, el MSc. Ing. Gamaliel Zambrano y la MA. Ing. Carmen Ortiz, gracias por su apoyo constante, por las valiosas conversaciones, colaboración y por su amistad, que ha sido un pilar fundamental durante este proceso.

A mis hijos, la fuente de mi energía y de mi confianza en que el futuro de la humanidad será mejor de lo que hoy tenemos.

A los que no menciono, pero que han contribuido con su paciencia, apoyo, amor e inspiración, mi más sincero agradecimiento.

Con agradecimientos infinitos,

Luis Ernesto Núñez González

Dedicatoria

A los que ya no están en este mundo y me amaron tanto, a los que me inspiran y tienen todo mi corazón, que sostienen mi ímpetu científico y mi deseo de que la ciencia y el conocimiento guíen a la humanidad a un futuro prometedor.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	21
Capítulo 1. Proyección de la investigación.....	24
1.1 Línea de investigación de la Universidad de Innovación e Investigación, México y su ámbito de estudio	24
1.2 Planteamiento del problema.....	25
1.3 Formulación del problema (Pregunta de Investigación).....	27
1.4 Justificación.....	27
1.5 Objeto de estudio.....	30
1.6 Campo de acción.....	30
1.7 Objetivos	30
1.7.1 Objetivo general	30
1.7.2 Objetivos específicos	30
1.8 Hipótesis.....	31
1.9 Alcance temático.....	32
1.10 Delimitación Espacial y Temporal.....	32
Capítulo 2 Fundamentos Teóricos Referenciales	34
2.1 Estado del arte (Marco Histórico y Actual)	34
2.2 Marco Teórico.....	41
2.2.1 Problemática de los residuos sólidos.....	41
2.2.2 Evaluación de Proyectos	48
2.3 Marco Conceptual	50
2.3.1 Reacción de Pirólisis.....	51
2.4 Marco Contextual.....	60

2.4.1	Historia reciente de las normativas o legislaciones relacionadas en Guatemala	60
2.4.2	Contexto de Guatemala	62
2.4.3	Condiciones Económicas	63
2.4.4	Universidad del Valle de Guatemala y sus Centros de Investigación.....	63
2.4.5	Instituto de Investigaciones UVG	64
2.4.6	Centro Investigación en Procesos Industriales (CPI).....	65
2.5	Marco Legal y Normativo.....	65
Capítulo 3. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación		69
3.1	Cuadro Operacionalización de variables.....	69
3.2	Diseño metodológico	76
3.2.1	Definición del enfoque, diseño y tipo de investigación de la tesis	76
3.2.2	Definición de métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos ..	80
3.2.3	Desarrollo de los instrumentos de obtención de datos	84
3.2.4	Determinación de la muestra y su criterio de selección.....	91
3.3	Trabajo de Campo	94
3.3.1	Aplicación de los instrumentos	96
3.3.2	Procesamiento de la información	99
3.4	Análisis de los resultados en los datos obtenidos.....	100
3.4.1	Categorización de Residuos de la ciudad de Guatemala.....	100
3.4.2	Evaluación de Fuentes referenciales de propiedades y composición de residuos sólidos	103
3.4.3	Evaluación de Fuentes referenciales de proporciones de productos de pirólisis y sus propiedades	105

3.4.4	Propiedades Fisicoquímicas referenciales de las clasificaciones de residuos estudiadas.....	106
3.4.5	Porcentajes de productos obtenidos y sus propiedades para las clasificaciones de residuos estudiadas	112
3.4.6	Determinación del Progreso de la reacción de pirólisis	116
3.4.7	Modelo multivariable de predicción de características de los productos en función del tipo de residuo sólido	126
3.4.8	Validación de modelos multivariable empleando la predicción de categorías de residuos sólidos y sus valores de propiedades reportadas.....	131
3.4.9	Estudios de caso de predicción de modelos multivariable empleando la predicción de residuos sólidos estudiados a nivel laboratorio	134
3.4.10	Modelos cinéticos ajustados para la predictibilidad de tiempos de reacción y determinación de potencial escalamiento	140
3.4.11	Dimensionamiento y modelos de simulación de procesos para la predictibilidad del escalamiento de la reacción de pirólisis.....	150
3.4.12	Validación de modelos de simulación de procesos para la predictibilidad del escalamiento de la reacción de pirólisis empleando casos referenciales	155
3.4.13	Modelo de flujo de caja para la determinación de flujos de efectivo e indicadores financieros.....	157
3.4.14	Validación de Modelos de flujo de caja para la determinación de flujos de efectivo e indicadores financieros con datos referenciales de rentabilidad	162
3.5	Redacción de resultados y discusión.....	163
3.5.1	Fundamentos teóricos y avances científicos	163
3.5.2	Diagnóstico de categorías de Residuos de la ciudad de Guatemala.....	165
3.5.3	Propuesta de herramientas técnicas de evaluación de la pirólisis	166
3.5.4	Herramienta de evaluación económica de la aplicación de pirólisis.....	168

Capítulo 4 Propuesta de Transformación	169
4.1 Fundamentación de la Propuesta de transformación.....	169
4.1.1 Contribución comunitaria.....	171
4.1.2 Contribución científica.....	173
4.2 Estructura de la propuesta de transformación	174
4.3 Valoración y validación de la propuesta de transformación	185
CONCLUSIONES.....	190
RECOMENDACIONES	193
BIBLIOGRAFÍA.....	196
ANEXOS.....	213
Anexo 1 Elementos teóricos complementarios	213
Anexo 2 Métodos Experimentales complementarios.....	291
Anexo 3 Datos de Evaluación de Fuentes.....	297
3.1 Evaluación de Fuentes de Propiedades de residuos sólidos.....	297
3.2 Evaluación de Fuentes de proporciones y Propiedades de productos obtenidos con la reacción de pirólisis	301
3.3 Evaluación de Fuentes referenciales de modelos cinéticos de la reacción de pirólisis.....	305
Anexo 4 Datos de Propiedades y parámetros cinéticos	308
4.1 Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas por clasificación de residuos sólidos	308
4.2 Parámetros cinéticos determinados por clasificación de residuos sólidos.	312
Anexo 5 Fotografías y código de los modelos empleados.....	314

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso general de pirólisis de plástico y sus posibles ramificaciones.....	36
Figura 2: Rendimientos de combustibles líquido, sólido y gaseoso para polímeros puros y combinaciones de PS, PP, PE y PET	39
Figura 3: Tasa de generación de residuos sólidos por país (kg/día y persona).....	42
Figura 4: Composición promedio de residuos a nivel mundial	43
Figura 5: Tratamiento y disposición de residuos sólidos a nivel mundial.....	45
Figura 6: Tasa de generación de residuos sólidos por país (kg/día y persona).....	45
Figura 7: Composición promedio de residuos sólidos en Latinoamérica.....	46
Figura 8: Porcentajes de recolección de residuos en Latinoamérica	47
Figura 9: Disposición de residuos en Latinoamérica.....	48
Figura 10: Diagrama general del proceso de pirólisis de biomasa	51
Figura 11: Balance de masa y energía de la pirólisis de tallos de algodón	52
Figura 12: Etapas de reacción de la pirólisis	55
Figura 14: Mapa mental de la tesis doctoral.....	77
Figura 15: Esquema del sistema utilizado para pruebas experimentales.....	87
Figura 16: Esquema de la planta de pirólisis rápida, Brasil (PPR-200)	89
Figura 17: Grafica de pie del promedio de la composición de residuos urbanos de los estudios de caracterización del MARN	102
Figura 18: Grafica del modelo de incremento de temperatura empleado en las simulaciones del progreso de la reacción utilizando el software Berkeley Madonna®	120
Figura 19: Grafica del modelo cinético prediciendo el consumo de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis	121
Figura 20: Grafica del modelo cinético prediciendo la producción de alquitranes de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis.....	122

Figura 21: Grafica del modelo cinético prediciendo la producción de char de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis	124
Figura 22: Grafica del modelo cinético prediciendo la producción de gases de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis.....	125
Figura 23: Grafica del modelo cinético prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de BOPP a escala laboratorio	140
Figura 24: Grafica del modelo cinético corregido prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de BOPP a escala laboratorio.....	143
Figura 25: Grafica del modelo cinético corregido prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de Aguacate a escala laboratorio.....	145
Figura 26: Grafica del modelo cinético corregido prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de HDPE a escala laboratorio	149
Figura 27: Diagrama de Equipo del tratamiento para la pirólisis de residuos “secos”	150
Figura 28: Diagrama de Equipo del tratamiento para la pirólisis de residuos Húmedos.....	151
Figura 29: Pantalla de simulación de proceso generada en el software SuperPro Designer® para el proceso de pirólisis planteado	152
Figura 30: Representación gráfica del tema propuesto, la fundamentación teórica conceptual de la tesis doctoral	175
Figura 31: Representación gráfica de las etapas teórico/prácticas de la propuesta	177
Figura 32: Representación gráfica de las fases, acciones y actividades necesarias en la evaluación de la reacción de pirólisis	182
Figura 33: Modelo de negocio de la venta de Biocombustibles a partir de la aplicación de la técnica de pirólisis en el tratamiento de residuos sólidos	183
Figura 34: Modelo de negocio de la venta de Biocombustibles y servicio de recolección y tratamiento, a partir de la aplicación de la técnica de pirólisis en el tratamiento de residuos sólidos.....	184
Figura 35: Pirámide de tratamiento de residuos sólidos.....	213

Figura 36: Descripción gráfica de las Operaciones Unitarias en un proceso Industrial	228
Figura 37: Simulación de procesos industriales empelando un software comercial	230
Figura 38: Principales elementos que componen un flujo de caja.....	236
Figura 39: Ejemplo ilustrativo de la estructura de un flujo de efectivo de un proyecto.....	237
Figura 40: Espectro Infrarrojo característico del poliácido láctico	245
Figura 41: Estructura química del poliácido láctico	246
Figura 42: Análisis termogravimétrico característico del Polietileno de Alta Densidad (HDPE)	247
Figura 43: Curva de Estrés y deformación característica del comportamiento de materiales sólidos.....	249
Figura 44: Curva de distribución de tamaño de partícula y su análisis porcentual respectivo..	253
Figura 45: Línea de tiempo de la historia de Guatemala	269
Figura 46: Tendencia de las Remesas en Guatemala.....	278
Figura 47: Tendencias Económicas de manufactura y remesas en Latinoamérica.....	281
Figura 48: Tendencias de inversión en Investigación y Desarrollo en Latinoamérica.....	282
Figura 49. Tendencias de inversión en Investigación y Desarrollo en Latinoamérica	283
Figura 50: Infografía de la pirámide legal de temas ambientales de Guatemala.....	287
Figura 51: Trituradora de residuos orgánicos utilizada para la molienda de la materia prima .	314
Figura 52: Molino de discos utilizado para la molienda de la materia prima.....	315
Figura 53: Cáscara de aguacate luego del proceso de molienda	315
Figura 54: Sistema de pirólisis del reactor de 100 g.....	316
Figura 55: Reactor de pirólisis de 100 g.....	316
Figura 56: Medición de la masa de la materia prima para el reactor de pirólisis de 100g ..	317
Figura 57: Producto sólido del proceso de pirólisis.....	317
Figura 58: Producto líquido del proceso de pirólisis de HDPE a escala laboratorio.....	318

Figura 59: Sistema de crisoles utilizados para el análisis proximal de materiales	318
Figura 60: Sistema de digestión de Kjeldahl para el análisis del producto sólido	319
Figura 61: Sistema de destilación de Kjeldahl para el análisis del producto sólido.....	319
Figura 62: Pantalla Típica utilizada en SuperPro Designer® para ingresar los datos de proceso empleados en las simulaciones.....	326
Figura 63: Pantalla Típica utilizada en SuperPro Designer® para ingresar los parámetros de reactivos y productos empleados en las simulaciones.....	326

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro 1: Composición elemental de los residuos analizados por análisis proximal y de composición.....	37
Cuadro 2: Poderes caloríficos (HHV) del aceite de pirólisis de diversos polímeros puros o combinados, utilizando catalizadores TA-NZ y AA-NZ.....	40
Cuadro 3: Rendimientos de los productos de pirólisis dependiendo del tipo de proceso.....	54
Cuadro 4: Operacionalización de variables del proyecto	69
Cuadro 5: Matriz de congruencia científica metodológica	72
Cuadro 6: Fundamentación de las Técnicas e Instrumentos seleccionados.....	81
Cuadro 7: Registro de evaluación de Fuentes Bibliográficas.....	84
Cuadro 8: Ficha de extracción de datos bibliográficos.....	85
Cuadro 9: Composición elemental de los residuos analizados por análisis proximal y de composición.....	85
Cuadro 10: Propiedades fisicoquímicas del Capín de Elefante y la paja de caña de azúcar .	90
Cuadro 11: Definición de la población.....	91
Cuadro 12: Definición de las muestras.....	93
Cuadro 13: Cronograma General de Actividades.....	94
Cuadro 14: Prueba piloto de la aplicación del instrumento de evaluación de fuentes referenciales, que muestra la media obtenida de los resultados de los pares consultados.....	98
Cuadro 15: Categorización de residuos en Guatemala de acuerdo con la Guía para elaborar estudios de caracterización de residuos sólidos comunes	100
Cuadro 16: Promedio de la composición de residuos urbanos de los estudios de caracterización reportados al MARN	101
Cuadro 17: Potencial técnico de tratamiento del tipo de residuos estudiado con la técnica de pirólisis	103
Cuadro 18: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos alimenticios y jardinería .	104

Cuadro 19: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos alimenticios y de jardinería.....	105
Cuadro 20: Composición elemental y proximal resumida de los residuos Alimenticios, de jardín y hueso.....	106
Cuadro 21: Composición elemental y proximal resumida de los residuos de papel y cartón...	107
Cuadro 22: Composición elemental resumida de los residuos de plástico.....	108
Cuadro 23: Composición elemental resumida de los residuos de vidrio y metal.....	109
Cuadro 24: Composición elemental y proximal resumida de los residuos sanitarios	109
Cuadro 25: Composición elemental y proximal resumida de los residuos varios estudiados ..	110
Cuadro 26: Composición elemental y proximal resumida de los residuos peligrosos estudiados	110
Cuadro 27: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos Alimenticios, de jardín y hueso.....	111
Cuadro 28: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos alimenticios y de jardín y sus respectivos poderes caloríficos máximos.....	112
Cuadro 29: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos de papel y cartón y sus respectivos poderes caloríficos máximos	113
Cuadro 30: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos de plástico y sus respectivos poderes caloríficos máximos	114
Cuadro 31: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos sanitario y peligrosos y sus respectivos poderes caloríficos máximos.....	114
Cuadro 32: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos varios y sus respectivos poderes caloríficos máximos.	115
Cuadro 33: Parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis de residuos alimenticios, de jardín, papel y cartón	119

Cuadro 34: Parámetros “a” al “i” de los modelos multivariables para la predicción de propiedades de los biocombustibles obtenidos con la reacción de pirólisis en función de la composición del residuo	130
Cuadro 35: Coeficientes de regresión de los modelos multivariable predictivos para las propiedades de los biocombustibles obtenidos con la reacción de pirólisis en función de la composición del residuo	131
Cuadro 36: Predicción de Rendimientos y poderes caloríficos de biocombustibles de la reacción de pirólisis con diferentes tipos de residuos típicos	132
Cuadro 37: Porcentajes de error de las predicciones de rendimientos y poderes caloríficos de los biocombustibles de la reacción de pirólisis con diferentes tipos de residuos típicos	133
Cuadro 38: Porcentajes máxicos de composición analizados experimentalmente para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala	136
Cuadro 39: Rendimientos y poderes caloríficos analizados experimentalmente para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala	137
Cuadro 40: Predicción de los rendimientos y poderes caloríficos para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala empleando los modelos multivariable desarrollados	138
Cuadro 41: Errores porcentuales de la predicción de los rendimientos y poderes caloríficos para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala empleando los modelos multivariable desarrollados	139
Cuadro 42: Valores experimentales de las constantes ajustadas para predecir la rampa de temperatura de incremento de 5°C cada 30min en la pirólisis de residuos de HDPE	147
Cuadro 43: Parámetros base del diseño del proceso utilizados en las simulaciones con SuperPro Designer®	153
Cuadro 44: Características de los residuos de HDPE utilizados en la entrada del proceso durante las simulaciones con SuperPro Designer®	153

Cuadro 45: Características de los productos obtenidos de la reacción de pirólisis de residuos de HDPE utilizados en la salida del proceso durante las simulaciones con SuperPro Designer®.....	154
Cuadro 46: Características clave de los equipos del proceso de pirólisis de residuos de HDPE obtenidos con las simulaciones con SuperPro Designer® y flujo de ingreso de 6t/d de residuos.....	154
Cuadro 47: Comparativo de valores referenciales y simulados de las características clave de los equipos del proceso de pirólisis de residuos plásticos a diferentes flujos de entrada	155
Cuadro 48: Error porcentual de los valores simulados en comparación de los referenciales de las características clave de los equipos del proceso de pirólisis de residuos plásticos a diferentes flujos de entrada.....	156
Cuadro 49: Parámetros empleados en la simulación de flujos de efectivo con los escenarios especificados para la reacción de pirólisis de residuos sólidos	158
Cuadro 50: Simulación de flujos de efectivo con los escenarios especificados para la reacción de pirólisis de residuos sólidos tomando como base la escala de 6t/d	160
Cuadro 51: Indicadores financieros obtenidos para la pirólisis de residuos sólidos a partir del flujo de efectivo a 10 años después de la inversión.....	161
Cuadro 52: Comparativo de casos referenciales y escenarios para el tratamiento de residuos sólidos con la técnica de pirólisis	162
Cuadro 53: Principales Tratados Internacionales firmados por Guatemala y relacionados al tema Ambiental.....	285
Cuadro 54: Principales Leyes y Regulaciones locales relacionados al tema Ambiental.....	288
Cuadro 55: Estándares internacionales para evaluar propiedades de los productos de Pirólisis	290
Cuadro 56: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos de Papel y Cartón	297
Cuadro 57: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos Plásticos.....	297
Cuadro 58: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos de Vidrio y Metal	298
Cuadro 59: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos Sanitarios	299

Cuadro 60: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos Peligrosos	300
Cuadro 61: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos varios	300
Cuadro 62: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos de papel y cartón.....	301
Cuadro 63: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos plásticos	302
Cuadro 64: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos Sanitarios y peligrosos.....	303
Cuadro 65: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos Varios	304
Cuadro 66: Evaluación de fuentes referenciales de modelos cinéticos de pirólisis de residuos alimenticios, de jardinería, papel y cartón	305
Cuadro 67: Evaluación de fuentes referenciales de modelos cinéticos de pirólisis de residuos plásticos	305
Cuadro 68: Evaluación de fuentes referenciales de modelos cinéticos de pirólisis de residuos varios	306
Cuadro 69: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos de papel y cartón	308
Cuadro 70: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos de plástico	309
Cuadro 71: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos de vidrio y metal	309
Cuadro 72: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos sanitarios	310
Cuadro 73: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos varios estudiados	311
Cuadro 74: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos peligrosos estudiados	311
Cuadro 75: Parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis de residuos plásticos	312
Cuadro 76: Parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis de residuos varios	313

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Velocidad de reacción teórica para el proceso de pirólisis	60
Ecuación 2: Cambio de masa dentro del reactor de pirólisis	117
Ecuación 3: Definición de constante cinética de reacción simplificada con la ecuación de Arrhenius	118
Ecuación 4: Cambio de masa en función de la masa en el reactor y temperatura de reacción .	118
Ecuación 5: Generación del producto i en función de la masa en el reactor y temperatura de reacción.....	118
Ecuación 6: Modelo lineal de porcentaje de rendimiento de biocombustible líquido obtenido en la reacción de pirólisis en función de la composición de carbono e hidrógeno.....	126
Ecuación 7: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible sólido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición.....	127
Ecuación 8: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible líquido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición.....	127
Ecuación 9: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible gaseoso obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición.....	127
Ecuación 10: Modelo multivariable de poder calorífico del biocombustible gaseoso obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición.....	128
Ecuación 11: Modelo multivariable de poder calorífico del biocombustible líquido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición.....	128
Ecuación 12: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible sólido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición y parámetros	129
Ecuación 13: Consumo corregido de reactivo en función de la masa en el reactor y temperatura de reacción.....	142
Ecuación 14: Generación corregida del producto i en función de la masa y temperatura de reacción.....	142

Ecuación 15: Modelo de simulación de la rampa de temperatura empleada para los residuos de aguacate	144
Ecuación 16: Modelo de simulación de la rampa de temperatura empleada para los residuos de HDPE	147
Ecuación 17: Retorno de la Inversión.....	239
Ecuación 18: Valor actual Neto.....	239
Ecuación 19: Tasa Interna de Retorno.....	240
Ecuación 20: Margen Operativo.....	240
Ecuación 21: Valor Económico Agregado	241
Ecuación 22: Calor conducido a través de un material.....	251
Ecuación 23: Reacción de Combustión	260

INTRODUCCIÓN

Conesa, J. (1996) resume en su trabajo como numerosos estudios se han realizado para producir selectivamente altos rendimientos de productos valiosos en la pirólisis de plásticos y de biomoléculas, que incluyen experimentaciones y planteamiento de modelos. Debido a la complejidad de la reacción y de los polímeros que con este proceso se degradan, no se han podido determinar parámetros repetitivos en un mismo material, por lo tanto, los estudios técnicos son esenciales para propiciar la evaluación de escalabilidad de la reacción de cada material bajo condiciones específicas, dentro las que la localización juega un papel fundamental, no solamente por la composición del residuo, sino además, por las condiciones ambientales que influyen en la reacción.

De manera que, en el presente trabajo se pretende estudiar como la composición de las diferentes categorías de residuos de la ciudad de Guatemala, influyen en los combustibles obtenidos con la reacción de pirólisis y como esto afecta la rentabilidad del proceso, determinando las implicaciones técnicas y económicas que puede esto tener en una empresa que se dedicara a dicho tipo de reacciones en la ubicación especificada.

Para esto, se plantean en la presente investigación una serie de herramientas de evaluación basadas en modelaje que permiten la evaluación de prefactibilidad técnica y económica de cualquier proyecto que desee evaluar la aplicación de la reacción de pirólisis para el tratamiento de residuos sólidos. Los diferentes tipos de residuos que se tienen en la ciudad de Guatemala han sido abarcados y los parámetros de los modelos generados se han ajustado a ellos y a datos reportados en la literatura, para permitir la predicción de lo que se obtiene al procesar el residuo con base en su composición y propiedades.

Estos modelos pretenden el poder aplicarse específicamente en el contexto de la ciudad de Guatemala, donde se han generado y parametrizado. Sin embargo, pueden emplearse en otras ubicaciones, siempre que se hagan las modificaciones necesarias y los estudios experimentales, que permitieron la generación de los modelos empíricos, sobre todo aquellos ligados al seguimiento de la reacción de pirólisis.

La línea de investigación empleada para la realización del estudio es de diseño de proyectos bajo gestión estratégica, por lo que las herramientas desarrolladas se alinean con el manejo de proyectos y el entendimiento que un estudio de prefactibilidad conlleva. En tal sentido, se considera pertinente que la investigación sea dividida por capítulos, previendo de esta forma que el lector pueda comprender cada uno de los componentes, los cuales a continuación se detallan:

Capítulo 1: Proyección de la investigación. Este capítulo presenta el punto de partida del estudio, abordando la temática central y el problema que lo origina. Se expone con claridad la línea de investigación vinculada a la Universidad, así como el planteamiento y la formulación del problema. También se desarrollan elementos clave como la justificación del estudio, la definición del objeto de estudio, el campo de acción, los objetivos generales y específicos, la hipótesis, el alcance temático y las delimitaciones. Este apartado constituye la base estructural sobre la cual se construyen los capítulos posteriores, ya que proporciona una visión clara de lo que se pretende lograr con la investigación.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos Referenciales. En esta sección se realiza una revisión exhaustiva de la literatura actual relacionada con el tema de estudio, con el propósito de ofrecer un soporte teórico riguroso que respalde el desarrollo de la investigación. El capítulo incluye los marcos histórico y actual, teórico, conceptual, contextual, así como el marco legal y normativo. La adecuada elaboración de este capítulo es esencial, ya que proporciona los fundamentos necesarios para interpretar los hallazgos del estudio y contribuye a convertir una idea general en un problema de investigación científicamente estructurado.

Capítulo 3: Fundamentos metodológicos y resultados de investigación. Este capítulo detalla los fundamentos metodológicos que guiaron el desarrollo del estudio. Se definen conceptos claves como la operacionalización de variables, el enfoque adoptado, el tipo y diseño de investigación, las técnicas y herramientas empleadas, así como la selección de la muestra y los procedimientos de recolección y procesamiento de datos. Tras la elaboración de los instrumentos, estos se aplican a las unidades de análisis previamente

definidas, permitiendo la obtención y posterior análisis de la información. El capítulo presenta también de forma ordenada los datos obtenidos a través de la aplicación de los instrumentos de recolección definidos en la metodología. Se exponen los hallazgos, utilizando tablas, gráficos y análisis estadísticos según corresponda. Los resultados se estructuran en función de los objetivos y variables del estudio, permitiendo visualizar patrones, diferencias o correlaciones entre los datos.

Capítulo 4: Propuesta de transformación. En este capítulo se presenta la propuesta de transformación con base en los resultados presentados previamente, estableciendo su relación con los objetivos planteados, la hipótesis del estudio y los referentes teóricos revisados. Se busca dar a conocer cómo se impacta en el campo de estudio con la investigación realizada. Además, permite reflexionar sobre las implicaciones prácticas, teóricas y metodológicas del estudio, así como sobre sus limitaciones. Es un espacio clave para argumentar la validez de las conclusiones y valorar la contribución del estudio dentro de su campo.

Conclusiones. En esta parte del documento, se sintetizan las conclusiones del estudio, dando respuesta directa a los objetivos planteados al inicio. Estas se sustentan en los resultados obtenidos a través de los instrumentos aplicados y muestran las relaciones entre las variables estudiadas y la posibilidad de aplicación de las herramientas desarrolladas.

Recomendaciones. Al final del documento, se formulan recomendaciones prácticas que pueden servir como guía para futuras investigaciones o para el desarrollo de acciones concretas relacionadas con la temática abordada y el campo de estudio.

Capítulo 1. Proyección de la investigación

En este capítulo será detallada el planteamiento de la investigación realizada, especificando el planteamiento del problema y su formulación, en donde se especifica la situación actual que genera la necesidad del proyecto; también se detalla la justificación del estudio, los objetivos de la investigación, las hipótesis, el alcance y la delimitación del problema, que son propios de un planeamiento enfocado en la resolución del problema detectado en el contexto de la ciudad de Guatemala.

1.1 Línea de investigación de la Universidad de Innovación e Investigación, México y su ámbito de estudio

Debido a la carencia de información y su amplia aplicación en la industria, en esta tesis doctoral se presenta el tema titulado: “Desarrollo de herramientas de evaluación técnica y económica basadas en métodos de modelación para la aplicación industrial de pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala”.

Actualmente, la pirólisis es un método de valorización de plásticos que ha cobrado mayor interés en la industria por los productos generados que presentan altos poderes caloríficos y compuestos hidrocarbonados de alto valor comercial, así como aquellos residuos que se encuentran contaminados o simplemente por la combinación con la que se fabricaron son muy complejos de reciclar (Sharuddin et al., 2016). Consiste en una reacción de degradación térmica en ausencia de oxígeno, donde las elevadas temperaturas rompen las moléculas del material, produciendo compuestos en fase líquida, sólida y gaseosa. Este proceso permite obtener productos químicos de interés, mayoritariamente hidrocarburos, que luego pueden ser utilizados en otras aplicaciones.

En Guatemala, el autor y el centro de investigación donde labora, se ha interesado por el tratamiento de residuos, siendo la pirólisis una de las posibles técnicas a utilizar. Sin embargo, hasta el momento la información que se tiene al respecto en Guatemala es limitada y no se ha analizado técnica y económicamente la posibilidad de aplicar esta técnica cuando el material tiene una composición variada. En definitiva, dicha

composición afectará los combustibles obtenidos al final del proceso, pero en esta investigación se pretende comprender cómo serán afectados, para predecir la influencia sobre la parte económica del proceso.

Dentro de la línea de investigación de UIIX nombrada “Desarrollo sostenible y energías renovables”, existe un ámbito de estudio descrito como: “Desarrollo de investigaciones en energía solar, combustibles sostenibles, almacenamiento de energía, eficiencia energética, valoración de CO₂ y en huella hídrica”. Debido a que este proyecto trata el tema de pirólisis, que es una de las técnicas de manejo de residuos contaminantes para la producción de combustibles, e investiga la forma como este proceso puede ser sostenible, el mismo se ajusta a la línea descrita dentro del ámbito especificado.

1.2 Planteamiento del problema

Según el informe del Banco Mundial titulado What a Waste 2.0 (Los desechos 2.0), en el mundo se generan anualmente 2010 millones de toneladas de desechos sólidos municipales, y al menos el 33 % de ellos no se gestionan, lo que evidencia el riesgo ambiental que representa. En el informe de 2018, se proyecta que la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico harán que la cantidad de desechos a nivel mundial aumente 70 % en los próximos 30 años y llegue a un volumen de 3400 millones de toneladas de desechos generados anualmente (Kaza et al., 2018).

Dentro de la contaminación en la región latinoamericana, los residuos sólidos tienen un alarmante panorama. El 45% de la basura que se genera tiene un destino inadecuado y acaba mayoritariamente en vertederos a cielo abierto, más conocidos en la región como basurales o botaderos. La cifra la ofrece el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y se refiere solo a los flujos de residuos que recolectan los camiones de los ayuntamientos, pero no a la otra mucha basura sin cuantificar que se quema o se arroja a los ríos, al mar o se dispone sin ninguna técnica o control (Gestores de Residuos, 2018).

Analizando la composición típica de los residuos sólidos en Latinoamérica, se tiene que alrededor del 52% son materiales orgánicos, 13% son papeles o cartones, 12% son

plásticos y el resto se reparte en otras categorías. Sin embargo, el proceso de reciclaje se encuentra por debajo del 4.5% de estos residuos (Kaza et al., 2018). Esta baja tasa de reciclaje es ocasionada principalmente porque muchos de estos sólidos son materiales compuestos o que se encuentran en contacto con material orgánico. Las combinaciones de tipos de materiales impiden el proceso sostenible de reciclaje e induce a la población al descarte indiscriminado.

En Guatemala, las estadísticas se encuentran muy dispersas y no existen datos certeros sobre la composición de los residuos sólidos. Sin embargo, algunos autores infieren una tendencia parecida a la reportada para Latinoamérica.

Dentro de las posibles soluciones para el tratamiento de los residuos combinados o contaminados, la pirólisis se ha generalizado como un método de valorización. Ha cobrado mayor interés en la industria por los productos generados, que presentan altos poderes caloríficos y compuestos hidrocarbonados de alto valor comercial (Sharuddin et al., 2016). Esta técnica, consiste en una reacción de degradación térmica en ausencia de oxígeno, donde las elevadas temperaturas rompen las moléculas del material, produciendo compuestos en fase líquida, sólida y gaseosa.

Conesa, J. (1996) resume en su trabajo como numerosos estudios se han realizado para producir selectivamente altos rendimientos de productos valiosos en la pirólisis de plásticos y de biomoléculas, que incluyen experimentaciones y planteamiento de modelos. Debido a la complejidad de la reacción y de los polímeros que con este proceso se degradan, no se han podido determinar parámetros repetitivos en un mismo material, por lo tanto, los estudios técnicos son esenciales para propiciar la evaluación de escalabilidad de la reacción de cada material bajo condiciones específicas, dentro las que la localización juega un papel fundamental, no solamente por la composición del residuo, sino además, por las condiciones ambientales que influyen en la reacción.

Hasta el momento no se cuenta con estudios en Guatemala que evidencien de forma clara, las características técnicas que debe tener un material residual para poder ser procesado con la técnica de pirólisis, así como tampoco evidencia de los posibles

beneficios ambientales o económicos que pueden tenerse al procesar materiales con diferentes composiciones.

1.3 Formulación del problema (Pregunta de Investigación)

Con base en la situación de tratamiento de residuos con pirólisis en Guatemala, es fundamental el poder conocer en primera instancia: ¿Cómo contribuir al análisis de la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos?

Para resolver esta interrogante, es necesario conocer las propiedades básicas de los diferentes materiales que podrían ser procesados, la dependencia de los productos obtenidos en función del material procesado, la etapas y equipos necesarios para el procesamiento en función del material utilizado, y finalmente el análisis de rentabilidad del proceso en función del tipo de material tratado.

1.4 Justificación

Ante la imposibilidad técnica de contar con la información necesaria para plantear modelos de negocio sostenibles para el tratamiento de residuos sólidos en Guatemala, la posibilidad de que la técnica de pirólisis represente una forma viable de tratamiento, la metodología estudiada y establecida con diferentes posibilidades para esta reacción, y la gama de interrogantes que el tema conlleva, la presente tesis doctoral plantea un análisis técnico y económico que pueda resolver las interrogantes iniciales que surgen en el campo de estudio, con un enfoque en la aplicación industrial de la técnica de pirólisis de residuos sólidos en función de su composición. Combinando el interés de la Universidad de Investigación e Innovación de México, el interés del Centro de Investigación de Procesos Industriales de Guatemala, y la experiencia previa del autor en el campo de las reacciones macromoleculares, el estudio presentado se plantea como un primer paso, que abra la posibilidad a estudios de factibilidad de plantas de producción de esta línea y con esta técnica, teniendo el potencial de poder ser replicado en otras localizaciones y contextos, una vez que se estudie el desarrollo de la reacción en dichas condiciones.

Los aportes potenciales de este estudio podrían también influenciar en tomadores de decisión para la regulación de tratamientos a nivel local o regional, y para incentivar la implementación de plantas de tratamiento que generen soluciones sostenibles. Los impactos sociales y ambientales tienen el potencial de ser muy positivos, ante la reducción de acumulación de residuos, la valorización de los mismos, la generación de empleos y la mejora del nivel de vida de las comunidades donde los tratamientos se implementen.

Justificación teórica

La pirólisis es una tecnología emergente que ha sido estudiada extensamente a nivel internacional como método de valorización energética de residuos sólidos con alto contenido de carbono. Teóricamente, esta técnica permite transformar materiales orgánicos en productos útiles como biochar, gases combustibles y líquidos pirolíticos, contribuyendo así al desarrollo de modelos sostenibles de gestión de residuos. Sin embargo, la literatura muestra que los rendimientos y características de los productos dependen en gran medida de la composición química de los residuos y de las condiciones de operación. Por ello, la necesidad de comprender cómo varía el comportamiento térmico y la productividad energética en función de la heterogeneidad de residuos es fundamental. Esta investigación responde a ese vacío, aportando evidencia teórica para modelar y predecir el desempeño técnico de la pirólisis en contextos reales y mixtos de residuos, como los observados en zonas urbanas de Guatemala.

Justificación metodológica

La propuesta de solución presentada en esta tesis doctoral aporta desde el plano metodológico, al integrar de forma innovadora herramientas de modelado y simulación que permiten evaluar, con base técnica y económica, la viabilidad del tratamiento de residuos sólidos mediante pirólisis. La combinación de modelos cinéticos, predicción multivariable y simulación de procesos industriales, con indicadores financieros y de flujo de caja, constituye una metodología replicable y adaptable para el diseño y análisis

de tecnologías de valorización térmica en diferentes contextos y para residuos sólidos de diferente composición.

Justificación práctica

En el contexto guatemalteco, donde la generación de residuos sólidos ha crecido aceleradamente y los sistemas de tratamiento son insuficientes, el estudio ofrece una alternativa tecnológica viable para transformar residuos en energía. La propuesta de analizar distintos tipos de residuos —orgánicos, plásticos y agroindustriales— permite definir rutas diferenciadas de tratamiento y generar datos útiles para decisiones de diseño e inversión en proyectos de valorización térmica. Además, el estudio aporta herramientas concretas que pueden ser utilizadas por tomadores de decisiones, municipios o emprendedores interesados en desarrollar soluciones de economía circular. Esta investigación también establece una base práctica para el escalamiento de tecnologías apropiadas, orientadas a la autosuficiencia energética y a la mejora de las condiciones ambientales de comunidades rurales y urbanas del país.

Justificación personal

El interés personal del autor por el tratamiento de residuos en Guatemala surge de la preocupación por el crecimiento de los pasivos ambientales y la falta de soluciones integrales y sostenibles en el país. Desde el centro de investigación donde labora, se ha explorado la viabilidad de diversas tecnologías, y la pirólisis ha emergido como una alternativa prometedora, pero poco estudiada localmente. Uno de los principales vacíos identificados ha sido la falta de estudios técnicos y económicos que consideren la variabilidad de los residuos en su composición y su influencia en los productos energéticos obtenidos. Esta investigación representa una respuesta a esa necesidad, con el objetivo de construir una herramienta científica y económica que permita predecir cómo esta composición afecta la rentabilidad del proceso. De este modo, se fortalece la capacidad nacional para abordar el problema de los residuos desde una perspectiva técnica rigurosa, sostenible y con impacto real.

1.5 Objeto de estudio

El objeto del estudio es el análisis técnico y económico del proceso de pirólisis aplicado a residuos sólidos de composición variada generados en la ciudad de Guatemala. En particular, se busca construir herramientas de modelaje predictivo que permitan evaluar el comportamiento térmico de diferentes tipos de residuos, sus productos derivados (biochar, gases y líquidos) y la rentabilidad del proceso bajo distintas condiciones operativas y composicionales.

1.6 Campo de acción

El campo de estudio se enmarca en las características fisicoquímicas y económicas que determinan la viabilidad técnica e industrial de aplicar la pirolisis a distintos tipos de residuos sólidos generados en la ciudad de Guatemala. Este campo combina el conocimiento técnico-científico con el análisis económico y social para proponer soluciones viables al tratamiento de residuos sólidos urbanos y agroindustriales, especialmente en contextos con recursos limitados como la ciudad de Guatemala.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Proponer herramientas técnicas y económicas utilizando técnicas de modelaje, que permitan analizar la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos.

1.7.2 Objetivos específicos

1. Determinar los fundamentos teóricos, avances científicos y enfoques metodológicos existentes sobre la pirólisis de residuos sólidos, con el fin de establecer un marco conceptual sólido que sustente el desarrollo de herramientas de evaluación técnica y económica aplicables al contexto guatemalteco.

2. Realizar un diagnóstico sobre las categorías de residuos sólidos que se generan en la ciudad de Guatemala, sus propiedades y su composición, para generar una base de datos que permita elaborar herramientas basadas en modelaje.
3. Proponer una herramienta de predicción de rendimientos y propiedades de los productos de la reacción de pirólisis en función del tipo de residuo sólido procesado, una herramienta de predicción del tiempo de reacción y una de simulación del escalamiento a planta industrial, para determinar la viabilidad técnica de aplicar esta tecnología.
4. Proponer una herramienta de evaluación económica de la reacción de pirólisis de diferentes tipos de residuos sólidos, que utilice indicadores financieros para establecer la viabilidad económica en diferentes escenarios.
5. Evaluar las herramientas generadas utilizando la comparación de su exactitud con coeficientes de correlación y porcentajes de error respecto de datos experimentales, equipos disponibles comercialmente y casos de negocios reportados, para valorar su aplicación en la evaluación de la viabilidad de la técnica.

1.8 Hipótesis

Hipótesis Alternativa

Sin herramientas técnicas y económicas basadas en modelos de reacción y evaluación de procesos, se puede analizar la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos y el escalamiento del proceso.

Hipótesis Nula

Si se propone herramientas técnicas y económicas basadas en modelos de reacción y evaluación de procesos, entonces se podrá analizar la viabilidad industrial de la pirólisis

de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos y el escalamiento del proceso.

1.9 Alcance temático

Considerando la posibilidad de que la pirólisis represente una línea de tratamiento para residuos contaminados o combinados, en esta tesis doctoral se analiza la composición de las diferentes categorías de residuos de Guatemala y se catalogan los mismos en función de su elegibilidad para poder ser degradados térmicamente. Determinada la posibilidad del tratamiento, se presentan comparaciones de pirólisis de materiales típicos de las categorías establecidas con potencial para degradarse y se cuantifican los productos obtenidos. Con esto se simula el proceso necesario y su rentabilidad, proponiendo herramientas que permitan determinar las implicaciones técnicas y económicas que puede esto tener en una empresa que se dedicara a dicho tipo de reacciones en la ciudad de Guatemala.

1.10 Delimitación Espacial y Temporal

El estudio se enfoca en el análisis técnico y económicos de la reacción de pirólisis de residuos de la ciudad de Guatemala, empleando como base principal la información proveída por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) sobre los residuos que se descartan en el “vertedero de la ciudad de Guatemala”, ubicado en la 30 calle 10-96 zona 3 entre las coordenadas 14 o 37’27” Norte y 90 o 31’58” Oeste, y en los años 2022 a 2024. El procesamiento de la información en la tesis doctoral se realizó de Abril 2023 a Abril 2025.

Los materiales por analizar únicamente se tratan de residuos sólidos, por lo que no se emplean materiales vírgenes, precursores o con posibilidades de uso en procesos industriales, por lo que, a la vez, quedan excluidos de este proyecto y análisis, materiales que potencialmente por delimitaciones bioéticas o regulatorias, podrían considerarse como beneficiosos para la alimentación o tratamiento terapéutico. Los materiales utilizados para la investigación o cuantificación experimental, fueron recolectadas

personalmente por el autor o proveídas por alianzas estratégicas del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala (CPI), como la que tiene con la Gremial de Plásticos de la Cámara de Industria. El Centro de Procesos Industriales también proporcionó las instalaciones para las pruebas experimentales necesarias reportadas, dicho centro está ubicado en la 18 Avenida 11-95 Zona 15, Vista Hermosa III de la ciudad de Guatemala.

Además, contemplando que el análisis se centra en la pregunta a resolver y en la reacción de pirólisis, tampoco se hará referencias o deducciones de otras técnicas o métodos, aún y cuando sean técnicas térmicas degradativas, puesto que esto representa la influencia de factores diferentes y posibles productos variados a lo que se busca estudiar.

Capítulo 2 Fundamentos Teóricos Referenciales

Este capítulo desarrolla los fundamentos teóricos que respaldan la investigación, incluyendo una revisión de antecedentes relevantes, teorías asociadas al tema, y la construcción del marco conceptual e histórico. Asimismo, se incorpora el análisis del marco legal pertinente, sustentado en aportes de diversos autores, con el propósito de proporcionar un contexto sólido que facilite la comprensión integral del estudio.

2.1 Estado del arte (Marco Histórico y Actual)

La generación de residuos sólidos, su manejo y tratamiento son de los principales problemas con que la humanidad debe tratar en la actualidad. De acuerdo con Kaza et al. (2018), en el mundo se generan más de 2010 millones de toneladas de residuos sólidos con más del 33% sin tratamiento y gestión que depende del desarrollo socioeconómico de la región. El Banco Mundial (2019) y Kaza et al. (2018) han reportado que Latinoamérica es una región con baja tasa de generación de residuos sólidos, pero que contribuye con más de 231 millones de toneladas anuales, de las cuales solamente el 30% son gestionados en zonas rurales (70% con descarte indiscriminado) y más del 50% son gestionados en vertederos o basureros. Esto ocasiona que se tenga problemas sanitarios y de cuidado ambiental, derivado de acumulaciones de residuos, lixiviados generados y emisiones gaseosas, que terminan por causar diferentes tipos de enfermedades, producir olores o generar circunstancias que disminuyen la calidad de vida humana (Alexandra, 2012).

Kaza et al. (2018) y el Banco Mundial (2019) han publicado que en Latinoamérica los principales tipos de residuos sólidos son: residuos alimenticios, cartones y papeles, y plásticos. Dentro de ellos, los plásticos suelen ser fuertemente criticados, llegan a una producción anual de más de 300 millones de toneladas a nivel mundial (Núñez et al., 2019; Miandad et al., 2016; y Ratnasari et al., 2017), sin embargo, están hechos de hidrocarburos petroquímicos con aditivos como retardantes de llama, estabilizadores y oxidantes que dificultan su biodegradación (Gandidi et al., 2017). Por otro lado, los residuos alimenticios y celulósicos suelen ser menos criticados, pero generan

considerables problemas de contaminación, asociados a la proliferación de plagas y emisiones gaseosas (Alexandra, 2012).

De manera que en medio de las posibilidades de tratamiento que puedan idearse, surge la pirólisis como una opción para convertir residuos sólidos en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Rehan et al. (2017) definen la técnica como “La pirólisis es una degradación térmica de residuos a diferentes temperaturas (300–900°C) y velocidades de calentamiento, que se tratan en reactores especializados en ausencia de oxígeno para generar valor con diferentes tipos de residuos sólidos”.

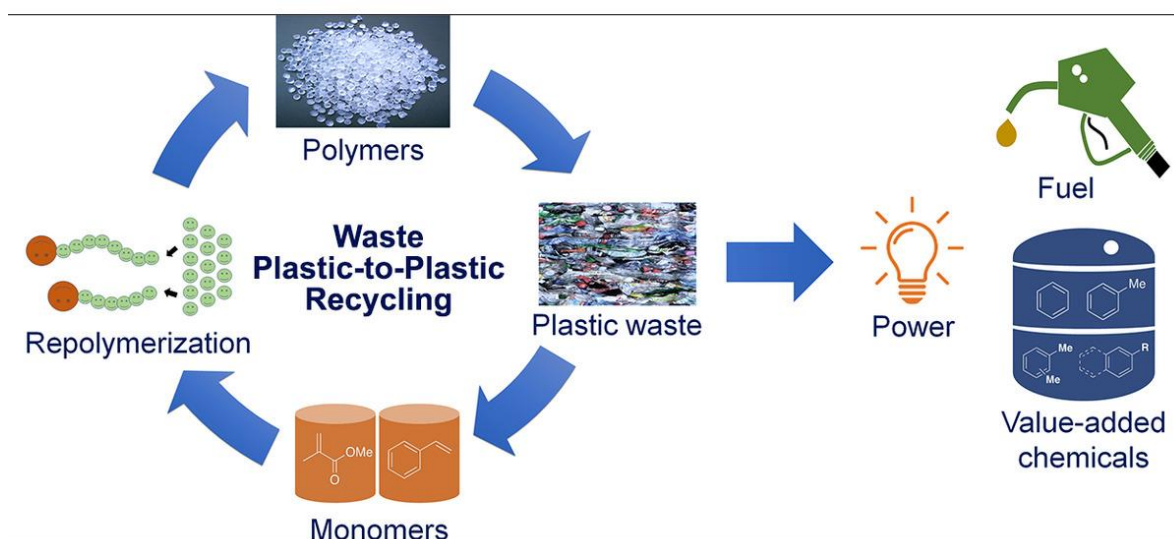
Existen múltiples autores que han investigado con diferentes perspectivas esta técnica, abarcando desde la parte ambiental, hasta los detalles fisicoquímicos y cinéticos de la reacción. Pero a partir de ellos, se pueden identificar principalmente las siguientes posturas generales: 1) los autores que visualizan una viabilidad negativa de tratar residuos sólidos con esta técnica, 2) los que reportan una viabilidad parcial, es decir, que solamente estudiaron o visualizan el tratamiento aplicado a un tipo particular de residuos, y 3) los autores que reportan el potencial de la técnica, como una posible Biorrefinería, que abarca varios posibles tipos de residuos.

En medio de la evaluación negativa de factibilidad, Baranski (2021) y Radhakrishnan et al. (2023) han reportado argumentos en contra de la técnica de pirólisis, que van desde razones energéticas y técnicas, hasta las estimaciones económicas efectuadas con diferentes tipos de metodologías. Las principales limitantes encontradas son: 1) Ambientales, donde en investigaciones previas, se ha estudiado que los fuelóleos procedentes de la pirólisis de diferentes fuentes producen mayores emisiones de escape que el diésel obtenido directamente del procesamiento de hidrocarburos tradicionales. Se reporta entonces una posible necesidad de regulaciones técnicas que en muchos países o regiones carecen de sustento o de expertos que promuevan su correcto uso. 2) Energéticas, porque los fuelóleos extraídos a altas temperaturas pueden producir mayores emisiones que los producidos a bajas temperaturas. Además, se reporta la utilización de fuentes energéticas para obtener productos con menos potencial energético que los materiales originalmente empleados. Y 3) Tecnológicas y económicas, ya que

los métodos de conversión son relativamente nuevos, con lo que se necesitan más investigaciones o estudios para elaborar normas y guías que estandaricen las actividades de recuperación de energía con esta técnica. Por otro lado, existen algunos estudios preliminares, que muestran que el proceso de conversión en combustibles con pirólisis tiene una tasa negativa de consumo energético, lo cual en términos de rentabilidad puede llegar a ser adverso, si no se encuentran los modelos negocio adecuados.

A pesar de estas limitantes, es importante comprender que como sucede con cualquier técnica de procesamiento, la pirólisis no tiene una aplicación universal, sino que representa una posible línea de tratamiento para residuos mixtos, contaminados o no procesables por otros métodos (ver Figura 1 para lógica central del proceso con plásticos). Esto implica que la técnica funciona como una última opción de valorización de residuos donde no puede usarse las populares 3R (Prevenir residuos, reusar y reciclar). Y, además, implica el rompimiento de enlaces químicos para formar combustibles o monómeros funcionales, lo que se traduce en una demanda energética considerable (Rehan et al., 2017).

Figura 1: Proceso general de pirólisis de plástico y sus posibles ramificaciones



Fuente: (Baranski, 2021).

Por otro lado, dentro de los estudios que han investigado la viabilidad del tratamiento de residuos específicos, Antal et al. (1996), Sun et al. (2014), Demirbas (2004), Viltres & Alarcón (2022) y Ionescu & Bulmău (2019), han estudiado principalmente el aprovechamiento de residuos de tipo lignocelulósico o alimenticio, generando principalmente combustibles sólidos. Dichos autores buscaron describir, analizar y aplicar métodos analíticos para la estimación del poder calorífico de los productos sólidos generados por la pirólisis de estos materiales, determinando que el impacto de las propiedades de la biomasa o masa residual y las condiciones operativas de la pirólisis son determinantes en los combustibles producidos.

Cuadro 1: Composición elemental de los residuos analizados por análisis proximal y de composición

Muestra	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Total Análisis Elemental (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fijo (%)	Cenizas (%)	Total Análisis Proximal (%)
Periódico	47.00	7.00	2.00	1.00	43.00	100.00	88.4	3.5	8.1	100.00
Cartón	48.00	8.00	2.00	1.00	41.00	100.00	87.5	6.6	5.9	100.00
Residuos de madera	49.52	5.81	0.31	0.02	44.34	100.00	84.9	15.0	0.1	100.00
PP	85.50	12.50	1.20	0.10	0.70	100.00	99.13	0.27	0.6	100.00
HDPE	84.70	14.47	0.11	0.12	0.60	100.00	99.74	0.06	0.2	100.00

Fuente: (Ionescu y Bulmău, 2019).

A pesar de esto y debido a la amplia gama de composiciones de dichos residuos se han publicado materiales insuficientes sobre la relación entre los tipos de residuos y el contenido energético de los productos generados con pirólisis. Ionescu y Bulmău (2019) lo indican de la siguiente forma: “El impacto de las propiedades de la biomasa y las

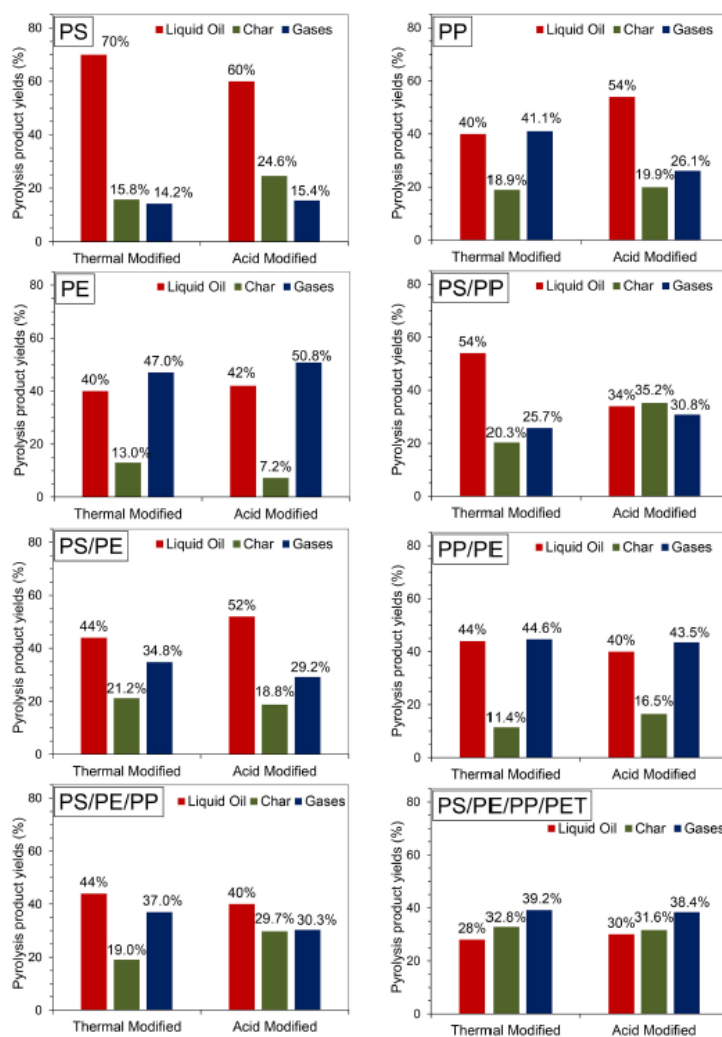
condiciones operativas de los procesos de pirólisis en las propiedades físicas y químicas del biocarbón ya se ha discutido, pero no se han publicado suficientes materiales sobre la relación entre los tipos de desechos basados en biomasa y plástico, y el contenido energético de los carbones”. De manera que, este campo de investigación continúa en auge a nivel laboratorio. En su investigación, lograron determinar el poder calorífico máximo (HHV) de diferentes biomásas crudas, residuos plásticos y mezclas de biomasa-residuos plásticos y sus subproductos (biocarbón y carbón vegetal), comprobando que existe una correlación entre el HHV conseguido del carbón producido y el tipo de residuos procesado. Como se muestra en el cuadro 1, diferentes porcentajes elementales componen a cada uno de los residuos estudiados (Ionescu y Bulmău, 2019).

Los resultados experimentales de esta investigación reflejaron que el contenido de cenizas es la propiedad principal que influencia en el contenido energético de los biocarbón/carbón, debido a que esto representa una masa que no genera energía durante el proceso de combustión. El porcentaje de materia volátil es la segunda propiedad que influencia en el HHV (Ionescu y Bulmău, 2019). Además, se reportan valores desde 24,000kJ/kg hasta 36,000kJ/kg para el combustible sólido en dependencia del tipo de residuo tratado, con lo que es posible competir con otros combustibles sólidos tradicionales.

Analizando el tipo de residuos que no se había mencionado, muchos autores han estudiado la pirólisis de residuos plásticos (Ratnasari et al., 2017; Serrano et al., 2012; Gandidi et al., 2018; y Miandad et al., 2019). En general, han establecido que la aplicación de esta técnica con este tipo de residuos genera combustibles sólidos y líquidos con poderes caloríficos por encima de otros materiales, lo que se ha correlacionado con su composición elemental, y ha sido visto con alto potencial, por haber alcanzado los niveles energéticos de la combustión de diésel o gasolina. Dentro de las técnicas empleadas, algunos autores reportan buenos rendimientos y poderes caloríficos sin el uso de catalizadores (Serrano et al., 2012), pero otros especifican que los mejores rendimientos se obtienen con procesos catalizados. Dentro de estos últimos, Ratnasari et al. (2017) publicaron que los más utilizados son el ZSM-5, zeolita, zeolita

Y, FCC y MCM-41. Además, establecieron que las reacciones catalíticas durante la pirólisis de residuos plásticos sobre catalizadores ácidos sólidos incluyen craqueo, oligomerización, ciclación, aromatización y reacciones de isomerización, que dan como resultado mejores propiedades de los combustibles obtenidos.

Figura 2: Rendimientos de combustibles líquido, sólido y gaseoso para polímeros puros y combinaciones de PS, PP, PE y PET



Fuente: (Miandad et al., 2019)

Por último, los autores como Ratnasari et al. (2017) y Miandad et al. (2019), que sostienen un enfoque con alto potencial para la pirólisis, han optado por publicaciones

donde se proponen biorrefinerías basadas en dicha técnica. Establecen en las publicaciones que la técnica tiene un gran potencial para convertir residuos como el plástico y biomasa, en energía y otros productos valiosos, para lograr el máximo beneficio económico y beneficios medioambientales.

Cuadro 2: Poderes caloríficos (HHV) del aceite de pirólisis de diversos polímeros puros o combinados, utilizando catalizadores TA-NZ y AA-NZ

Plásticos usados	Valor calorífico catalizado (MJ/kg)	Valor calorífico Máximo (MJ/kg)
PS	41.7	42.1
PP	43.4	42.9
PE	42.9	43.5
PS/PP	42.5	42.9
PS/PE	42.6	43.7
PP/PE	44.1	43.7
PS/PE/PP	42.4	44.2
PS/PE/PP/PET	41.9	43.7
Gasolina comercial	-	44 a 46
Diésel comercial	-	42 a 46

Fuente: (Miandad et al., 2019)

En el estudio efectuado por Miandad et al. (2019) se establece que: “Se estudió la pirólisis de diferentes tipos de Residuos plásticos (PS, PE, PP y PET) solos o mezclados en diferentes proporciones y en presencia de catalizadores de zeolita natural (NZ) modificados. En general, la pirólisis catalítica de PS produjo un mayor aceite líquido (70 y 60%) que el PP (40 y 54%) y el PE (40 y 42%), mostrando una gama amplia de resultados en función de los catalizadores y tipo de plástico tratado”. Pero lo más alentador de esa publicación, es que el aceite líquido tiene un rango de alto poder calorífico (HHV) de 41,7–44,2 MJ/kg, cercano al diésel convencional (ver detalle en

cuadro 2). Por lo tanto, tiene el potencial de ser utilizado como fuente alternativa de energía y como combustible para el transporte después de refinar o mezclar con combustibles convencionales. De esto y de los anteriores estudios con combustibles sólidos con alto poder calorífico, se sustentan Miandad et al. (2019) para formular su propuesta sobre Biorrefinerías basadas en pirólisis.

A pesar de que existe esta exploración práctica y teórica de la técnica, y a videos informales de casos que narran modelos de negocio exitosos, no se han encontrado publicaciones dedicadas a generar herramientas que permitan el análisis de los tipos de desechos tratados, su correlación con los productos que generan, el proceso que necesitan para efectuarse y el potencial económico que presentan. El presente trabajo trae, por lo tanto, aportes en esta línea, tratando de generar conocimiento sobre las variables correlacionadas por múltiples autores, con herramientas de evaluación de proyectos, diseño de plantas industriales y modelaje de reacciones químicas, para evidenciar la influencia en el modelo de negocio necesario para poder aplicar la técnica a los diferentes tipos de residuos sólidos.

2.2 Marco Teórico

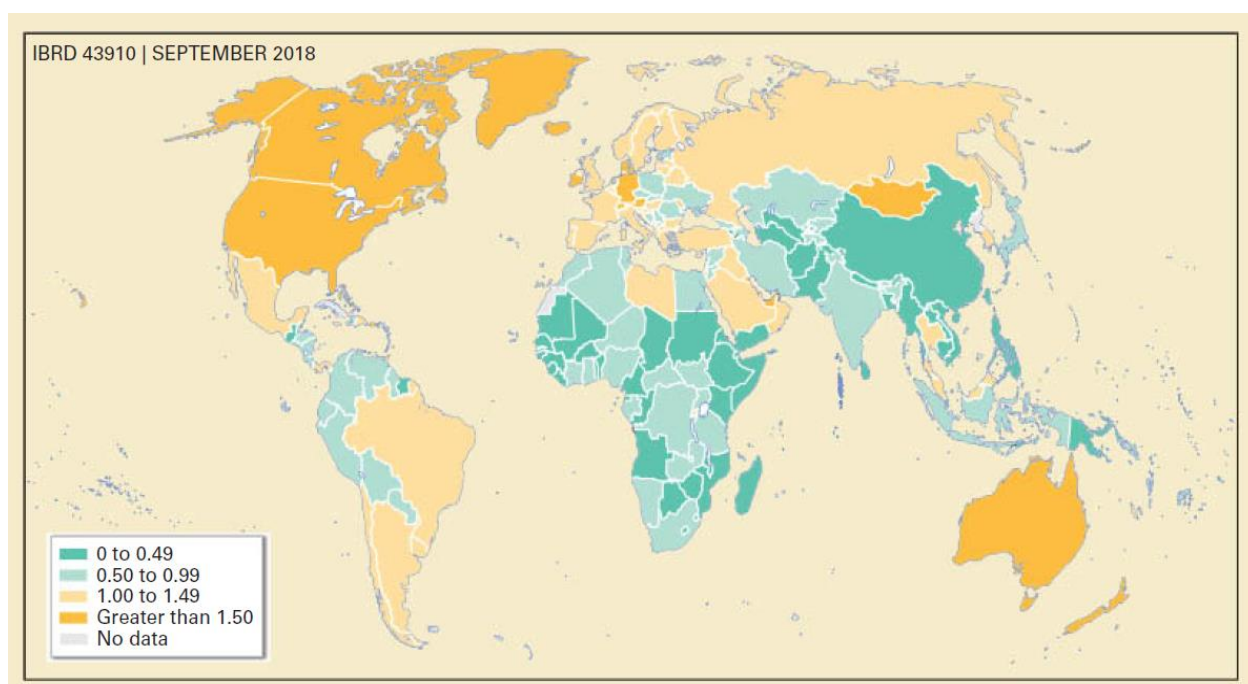
2.2.1 Problemática de los residuos sólidos

La gestión de residuos sólidos es un problema universal que afecta a todas las personas en el mundo. Los individuos y los gobiernos toman decisiones sobre el consumo y gestión de residuos que afectan a la salud diaria, la productividad, y limpieza de las comunidades. Los residuos mal gestionados están contaminando los océanos del mundo, obstruyendo los drenajes y provocando inundaciones, transmitiendo enfermedades a través de la reproducción de vectores, aumentando los problemas respiratorios a través partículas provenientes de la quema de desechos, dañando a los animales que consumen desechos sin saberlo, y afectando el desarrollo económico. Dada la importancia de este tema, en esta sección se presenta una visión general a la problemática de los residuos sólidos.

Kaza et al. (2018) indican en su reporte: “La generación de residuos es un producto natural de la urbanización, el desarrollo económico y el crecimiento demográfico. A medida que las naciones y las ciudades se vuelven más pobladas y prósperas, ofrecen más productos y servicios a los ciudadanos, y participan en el comercio y el intercambio global, por lo que enfrentan cantidades correspondientes de residuos a gestionar mediante tratamiento y eliminación”.

Si bien la contaminación con residuos sólidos es un tema del que la gente tiene conciencia, la generación de desechos está aumentando a un ritmo alarmante. Los países están desarrollándose rápidamente sin haber establecido sistemas adecuados para gestionar la distinta composición de desechos que producen los ciudadanos. Las ciudades, donde habita más de la mitad de los seres humanos y en las que se genera más del 80 % del producto interno bruto (PIB) del mundo, están en una posición de vanguardia en lo que respecta a hacer frente al desafío de los desechos a nivel mundial (Kaza et al., 2018).

Figura 3: Tasa de generación de residuos sólidos por país (kg/día y persona)

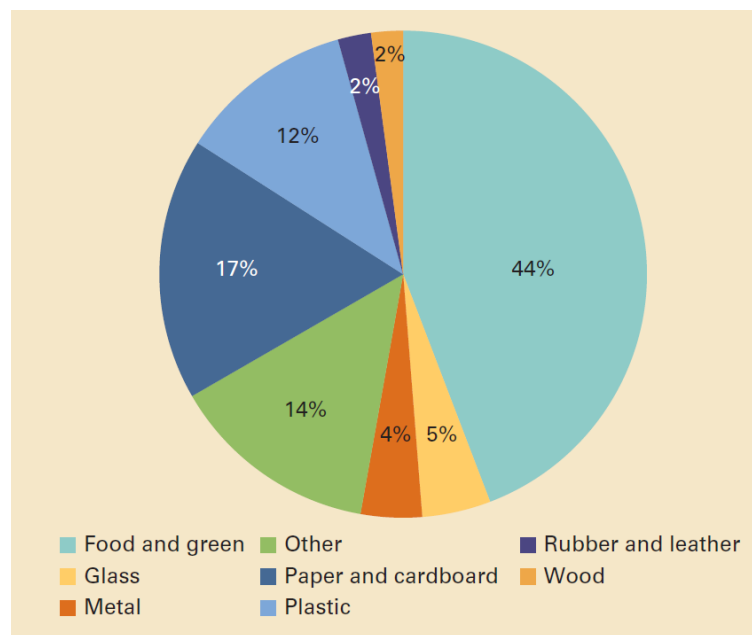


Fuente: (Kaza et al., 2018)

En el mundo se generan anualmente 2,010 millones de toneladas de desechos sólidos municipales, y al menos el 33 % de ellos no se gestionan, lo que evidencia el riesgo ambiental que los mismos representan. En el informe de 2018 del banco mundial sobre residuos sólidos, se proyecta que la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el desarrollo económico harán que la cantidad de desechos a nivel mundial aumente alrededor del 70 % en los próximos 30 años y llegue a un volumen de 3,400 millones de toneladas de desechos generados anualmente (Kaza et al., 2018).

De los residuos generados, los países de Asia Oriental y el Pacífico y Europa y Asia Central representan el 43 por ciento de los desechos del mundo por magnitud. Las regiones de Oriente Medio, Norte de África y África subsahariana producen la menor cantidad de residuos y en conjunto representan el 15 por ciento de los residuos del mundo. Asia Oriental y el Pacífico son los conjuntos de países que más generan residuos sólidos, estimando en 468 millones de toneladas (Kaza et al., 2018).

Figura 4: Composición promedio de residuos a nivel mundial



Fuente: (Kaza et al., 2018)

Composición de residuos

La composición de residuos es la categorización de tipos de materiales en los residuos sólidos municipales. A nivel internacional, la categoría de residuos más grande es la alimentaria y la verde, que representan el 44 por ciento de los residuos mundiales. Los Reciclables secos (plástico, papel y cartón, metal y vidrio) equivalen a otro 38 por ciento de los residuos (Kaza et al., 2018).

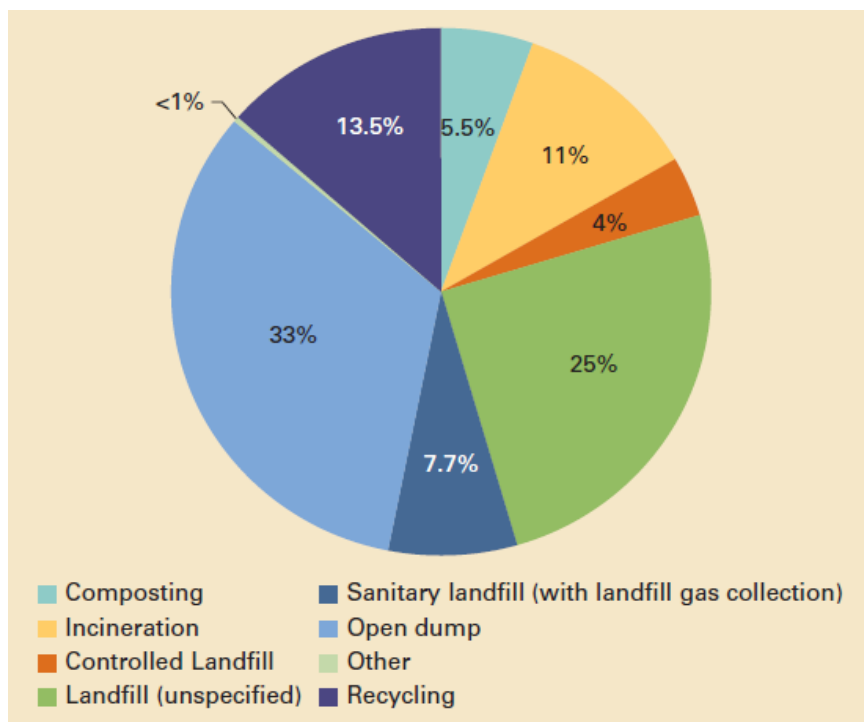
La composición de los residuos varía considerablemente según el nivel de ingresos. El porcentaje de materia orgánica en los residuos disminuye a medida que aumentan los niveles de ingresos. Los bienes consumidos en los países de mayores ingresos incluyen más materiales como papel y plástico que en los países de bajos ingresos (Kaza et al., 2018).

Manejo de residuos sólidos

En todo el mundo, casi el 40 por ciento de los residuos se eliminan en vertederos. Alrededor del 19 por ciento se somete a recuperación de materiales a través de reciclaje y compostaje, mientras que entre 4 y el 11 por ciento se tratan con incineración. Aunque a nivel mundial el 33 por ciento de los residuos sigue siendo tratado llevándolo a vertederos. Ante esto y las consecuencias adversas de los vertederos o del descarte indiscriminado, varios gobiernos han tratado de firmar acuerdos internacionales para poder generar mejoras en el tratamiento (Kaza et al., 2018).

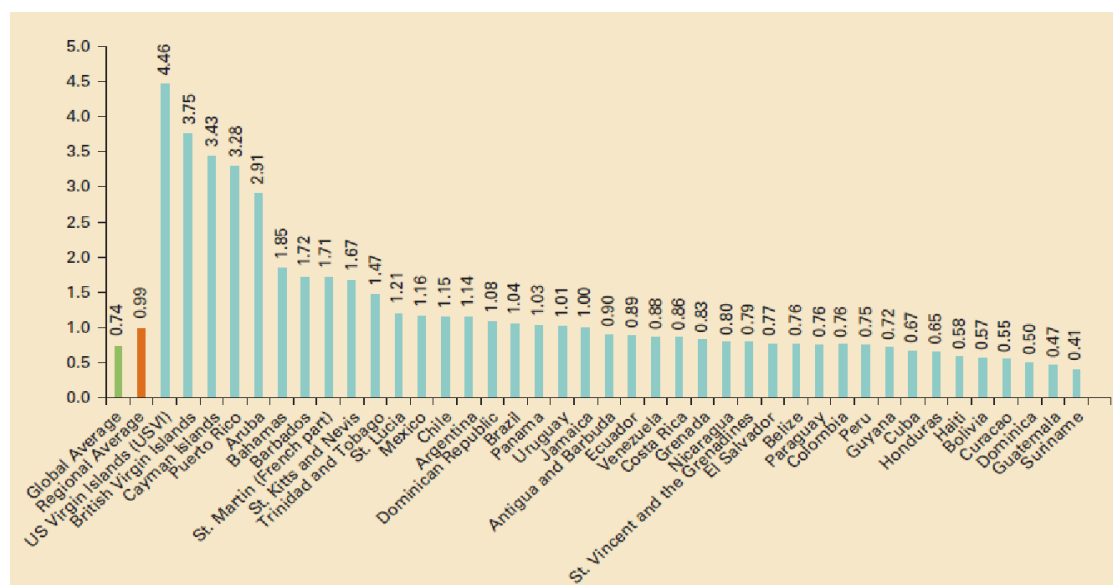
Las prácticas de eliminación de residuos varían significativamente según el nivel de ingresos y la región. El descarte indiscriminado o en vertederos prevalece en los países de bajos ingresos. Entre los tratamientos de estos países o regiones, se puede mencionar una alta tasa de quema no controlada como el principal método usado, fuera de los descartes donde los residuos son arrojados en carreteras, terrenos abiertos o mantos acuíferos. Por otro lado, solamente el 2 por ciento de los residuos se lleva a vertederos en los países de altos ingresos. De manera, que a pesar de que estos últimos presentan mayores tasas de generación de residuos, su tratamiento en general se hace con técnicas ajustadas a cada tipo de material (Kaza et al., 2018).

Figura 5: Tratamiento y disposición de residuos sólidos a nivel mundial



Fuente: (Kaza et al., 2018)

Figura 6: Tasa de generación de residuos sólidos por país (kg/día y persona)



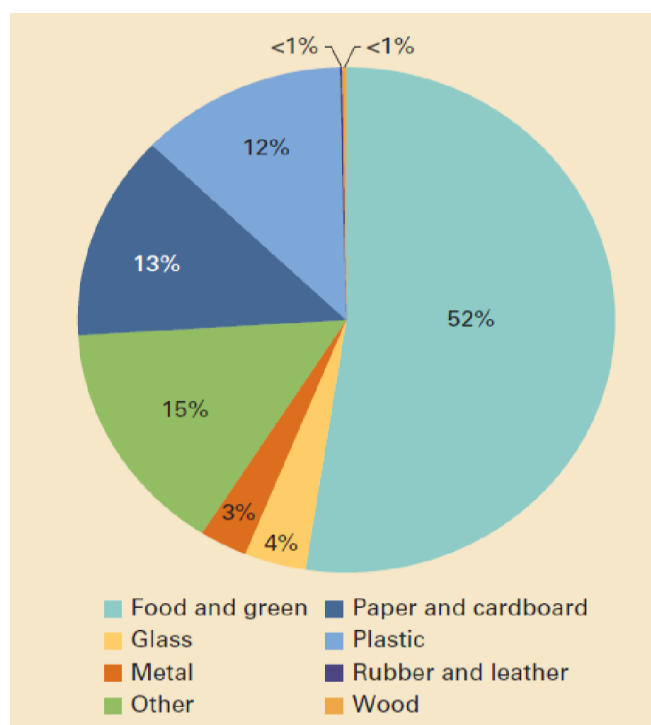
Fuente: (Kaza et al., 2018)

Situación Latinoamericana de manejo de residuos sólidos

La región de América Latina y el Caribe generó 231 millones de toneladas de residuos en 2016, a una media de 0.99 kilogramos por persona cada día. Muchos de los mayores generadores de desechos son estados insulares con economías turísticas activas.

Analizando la composición típica de estos residuos, se tiene que alrededor del 52% son materiales orgánicos, 13% son papeles o cartones, 12% son plásticos y el resto se reparte en otras categorías (ver Figura 4). Sin embargo, el proceso de reciclaje se encuentra por debajo del 4.5% de estos residuos y varios países de la región superan el promedio de generación per cápita mundial (ver Figura 6) (Kaza et al., 2018).

Figura 7: Composición promedio de residuos sólidos en Latinoamérica



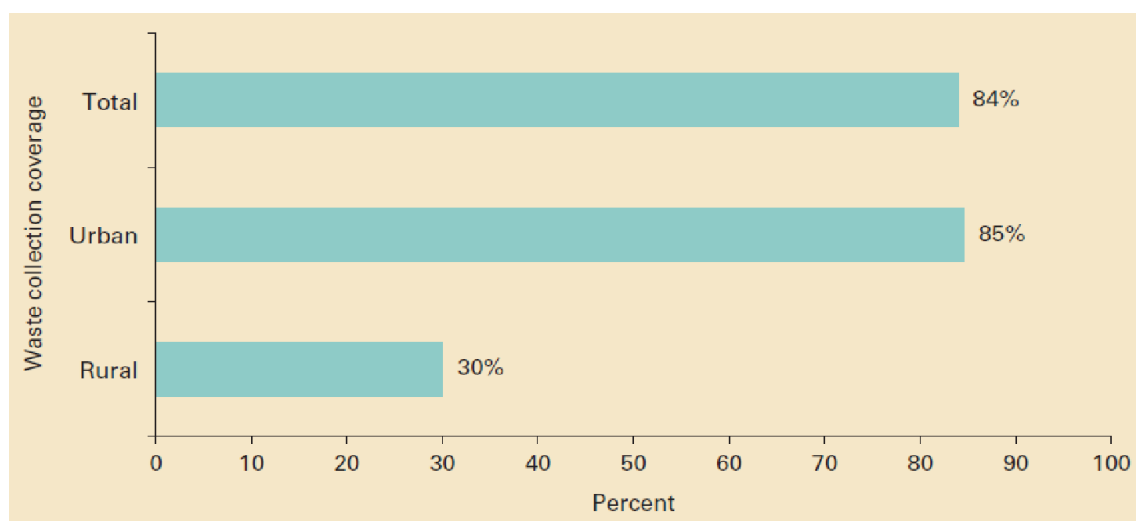
Fuente: (Kaza et al., 2018)

La cobertura de recolección de residuos es bastante alta para América Latina y la región del Caribe en comparación con las tendencias mundiales. A nivel urbano, se encuentra sobre el 85 por ciento de los desechos recolectados. Sin embargo, en las comunidades

rurales, la cobertura de recolección de residuos es de aproximadamente 30 por ciento (Kaza et al., 2018).

El sector informal es muy activo en la región. De las ciudades estudiadas se encontró un número variable de recicladores activos, que van desde 175 en Cusco, Perú, a 20,000 en São Paulo, Brasil. Algunas grandes ciudades latinoamericanas promedian casi 4,000 habitantes activos en reciclaje o recolección de materiales reciclables (Kaza et al., 2018).

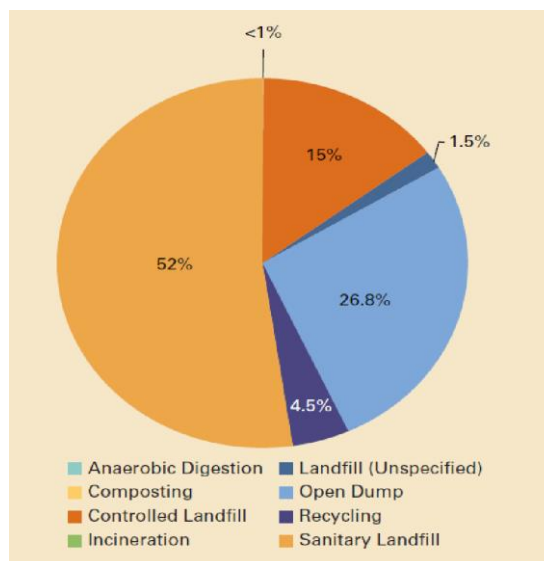
Figura 8: Porcentajes de recolección de residuos en Latinoamérica



Fuente: (Kaza et al., 2018)

Más de dos tercios de los residuos en América Latina y el Caribe se desechan en algún tipo de relleno sanitario, aunque parte de estos pueden ser vertederos bien administrados. Más de la mitad de los residuos se eliminan en rellenos sanitarios con algunos controles ambientales, lo que refleja un enfoque regional en métodos sostenibles de eliminación. El reciclaje y compostaje están surgiendo en toda la región, aunque el grado de la implementación varía según el país. La recolección de gases de vertedero se ha convertido en el principal mecanismo de valorización energética de los residuos en América Latina y el Caribe, aunque técnicamente dista mucho de ser la mejor opción (Kaza et al., 2018).

Figura 9: Disposición de residuos en Latinoamérica



Fuente: (Kaza et al., 2018)

2.2.2 Evaluación de Proyectos

La evaluación de proyectos representa un proceso integral y sistemático que permite determinar la viabilidad, eficiencia y pertinencia de una iniciativa antes, durante o después de su ejecución. Su propósito principal es analizar en qué medida un proyecto contribuye a los objetivos propuestos, si es financieramente viable, técnicamente factible y si sus impactos —positivos o negativos— son aceptables para la organización y las partes interesadas. Tal como lo plantean Boardman et al. (2017), esta es una evaluación estructurada de los objetivos, procesos y resultados de un proyecto para informar la toma de decisiones, y desde la óptica personal, representa una de las principales formas como debe decidirse si un proyecto es propicio para ser ejecutado o no.

Uno de los aspectos esenciales dentro de esta evaluación es la integración de análisis clave como el de viabilidad, el coste-beneficio, la gestión de riesgos y la evaluación de impactos. El análisis de viabilidad permite considerar desde la factibilidad técnica hasta la legal y operativa del proyecto, para asegurar que este sea alcanzable dentro de los parámetros establecidos (PMI, 2017). A pesar de esto, los componentes técnico y

económico suelen ser los más utilizados y se basan en indicadores que permiten comparar entre proyectos para la toma de decisiones.

El análisis de coste-beneficio, por su parte, contrasta los recursos invertidos con los beneficios esperados, determinando cuanto se obtendrá por cada monto invertido. Mientras que los análisis de riesgos e impacto, suelen ser factores complementarios, pero determinantes en la determinación de las posibilidades que un proyecto tienen de ejecutarse (PMI, 2017). Complementariamente, la evaluación de proyectos contempla niveles progresivos de profundidad: el análisis de perfil, el estudio de prefactibilidad y el estudio de factibilidad. Cada uno de estos niveles aporta un grado creciente de detalle en la evaluación y permite tomar decisiones fundamentadas en etapas tempranas o avanzadas. Mientras el análisis de perfil ofrece una visión general del proyecto y sus partes interesadas, la prefactibilidad amplía la revisión a aspectos técnicos y financieros, y la identificación de riesgos dentro de un marco del mercado donde se desarrollaría el proyecto. Y el análisis de factibilidad presenta un detalle más exhaustivo de los aspectos de un proyecto, profundizando en la viabilidad técnica y económica, pero incluyendo también un análisis de la viabilidad operativa, el cumplimiento de aspectos legales, la programación del proyecto, y sus riesgos e impactos (Kerzner, 2017). Debido a los problemas evidenciados en el campo de estudio de la pirólisis, los aspectos técnicos y económicos son preponderantes a ser estudiados y comprendidos.

Asimismo, se reconocen diversos métodos de evaluación como los sistemas de puntuación, el análisis costo-efectividad y las comparaciones con estándares de la industria (benchmarking), que permiten cuantificar y comparar la conveniencia de distintos proyectos. Estas evaluaciones se complementan con análisis técnicos y económicos más detallados. La evaluación técnica examina factores como el diseño de ingeniería, la idoneidad tecnológica, la disponibilidad de recursos y el desarrollo técnico, buscando gestionar las limitaciones que puedan tenerse en el campo de estudios (Boardman et al., 2017).

Por último, la evaluación económica complementa este proceso al analizar a fondo los retornos financieros, aplicando herramientas como el análisis costo-beneficio (ACB),

indicadores como VAN o TIR, y evaluando también aspectos dinámicos del mercado y condiciones externas. Además, se incorporan evaluaciones transversales como la de impacto social, ambiental y normativo, que permiten garantizar la sostenibilidad y legalidad de los proyectos (Boardman et al., 2017). Estos enfoques amplían la mirada hacia los beneficios no solamente desde la óptica técnica, aunque sin duda alguna, esta sea el punto de partida para la viabilidad de cualquier proyecto.

En conjunto, la evaluación de proyectos constituye una herramienta esencial en la gestión moderna de iniciativas complejas, ya que permite priorizar, decidir e intervenir con fundamento técnico, económico y social. Su correcta aplicación mejora la eficiencia en el uso de recursos, reduce riesgos y orienta hacia el logro de resultados sostenibles y alineados con los objetivos estratégicos de programas, organizaciones o políticas públicas.

2.3 Marco Conceptual

El tratamiento de residuos mediante tecnologías de conversión térmica ha cobrado relevancia como una alternativa viable para enfrentar los desafíos ambientales y energéticos actuales. Entre estas tecnologías, la pirólisis se destaca por su capacidad para transformar residuos orgánicos y plásticos en productos con valor energético y comercial. La operación de la pirólisis, así como el rendimiento y composición de sus productos, dependen de múltiples variables como el tipo de biomasa o residuo, el contenido de humedad, la temperatura de operación, el tiempo de residencia y la velocidad de calentamiento. Estos factores han dado lugar a una clasificación técnica de diferentes tipos de pirólisis: desde la carbonización hasta la pirólisis ultrarrápida, cada una con condiciones operativas específicas que favorecen la producción de una u otra fracción.

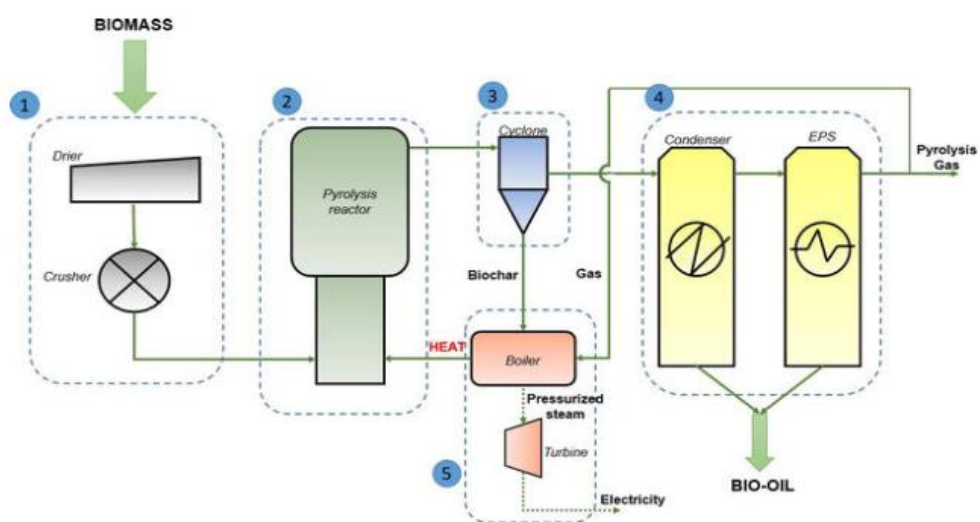
El presente marco conceptual tiene como finalidad proporcionar una comprensión clara de los fundamentos físicos, químicos y operativos del proceso de pirólisis, los tipos de reactores empleados, así como los modelos cinéticos que permiten su simulación y análisis, constituyendo una base teórica sólida para el desarrollo y evaluación de

sistemas de valorización térmica aplicados al contexto de los residuos sólidos. Además, se presenta una descripción de los principales términos y consideraciones energéticas esenciales para el análisis de la técnica e influye en la eficiencia y viabilidad del proceso.

2.3.1 Reacción de Pirólisis

La pirólisis es un proceso termoquímico de descomposición térmica de materia orgánica. Dicho proceso puede realizarse con residuos, tanto plásticos como orgánicos en ausencia de oxígeno para la obtención de productos en tres fases, sólido, líquido y gaseoso. El proceso puede ser autotérmico, donde se introduce una pequeña cantidad de oxígeno para realizar una combustión parcial que aporte calor al proceso. De los productos previamente mencionados, los compuestos con base de carbono se descomponen formando gases, donde hay tanto hidrocarburos condensables como no condensables y un residuo carbonoso sólido o char (es el coque remanente del proceso). La aportación del calor al proceso se divide en dos grupos, los cuales son sistemas alotérmicos y sistemas autotérmicos; en el caso de los sistemas alotérmicos se tiene una transmisión de calor que se lleva a cabo por medio de conducción y radiación de las paredes, no hay convección dado que es en ausencia de oxígeno, es una transmisión indirecta de energía.

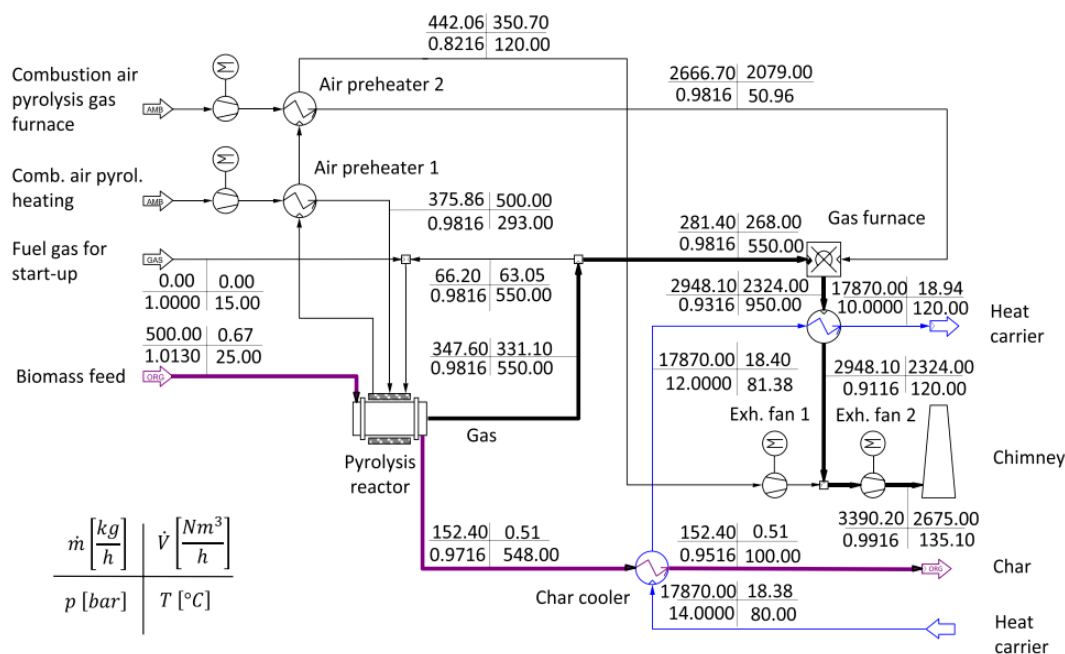
Figura 10: Diagrama general del proceso de pirólisis de biomasa



Fuente: (Santos, 2021)

La composición del extracto obtenido del proceso depende de variables como la temperatura, el tipo de material del que se parte y de cómo se realiza el proceso de pirólisis en sí. Este proceso puede realizarse en presencia de humedad, por lo que se puede partir de biomasa vegetal o primaria. Para la obtención de producto líquido, se realiza el proceso en ausencia total de oxígeno y dado que el proceso es endotérmico, se trabaja en temperaturas que oscilan entre los 500 o 600°C. Durante este proceso se forma un vapor piroleñoso, que es una mezcla de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos. Luego se forman compuestos líquidos, como aceites, alcoholes y ácidos, finalmente el residuo sólido es el coque remanente, compuesto de alquitrán, carbón y cenizas (Castells & García, 2012).

Figura 11: Balance de masa y energía de la pirólisis de tallos de algodón



Fuente: (Schaffer, Pröll, Al Afif, & Pfeifer, 2019)

Un sistema general para el proceso de pirólisis a partir de biomasa es el propuesto por Santos, 2021. El diagrama muestra las operaciones unitarias de preparación de materia prima, siendo el secado y la reducción de tamaño de la materia prima previo al reactor

de pirólisis. Luego se muestra el reactor de pirólisis y la separación de los productos en un ciclón y el aprovechamiento de cada uno de los productos de pirólisis.

Por otra parte, en la literatura se muestran propuestas de simulación y diseño de sistemas continuos de pirólisis, Schaffer, 2019, presenta el siguiente balance de masa y energía para el proceso de pirólisis de tallos de algodón:

Tipos de pirólisis

Los distintos tipos de pirólisis se clasifican primordialmente en función a la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia y la temperatura final de operación. Los tipos de pirólisis que existen son la carbonización, la pirólisis convencional, la pirólisis rápida, la pirólisis flash, la pirólisis ultrarrápida, la pirólisis al vacío, la hidro-pirólisis y la metano pirólisis.

En el caso de la carbonización, los tiempos de residencia pueden llegar a tomar varios días con una velocidad de calentamiento muy lenta, donde se llega a una temperatura máxima de operación de 400°C y se favorece el producto sólido o bio-char. Para la pirólisis convencional, los tiempos de residencia pueden llegar a tomar entre 5 y 30 minutos, teniendo una tasa o velocidad de calentamiento lenta, donde se llegan a temperaturas máximas de operación de 600°C y donde se favorece la obtención de los tres productos en las tres fases, el char, el bio-aceite y el producto gaseoso (Fernández, 2020).

Para el caso de la pirólisis rápida, los tiempos de residencia son entre 0.5 a 5 segundos, donde la tasa de calentamiento es muy elevada, llegando a temperaturas de operación de 650°C y se favorece la formación del producto gaseoso. Para la pirólisis flash, se puede tener dependiendo del sistema y las condiciones de operación una pirólisis flash que logre favorecer la formación de bio-aceite o de producto gaseoso. En caso general, los tiempos de residencia son menores a 1 segundo, la tasa de calentamiento es elevada y se llegan a temperaturas de operación por debajo de los 650°C (Fernández, 2020).

Para la pirólisis ultrarrápida, se tienen tiempos de residencia inferiores a 0.5 segundos, teniendo una muy elevada tasa de calentamiento y llegando a temperaturas de operación de 1000°C, en este caso se favorece la formación de productos gaseosos por la gasificación que se da. La pirólisis al vacío tiene tiempos de residencia de 2 a 30 segundos, con una tasa de calentamiento media y llegando a temperaturas operativas de 400°C, en este tipo de operación se favorece la formación de bio-aceite. En el caso de la hidro-pirólisis, los tiempos de residencia son inferiores a 10 segundos, teniendo una tasa de calentamiento elevada y con temperaturas operativas inferiores a 500°C, en este caso se favorece la formación de bio-aceites (Fernández, 2020).

Finalmente, la metano pirólisis, donde se tienen tiempos de residencia inferiores a 10 segundos, una tasa de calentamiento elevada y donde se obtienen temperaturas de operación que se encuentran por encima de los 700°C, en este caso se favorece la formación de producto gaseoso (Fernández, 2020).

El siguiente cuadro, muestra los rendimientos de los productos de pirólisis según el tipo de pirólisis:

Cuadro 3: Rendimientos de los productos de pirólisis dependiendo del tipo de proceso

PROCESO	Rendimiento de líquidos (%)	Rendimiento de biochar (%)	Rendimiento de gas (%)
Pirólisis rápida	75	12	13
Pirólisis convencional	50	20	30
Carbonización	30	35	35
Gasificación	5	10	85

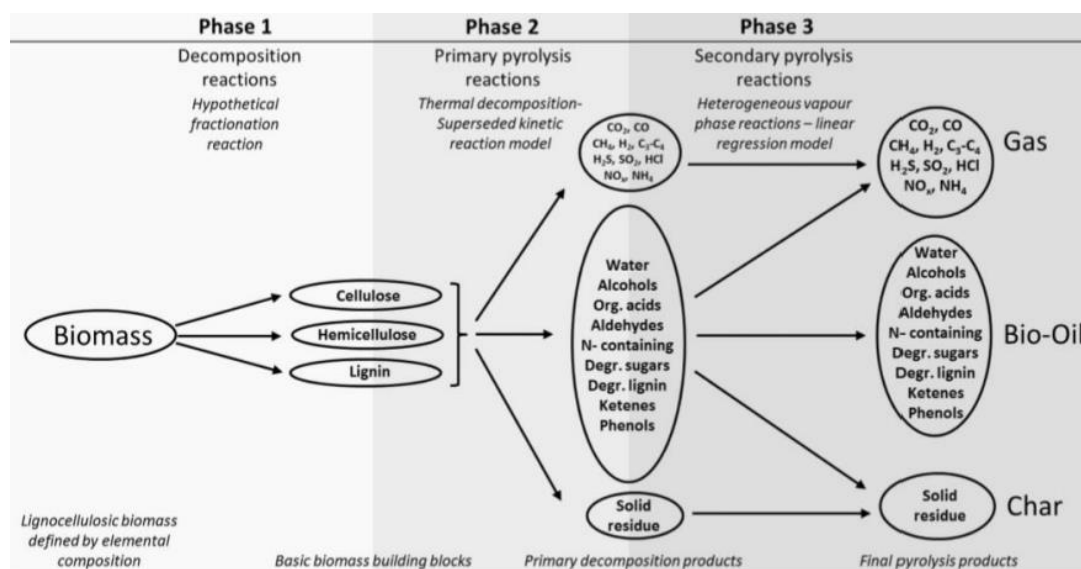
Fuente: (Fernández, 2020).

Etapas de la Pirólisis

La pirólisis puede representarse por medio de tres fases o etapas para llevar a cabo el proceso. La primera fase consiste en reacciones de descomposición, donde el material se descompone en sus componentes esenciales, los principales provenientes de biomasa

suelen ser: la celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales a su vez se descomponen en sus monómeros. Luego en la segunda fase, se dan las reacciones primarias de pirólisis, donde se da una descomposición térmica de los componentes previamente mencionados. En esta fase comienzan a formarse las tres fases de los productos de pirólisis, la fase gaseosa, la fase líquida y la fase sólida. En la tercera fase, se tienen las reacciones secundarias de pirólisis, donde se obtiene un vapor heterogéneo, y se dan reacciones en esta fase. En este punto la fase líquida puede vaporizarse y descomponerse a tal punto donde se forman gases no condensables y comienzan a formar parte de la fracción gaseosa. Es en este punto donde se terminan de formar y definir las tres fases de los productos de pirólisis (Fernández, 2020).

Figura 12: Etapas de reacción de la pirólisis



Fuente: (Fernández, 2020).

En la pirólisis de biomasa los factores principales que afectan al rendimiento de los productos son el tipo de biomasa utilizada y el contenido de humedad inicial. Dependiendo del contenido de humedad inicial se deberá realizar el secado previo al proceso de pirólisis, de modo que se pueda reducir significativamente el contenido de humedad y posteriormente en el proceso de pirólisis realizar el secado de la humedad ligada de la materia prima.

El cuantificar la cantidad de agua obtenida en el proceso para biomasa permite la determinación del rendimiento de los productos de pirólisis, el cual depende del tipo de pirólisis realizada y a qué temperatura se debe de realizar el proceso. Algunos ejemplos de rendimientos obtenidos de productos de pirólisis para ciertos tipos de biomasa en función de la temperatura óptima para obtener la mayor cantidad de producto líquido son: para pirólisis de madera, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 51%, con un rendimiento de char de 24% y un rendimiento de producto gaseoso de 25%; para pirólisis de cáscara de arroz, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 34%, con un rendimiento de char de 40% y un rendimiento de producto gaseoso de 30%; para pirólisis de residuos de uva, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 38%, con un rendimiento de char de 37% y un rendimiento de producto gaseoso de 25%; para pirólisis de paja, se tiene que el rendimiento máximo de producto líquido es de aproximadamente 43%, con un rendimiento de char de 33% y un rendimiento de producto gaseoso de 24% (Ionescu y Bulmău, 2019).

Productos de pirólisis

El combustible líquido obtenido del proceso de pirólisis puede utilizarse como fuente de energía para otros procesos, como su uso en una caldera en una mezcla de combustibles. Para determinar qué tanta energía suministrará el combustible obtenido se debe de medir su poder calorífico. El poder calorífico en peso o en volumen representa la cantidad de energía liberada por unidad de peso o volumen de carburante como la consecuencia de una reacción química de combustión completa que da lugar a la formación de dióxido de carbono y agua. Se distingue el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI) según la cantidad de agua obtenida en la combustión, que se encuentre en estado líquido o estado vapor respectivamente. La magnitud utilizada en la práctica es el PCI, ya que el agua producida en la combustión se encuentra en forma de vapor en los gases emitidos por los motores y quemadores. Para medir el poder calorífico se realizan pruebas de laboratorio con bombas calorimétricas, donde se cuantifica el calor liberado

por el combustible a partir del cambio de temperatura en el medio y de las características caloríficas del calorímetro (Ionescu y Bulmău, 2019).

La composición depende primordialmente del tipo de biomasa utilizada en el proceso de pirólisis, además del tipo de pirólisis y las condiciones de operación utilizadas para el proceso. Los principales componentes del producto líquido de pirólisis son agua, ácidos carboxílicos, ésteres, alcoholes, aldehídos, cetonas, lactonas, píranos, furanos, levoglucosano, fenoles y derivados de lignina. En la composición del producto líquido de pirólisis se tiene que los principales componentes en mayor proporción son agua con 22.0%, ácidos y ésteres con 20.2%, fenoles y derivados de lignina de 23.5%, cetonas y lactonas con 15.0%, alcoholes y aldehídos de 9.3%, furanos con 6.6%, píranos con 1.5% y levoglucosano con 1.6% (Ionescu y Bulmău, 2019).

El producto sólido de pirólisis es denominado bio-carbón o char, este contiene esencialmente carbón en su estructura, al cual se le realizan análisis proximales para determinar la cantidad de carbono fijo. Este carbón se caracteriza por tener un bajo contenido de humedad y con un poder calorífico elevado, en teoría superior al de la biomasa original. Este a diferencia de los combustibles fósiles, genera muy poca ceniza inorgánica y tal como se mencionó en los tipos de pirólisis, este producto se ve favorecido en la carbonización y en la pirólisis convencional. Ese producto tiene múltiples aplicaciones, desde su aprovechamiento energético en hornos, hasta utilizarse como carbón activado por sus buenas propiedades como adsorbente (Fernández, 2020).

El producto gaseoso es principalmente una mezcla de gases no condensables, de entre los cuales se tiene dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano e hidrógeno. Este producto al igual que el producto sólido se suele aprovechar energéticamente quemándolo en hornos para proporcionar energía en forma de calor o incluso para utilizarse en ciclos de vapor (Fernández, 2020).

Cinética y Reactores

Un reactor es una unidad elemental en los procesos químicos ya que es el equipo donde se lleva a cabo la reacción para la obtención de los productos que posterior al reactor

deben de purificarse. Existen varios tipos de reactores, pero en caso general, se debe de conocer información de las entradas y salidas; el modelo de contacto, o cómo fluyen los materiales y cómo entran en contacto dentro del reactor, qué tan pronto o qué tan tarde se mezclan; la cinética, que es el estudio de qué tan rápido se lleva a cabo la reacción química, toma en cuenta el tiempo y los fenómenos de transporte y cómo estos llegan a influir sobre la cinética de la reacción. Finalmente se debe de conocer la ecuación de diseño del reactor, que es la que permite dimensionar los reactores en función a la cinética y los flujos de alimentación y salida del mismo (Levenspiel, 1999).

Se pueden distinguir de forma general varios tipos de reactores. Se encuentran los reactores intermitentes o batch, que cómo su nombre lo indica, se alimenta una cantidad fija de alimentación al reactor, se espera a que se dé la reacción dentro del mismo para finalmente descargarlo. Este tipo de reactor puede o no contar con un agitador y se deben de realizar periodos de limpieza al reactor antes de alimentar un nuevo batch al sistema. El siguiente tipo de reactor son los reactores CSTR o reactores continuos con agitación, donde se tiene un flujo de entrada y salida además de un sistema de agitación. Dependiendo del tipo de reacción, ya sea exotérmica o endotérmica se requerirá de una chaqueta para realizar la transferencia de calor. Cabe mencionar que las ecuaciones de diseño entre los dos reactores anteriormente mencionados son distintas. Por otra parte, se encuentran los reactores PFR, o plug Flow reactor, que consiste en una serie de tuberías donde se lleva a cabo la reacción a lo largo del mismo. Este reactor posee la misma ecuación de diseño que el reactor batch con la diferencia de que no se toma en cuenta el tiempo de limpieza no operativo para el dimensionamiento del mismo (Levenspiel, 1999).

Otros tipos de reactores son aquellos con catalizador sólido, como los reactores de lecho fijo y lecho fluidizado, que contienen una cama de catalizadores sólidos, en la mayoría de los casos metálicos, donde conforme entra la mezcla la reactiva, estos permiten que la reacción se lleve a cabo de manera más rápida y se debe de realizar procesos regenerativos para los catalizadores (Levenspiel, 1999).

Cinética de reacción

El análisis cinético es el estudio de las reacciones químicas que permiten predecir el comportamiento de una reacción química con el tiempo y con la concentración de los componentes de la mezcla reactiva. Por lo general, uno analiza inicialmente el mecanismo de la reacción que se está llevando a cabo para determinar la velocidad de reacción teórica, que dependiendo de las fases que se trabajen será el modelo de la ecuación. Si se trabaja con soluciones la velocidad de reacción queda en términos de concentraciones, mientras que si se trabaja con una fase gaseosa se debe de trabajar con presiones parciales. Una vez determinada la velocidad de reacción teórica, se debe de analizar el proceso experimentalmente para recaudar datos, de modo que se pueda obtener una expresión de la velocidad de reacción experimental. De forma general, se busca la determinación de la constante de Arrhenius y del orden de reacción y existen múltiples métodos para la determinación de los mismos como el método integral, el método diferencial y el método de fracción de vida. En la actualidad existe una gran cantidad de softwares que permiten el modelado y determinación de las expresiones de velocidad de reacción en base a datos experimentales (Levenspiel, 1999).

Cinética en el proceso de pirólisis

Para el modelaje cinético del proceso de pirólisis se deben de tomar en cuenta dos fases del proceso. La primera fase donde la biomasa se descompone en sus componentes básicos, el cual no forma parte del proceso de pirólisis, pero se toma en cuenta para obtener la expresión de la velocidad de reacción. En esta fase, se representa la celulosa y la hemicelulosa por sus monómeros, de los cuales su estructura se mantiene relativamente fija. Por otra parte, la lignina representa múltiples monómeros, teniendo siete monómeros en total, estos dependen de la composición de la biomasa. En la segunda fase, se realiza la expresión de la velocidad de reacción para las reacciones de pirólisis primaria. Se interrelaciona la descomposición individual de celulosa, hemicelulosa y ligninas. Teniendo esto en consideración, se puede realizar la expresión de la velocidad de reacción en términos másicos o de temperatura (Fernández, 2020).

La expresión de la velocidad de reacción para el proceso de pirólisis se puede considerar de la siguiente manera:

Ecuación 1 Velocidad de reacción teórica para el proceso de pirólisis

$$r = k \cdot T^n \cdot e^{-E/RT}$$

Donde r representa la velocidad de reacción, k es el factor pre-exponencial, T la temperatura absoluta del sistema, E la energía de activación, R la constante de gases ideales y n el orden de reacción.

En la segunda fase se tiene la descomposición térmica, siendo las reacciones primarias de pirólisis las que se llevan a cabo durante esta fase. En esta fase se encuentran las reacciones secundarias en fase de vapor, siendo complejas incluyendo polimerizaciones parcialmente catalíticas y reacciones de recombinación que complican el modelo cinético (Fernández, 2020).

2.4 Marco Contextual

Guatemala es un país con una historia llena de contrastes, que van desde la época prehispánica con la evolución de las culturas mayas y su apogeo, hasta las actuales condiciones, donde impera una macroeconomía dependiente de las remesas familiares, y una democracia frágil, con alta incertidumbre en términos de seguridad y justicia. En este marco, se presenta de manera resumida los factores históricos que contextualizan dan soporte al lugar en el que se desarrolla la tesis doctoral.

2.4.1 Historia reciente de las normativas o legislaciones relacionadas en

Guatemala

Luego del 2020, se establecieron una serie de medidas y reglamentos con definiciones mejor centradas, pero aún con limitantes serias de ejecución. En ellos se establece que la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos (GIRDES) es el conjunto de acciones dirigidas al manejo sostenible de los residuos y desechos, desde la fase de su generación

hasta la disposición final. La GIRDES motiva la búsqueda de soluciones que tomen en cuenta no solo aspectos técnicos, ambientales y financieros, sino también sociales, institucionales y jurídicos. La visión de la GIRDES promueve, además, la recuperación del valor económico de los residuos sólidos (MARN, 2015).

El primer reglamento aprobado para el manejo de residuos sólidos con carácter normativo y obligatoriedad de ejecución data de 2005. Sin embargo, el mismo careció de apoyo y medios para ejecución, por lo que su implementación no fue efectiva y terminó siendo derogado.

Recientemente, Guatemala aprobó el Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes (Acuerdo Gubernativo 164-2021), con lo cual se fortalece el marco jurídico y de políticas públicas en torno a la gestión de los residuos y desechos sólidos (GIRDES). El nuevo reglamento establece la obligatoriedad de separar en la fuente, los residuos sólidos comunes orgánicos e inorgánicos, de este modo se facilitará el establecimiento de acciones de valorización de los residuos orgánicos como es el compostaje (MARN, 2021).

Otros elementos normativos para considerar en el campo pueden encontrarse en la página web del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, en el subportal “gestión integral de los residuos y desechos sólidos”. A continuación, se muestra una lista no exhaustiva de documentos de interés:

- Decreto Número 68-86, Ley de Protección y Mejoramiento del Ambiente
- Decreto Número 12-2002, Código Municipal
- Decreto Número 90-97, Código de Salud
- Decreto Número 7-2013, Ley Marco de Cambio Climático
- Acuerdo Gubernativo Número 281-2015, Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos.
- Acuerdo Ministerial 6-2019. Guía para la Identificación Gráfica de los Residuos Sólidos Comunes.

- Acuerdo Ministerial 7-2019 del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Guía para elaborar Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos Comunes.
- Guía Práctica para la Formulación de Planes Municipales para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos.
- Términos de referencia: Compostaje de residuos orgánicos (sin fines energéticos). Plan de Gestión Ambiental.
- Acuerdo Gubernativo 164-2021 Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos Y Desechos Sólidos Comunes.

2.4.2 Contexto de Guatemala

De acuerdo con lo reportado por CEPAL (2019), Guatemala es el país centroamericano con más habitantes (17.1 millones de acuerdo con el último censo realizado). Posee además una economía que crece de manera estable, impulsada por el consumo privado, que proviene en su mayoría de las remesas (tercer más alto en remesas de Latinoamérica) y un acceso fácil a crédito. Entre los sectores más dinámicos se encuentran: la construcción, turismo, servicios personales, retail, restaurantes y hoteles.

A pesar del crecimiento sostenido, la pobreza también se incrementa anualmente en alrededor del 10%, siendo la población indígena la más afectada. La falta de recursos, la delincuencia y la falta de acceso a servicios básicos, inducen la migración ilegal, que es tan pronunciada como para que el PIB tenga un componente mayoritario de remesas familiares (Banco Mundial, 2015). Además, Guatemala se encuentra entre los cuatro primeros países del mundo en riesgo de desastres naturales, es el noveno país más susceptible a los riesgos climáticos a largo plazo, y es un país con un tercio de la población considerada en inseguridad alimentaria (USAID, 2020). Los eventos climáticos destructivos, las erupciones volcánicas y los terremotos plantean amenazas casi anuales para la producción agrícola, la infraestructura y la vida humana (CONRED, 2020).

2.4.3 Condiciones Económicas

De acuerdo con el Banco Mundial (2023), Guatemala es un país de ingreso medio-alto y la economía más grande de América Central, por población y actividad económica. En 2021, su población superó los 17 millones y su producto interno bruto (PIB) total y per cápita fue de US\$86 mil millones y US\$5,025, respectivamente. El país ha experimentado un ritmo estable de crecimiento (3,5 por ciento en promedio durante el período 2010-2019), respaldado por una gestión fiscal y monetaria y una postura macroeconómica prudentes. Luego de un fuerte repunte en 2021 (8 %), la economía de Guatemala creció aproximadamente un 4 por ciento en 2022, 3.5 en 2023 y 3.7 en 2024, impulsada por el consumo privado, la inversión y el consumo público. Se espera que el crecimiento del PIB se encuentre en valores entre 3.0 y 4.1 por ciento en 2025.

2.4.4 Universidad del Valle de Guatemala y sus Centros de Investigación

Siendo la institución donde se realizará la experimentación y donde se tiene el interés de investigar sobre la técnica de pirólisis, a continuación, se presenta una breve descripción de la Universidad del Valle de Guatemala y sus centros de investigación, con enfoque en el centro en el que se efectúa la parte experimental:

La Universidad del Valle de Guatemala es una de las más prestigiosas universidades en Centroamérica. Es una institución a la vanguardia en tecnología y en promoción de investigación y enseñanza de alto nivel. Es la universidad privada no. 1 en Centroamérica y Panamá, según el ranking QS y la única universidad con la acreditación institucional de Hcéres en Guatemala (UVG, 2018).

Desde hace más de 50 años, busca personas con talento que desean ser agentes de cambio. Ofrece un modelo distintivo con amplio enfoque en artes liberales, unificado con una formación especializada en las ciencias, tecnología, innovación, emprendimiento y educación. El portafolio de programas y la agenda de investigación y vinculación responden a las necesidades del entorno, las nuevas generaciones de estudiantes, y promueven la búsqueda de soluciones a los retos de nuestra sociedad. La

institución se ha caracterizado por que busca la excelencia académica con valores y criterios de ayuda para todos los estudiantes, a través de ayuda financiera y becas para jóvenes talentosos de escasos recursos (UVG, 2018).

2.4.5 Instituto de Investigaciones UVG

El Instituto de Investigaciones, establecido desde 1977, es el ente encargado de coordinar, promover y facilitar el trabajo investigativo de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG). Actualmente está integrado por 10 centros de investigación, cuyos objetivos principales son (UVG, 2018):

- Acrecentar el conocimiento para buscar soluciones a los problemas nacionales y de la zona geográfica de influencia del instituto.
- Impulsar y fortalecer el vínculo entre docencia e investigación.
- Divulgar y transferir los resultados de investigaciones con la sociedad a través de publicaciones, conferencias, talleres y cursos de educación para el público.

Figura 13: Líneas de investigación del Centro de Procesos Industriales de UVG



Fuente: (UVG, 2018)

El impacto en la ciencia y tecnología que se genera está basado en la generación y divulgación académica de nuevo conocimiento derivado de la investigación. El impacto en la educación se sustenta con los estudiantes, ofreciendo oportunidades de

investigación por medio de experiencias de tesis, prácticas profesionales y auxiliauras de investigación. También impulsa la innovación y el desarrollo económico por medio de la transferencia de la tecnología, impactando en la sociedad y cultura con la divulgación y el fomento de la ciencia, vinculación con los medios de comunicación y promoción de las mejores prácticas basadas en evidencia dentro y fuera de la universidad (UVG, 2018).

2.4.6 Centro Investigación en Procesos Industriales (CPI)

El Centro de Procesos Industriales (CPI) es una unidad del Instituto de Investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, que inició sus operaciones el 1 de enero de 2010. Su enfoque es investigar opciones tecnológicas que hagan más eficientes los procesos, reduzcan el impacto y permitan incursionar en temas de actualidad. Las líneas de investigación del Centro se muestran en la Figura 13 (UVG, 2018).

El Centro de Proceso Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala en correlación con su línea de investigación de “Energía Renovable” y la sub-línea de “Aprovechamiento de los recursos”, cuenta ya con 6 años de experiencia en investigación de la técnica de pirólisis para el tratamiento de diversos tipos de residuos. Han generado dentro de este tema varia publicaciones en revistas indexadas y otras formas de divulgación de este tipo de estudios. Cuenta con la experiencia de profesores e investigadores en la línea de desarrollo de materiales, tratamiento de residuos sólidos y polímeros, quienes han apoyado como paso a seguir a las investigaciones técnicas, la formulación de investigaciones para generar herramientas que permitan conocer cuando esta técnica puede aplicarse y cuando es rentable hacerlo.

2.5 Marco Legal y Normativo

Empleando información de diferentes fuentes sobre las legislaciones guatemaltecas y acuerdos internacionales donde el país ha participado, se presenta en este marco un análisis breve de las principales leyes y regulaciones aplicables a la investigación planteada (ver mayor detalle en Anexos).

El marco normativo guatemalteco relacionado con la gestión ambiental y el tratamiento de residuos, como la pirólisis, está sustentado por una serie de leyes, decretos y reglamentos que establecen derechos fundamentales, responsabilidades institucionales y lineamientos técnicos. La Constitución Política de la República de Guatemala (1993) garantiza derechos esenciales como el acceso a un ambiente sano, el derecho a la salud, a la información y a la participación civil. Esta base legal establece las disposiciones sobre protección ambiental y el manejo responsable de los recursos (Batle & González, 2010; Naciones Unidas, 1999).

Uno de los pilares fundamentales es la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto 68-86, 1986), la cual crea la CONAMA y define los lineamientos para la política nacional ambiental, delegando funciones de aplicación y supervisión a entidades estatales y municipales. Asimismo, el Código Municipal (Decreto 58-88, 1988) establece obligaciones específicas para las autoridades locales en cuanto a conservación y regulación ambiental en sus jurisdicciones (Batle & González, 2010; MARN, 2011).

Complementando estas normativas, la Ley de Áreas Protegidas (Decreto 4-89 y sus reformas) delimita responsabilidades del Estado en la preservación de zonas ecológicas vulnerables, mientras que el Código de Salud (Decreto 90-97, 1990) vincula directamente la salud pública con la regulación ambiental, particularmente en el control de productos nocivos. La Ley Forestal (Decreto 101-96) y la creación del INAB refuerzan los mecanismos para el manejo sostenible de los recursos forestales y la reducción de la deforestación (Naciones Unidas, 1999).

En el ámbito científico y tecnológico, el Decreto 63-91 impulsa la promoción de la investigación aplicada al desarrollo ambiental, base importante para tecnologías como la pirólisis. Por su parte, la Ley de Propiedad Industrial (Decreto 57-2000) incentiva la innovación tecnológica en sectores como el tratamiento de residuos, asegurando la protección de patentes y modelos industriales (Batle & González, 2010).

Reglamentaciones específicas como el Reglamento para el manejo de desechos sólidos hospitalarios (2001) establecen directrices claras para la recolección, clasificación y disposición final de residuos sanitarios, mientras que la Ley de Colegiación Profesional Obligatoria (2001) garantiza la participación ética y técnica de profesionales en procesos relacionados con el medio ambiente (Batle & González, 2010).

A nivel institucional, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales ha impulsado normativas clave como la Política Marco de Gestión Ambiental (2003), que orienta la planificación y gestión ambiental del Estado, y el Reglamento para la descarga y reúso de aguas residuales y disposición de lodos (2006), que promueve la conservación del recurso hídrico a través del control de efluentes (Batle & González, 2010).

En 2007, se emitió el Reglamento para la evaluación, control y seguimiento ambiental, herramienta que establece procedimientos para asegurar que proyectos y actividades se desarrollen con un análisis de impacto ambiental riguroso. Más recientemente, se ha fortalecido la gestión de residuos con la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos (2015), orientada a la reducción de riesgos ambientales y a la protección de la salud (MARN, 2021b).

Finalmente, el Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes (Acuerdo Gubernativo 164-2021) proporciona un marco técnico y sanitario detallado para la gestión de residuos desde su generación hasta su disposición final, incluyendo normas sobre clasificación, almacenamiento, transporte, reciclaje, tratamiento y disposición final. Esta regulación es especialmente relevante para proyectos de valorización térmica como la pirólisis, ya que establece condiciones técnicas, sanitarias y ambientales que deben cumplirse (MARN, 2021b).

Desafortunadamente, a pesar de las legislaciones descritas, los detalles que se encuentran en ellas relacionados a la técnica de pirólisis o su aplicación son prácticamente nulos, de hecho el término no se menciona en ninguna de las legislaciones descritas. Se observa una normativa técnica frágil y sin sustento científico, con lo que se regula discrecionalmente y con complejidades de ejecución debido a la omisión de los

principios técnicos, por lo que a pesar de que la base para poder proponer la aplicación de la técnica, investigar y actuar existen, se valora como una necesidad futura, la mejora de las normativas y regulaciones para poder inducir la aplicación de la técnica estudiada.

Capítulo 3. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación

En este capítulo de marco metodológico se describe el enfoque, diseño y procedimientos utilizados en la investigación para alcanzar los objetivos planteados. Incluye la definición del tipo de estudio, la población o muestra considerada, las técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos, así como la justificación del método seleccionado. Este capítulo brinda el detalle necesario para garantizar la rigurosidad científica del estudio y permite su replicabilidad.

La metodología de esta investigación se organiza inicialmente a partir de la definición operativa de las variables, asegurando la coherencia entre el tema de estudio, los objetivos y las variables involucradas. Posteriormente, se detallan las dimensiones e indicadores correspondientes a cada variable. A continuación, se expone el diseño metodológico que orientó la elaboración de los instrumentos de recolección de datos, abarcando el enfoque adoptado, el tipo y diseño de la investigación, así como los métodos, técnicas y herramientas utilizadas para la obtención de información. También se incluye la delimitación de la población y muestra, junto con los procesos de intervención aplicados en el estudio. Además, en esta sección se presentan los resultados de la investigación planteada de acuerdo con cada uno de los objetivos trazados, por lo que se encuentra dividido en secciones que presentan estos resultados de forma ordenada y coherente con el avance de la investigación.

3.1 Cuadro Operacionalización de variables

En función de proyección y fundamentación realizada para la investigación de esta tesis doctoral y lo establecido por Bauce et. al. (2018), se elaboró un análisis de la operacionalización de las variables, el cual se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 4: Operacionalización de variables del proyecto

Variables	Dimensiones	Subdimensiones	Indicadores
<u>Independientes</u>		Herramienta predictiva de	Predicción simulada de los productos de la

Herramientas técnicas y económicas basadas en modelos de reacción y evaluación de procesos	Herramientas Técnicas	productos de la reacción	reacción de pirólisis (% de error <5%)
		Herramienta predictiva de tiempo de la reacción	Predicción simulada del avance de la reacción de pirólisis (correlación >95%)
		Herramienta de escalamiento y proyección industrial	Predicción simulada de capacidades de equipos críticos (% de error < 5%)
	Herramientas Económicas	Herramientas de proyección con flujos de Caja	Capacidad de proyección de escenarios
		Indicadores de rentabilidad de proyectos	Predicción de rentabilidad de casos reportados (%error <10%)
Variabilidad en la composición de los residuos sólidos en la ciudad de Guatemala	Categorías de residuos sólidos que se generan en la ciudad de Guatemala	Porcentaje de residuos de cada categoría	Cuantificación porcentual de cada categoría de residuos
		Potencial de tratamiento con técnica de pirólisis	Análisis de propiedades para determinación del potencial
	Propiedades de las categorías de residuos sólidos	Composición Elemental	Porcentajes de Carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros elementos constitutivos.
		Propiedades Físicoquímicas y mecánicas	Densidad, % de Humedad, compresibilidad,

<p><u>Dependientes</u></p> <p>Análisis de Viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala</p>	<p>Propiedades de los productos que se generan con la reacción de pirólisis</p>	<p>Rendimientos de reacción</p>	<p>entre otras propiedades relevantes.</p> <p>Rendimiento de producto sólidos, líquido y gaseoso</p>
	<p>Viabilidad técnica</p>	<p>Propiedades principales para funcionar como biocombustibles</p>	<p>Poder calorífico del biocombustible sólido, líquido y gaseoso.</p>
		<p>Capacidad de Generar biocombustibles</p>	<p>Proyección de biocombustibles y sus propiedades en función del tipo de residuo (comparativo con combustibles comerciales).</p>
		<p>Temporalidad coherente para operación industrial</p>	<p>Proyección de tiempos de reacción (comparativo con tiempos usuales de reacción).</p>
<p>Viabilidad Económica</p>	<p>Equipos disponibles a nivel industrial</p>	<p>Capacidades de equipos básicos disponibles.</p>	
		<p>Rentabilidad proyectada</p>	<p>Rentabilidad exigida por inversionistas y comparada con casos.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Estas definiciones desarrolladas son la base para poder realizar las mediciones necesarias de los indicadores para el trabajo doctoral. Sin embargo, la coherencia con los

objetivos, hipótesis y conceptualización de cada variable, se muestran en la matriz de congruencia elaborada:

Cuadro 5: Matriz de congruencia científica metodológica

Operacionalización de Variables						
Título: “Desarrollo de herramientas de evaluación técnica y económica basadas en métodos de modelación para la aplicación industrial de pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala”						
Pregunta de investigación	Hipótesis	Objetivo general	Objetivos específicos	Variables estudiadas	Dimensiones	Indicadores
¿Cómo contribuir al análisis de la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos?	Si se propone herramientas técnicas y económicas basadas en modelos de reacción y evaluación de procesos, entonces se podrá analizar la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos y el escalamiento del proceso	Proponer herramienta s técnicas y económicas utilizando técnicas de modelaje, que permitan analizar la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos en la composición	1) Determinar los fundamentos teóricos, avances científicos y enfoques metodológicos existentes sobre la pirólisis de residuos sólidos, con el fin de establecer un marco conceptual sólido que sustente el desarrollo de herramientas de evaluación técnica y económica aplicables al	<u>Variables Independientes</u> 1) Variabilidad en la composición de los residuos sólidos en la ciudad de Guatemala	Categorías de residuos sólidos que se generan en la ciudad de Guatemala	Cuantificación porcentual de cada categoría de residuos Análisis de propiedades para determinación del potencial
					Propiedades de las categorías de residuos sólidos	Porcentajes de Carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros elementos constitutivos. Densidad, % de Humedad, compresibilidad

		n de los residuos	contexto guatemalteco.			ad, entre otras propiedades relevantes.
			2) Realizar un diagnóstico sobre las categorías de residuos sólidos que se generan en la ciudad de Guatemala, sus propiedades y su composición, para generar una base de datos que permita elaborar herramientas basadas en modelaje.			Rendimiento de producto sólidos, líquido y gaseoso Poder calorífico del biocombustible sólido, líquido y gaseoso.
				2) Herramientas técnicas y económicas basadas en modelos de reacción y evaluación de procesos	Herramientas Técnicas	Predicción simulada de los productos de la reacción de pirólisis (% de error <5%) Predicción simulada del avance de la reacción de pirólisis (correlación >95%) Predicción simulada de capacidades de equipos

						críticos (% de error < 5%)
			3) Proponer una herramienta de predicción de rendimientos y propiedades de los productos de la reacción de pirólisis en función del tipo de residuo sólido procesado, una herramienta de predicción del tiempo de reacción y una de simulación del escalamiento a planta industrial, para determinar la viabilidad técnica de aplicar esta tecnología.		Herramientas Económicas	Capacidad de proyección de escenarios Predicción de rentabilidad de casos reportados (%error <10%)
			4) Proponer una herramienta de evaluación económica de la reacción de pirólisis de	<u>Variable/s dependientes</u> Análisis de Viabilidad industrial de la pirólisis de	Viabilidad técnica	Proyección de biocombustibles y sus propiedades en función del tipo de

			<p>diferentes tipos de residuos sólidos, que utilice indicadores financieros para establecer la viabilidad económica en diferentes escenarios.</p>	<p>residuos sólidos en la ciudad de Guatemala</p>		<p>residuo (comparativo con combustibles comerciales).</p> <p>Proyección de tiempos de reacción (comparativo con tiempos usuales de reacción).</p> <p>Capacidades de equipos básicos disponibles.</p>
			<p>5) Evaluar las herramientas generadas utilizando la comparación de su exactitud con coeficientes de correlación y porcentajes de error respecto de datos experimentales, equipos disponibles comercialment e y casos de negocios</p>		<p>Viabilidad Económica</p>	<p>Rentabilidad exigida por inversionistas y comparada con casos.</p>

			reportados, para valorar su aplicación en la evaluación de la viabilidad de la técnica.			
--	--	--	--	--	--	--

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Diseño metodológico

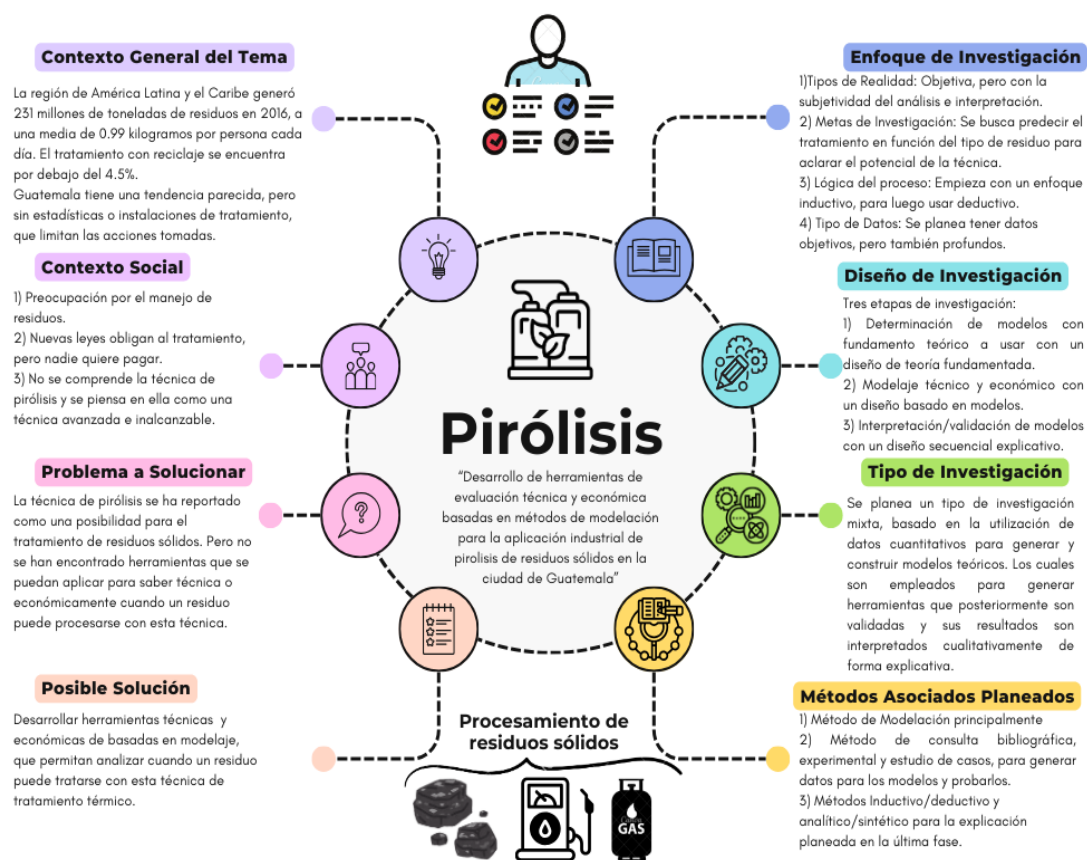
En este apartado se presentan las definiciones necesarias para el diseño mixto de investigación definido para esta tesis doctoral. Ante el posicionamiento de diferentes autores que han trabajado en el campo de las reacciones de pirólisis, se considera necesario combinar la fortaleza del diseño cuantitativo en el procesamiento de datos y en la predicción de comportamientos que lleven a obtener información técnica y económica de la aplicación de la técnica, con la posibilidad de análisis deductivos e inductivos, que permitan contar con evaluaciones iniciales de fuentes de datos referenciales necesarias para modelar y luego de los procedimientos cuantitativos, permitan valorar las herramientas desarrolladas y proponer las transformaciones necesarias.

3.2.1 Definición del enfoque, diseño y tipo de investigación de la tesis

Para comenzar con la fundamentación, es necesario describir brevemente el problema y sus objetivos, los que se muestran en el capítulo 1: Proyección de la Investigación. De manera resumida se puede mencionar que, a partir del alarmante problema que el manejo de residuos representa para Latinoamérica, pero sobre todo para la región investigada, otros estudios han abarcado el problema de maneras diversas que van desde lo legal hasta lo técnico. Autores de diferentes partes del mundo reportan métodos de tratamiento de residuos sólidos muy diversos, dentro de los cuales la técnica de tratamiento térmico denominada pirólisis, representa una solución de valorización, al generar biocombustibles con potencial comercial.

A pesar de los posibles beneficios, existen tres formas como otros autores han abordado el tratamiento con este residuo: 1) la posición negativa, que indica que no puede utilizarse la técnica, principalmente por impedimentos energéticos, que la hacen costosa, 2) la posición neutral, donde el autor analiza la posibilidad de tratamiento de un único tipo de estos residuos y genera conclusiones sobre ese tipo de residuos, pero sin opinar sobre otros tipos de residuos, y 3) la posición positiva, donde los autores reportan el potencial de convertir esta técnica en la base de biorrefinerías, que permitan el tratamiento de múltiples tipos de residuos. Dentro de estos estudios, el Centro de Procesos Industriales, ha realizado previamente investigaciones enfocadas en algunos tipos de residuos típicos de Guatemala, de donde surge el interés en el tema y en ahondar en el campo de estudio.

Figura 14: Mapa mental de la tesis doctoral



Fuente: Elaboración propia.

Independientemente de cuál de las corrientes o posiciones pueda apoyarse, no se han encontrado herramientas técnicas o económicas, que combinadas puedan apoyar a tomar una decisión fundamentada sobre si un tipo de residuo puede tratarse o no con la técnica de pirólisis. Derivado de esto, surge el interés en desarrollar el trabajo de investigación planteado en esta tesis doctoral. Para comprender los diferentes aspectos que integran la fundamentación de dicho tema, se presenta un análisis resumido de cada uno de dichos aspectos a continuación y de forma sintética en el mapa mental mostrado en la Figura 14.

Enfoque de Investigación

El enfoque de la investigación se centra en las herramientas técnicas y económicas a desarrolladas para evaluar la aplicación de la técnica de pirólisis a nivel industrial. Partiendo de esto, se analizan los elementos del enfoque de la siguiente manera:

- Tipo de Realidad por estudiar: En este caso se considera un estudio centrado en una realidad objetiva, que implica un caso de tratamiento termoquímico establecido y medible con datos cuantitativos, base del análisis y desarrollo de los modelos y herramientas planteados. Sin embargo, también se considera la introducción o uso de elementos analíticos, interpretativos y deductivos, que parten de los modelos, pero que introducen un componente subjetivo derivado de las valoraciones del autor.
- Metas de Investigación: Las metas principales van en la línea del desarrollo de herramientas técnicas y económicas, que permitan en primera instancia determinar los productos que se generan en función del tipo de residuo a tratar, para luego determinar los equipos necesarios para llevarlo a un proceso industrial y finalmente, definir las características del modelo de negocio empleando un análisis económico determinante.
- Lógica del proceso: El proceso comienza con un enfoque inductivo, empleando datos referenciales para generar los modelos necesarios y comprobar su funcionamiento. Luego, se desarrollan las herramientas de evaluación necesarias

enfocadas en dicho proceso y, posteriormente, se realiza un análisis de los modelos, utilizando un enfoque deductivo que permita llegar a conclusiones.

- Tipo de Datos: Se emplean dos tipos de datos: 1) datos observables basados en la evidencia de investigaciones anteriores, utilizados para generar modelos y proporcionar resultados numéricos, y 2) datos profundos, provenientes de generalizaciones o análisis respecto a los hallazgos presentados durante la fase explicativa de la investigación.

Diseño y tipo de investigación propuestos para el estudio

El diseño de la investigación en función del problema a resolver se plantea empleando una investigación mixta, debido a la característica de poder utilizar inicialmente técnicas cualitativas para evaluar fuentes referenciales y con esto, extraer datos cuantitativos necesarios, para luego, desarrollar modelos que representen la realidad y permitan la evaluación de la aplicabilidad de la técnica de pirólisis con datos cuantitativos.

Finalmente, el proceso cualitativo se retoma para permitir el generar información comparativa y extraer conclusiones con la información cuantitativa generada.

Se utiliza una modalidad secuencial simple para el diseño mixto, en donde se busca cumplir con los objetivos de la investigación, a través de la utilización de las ventajas que ambos tipos de investigación integran. La combinación cuantitativa-cualitativa es vital en esta investigación por los siguientes motivos: 1) permite garantizar que la información y datos con que se cuenta, son los adecuados para poder evaluar la aplicación de la técnica de pirólisis con los diferentes tipos de residuos. 2) Genera la posibilidad de aplicar el análisis numérico que el tipo cuantitativo brinda, cuando se cuenta con los datos numéricos para poderlo efectuar, de manera que se tenga la comprobación sobre la prefactibilidad de la utilización de las herramientas desarrolladas con datos numéricos que evidencien su aplicabilidad. 3) Brinda la posibilidad de hacer análisis referenciales y comparativos de casos típicos, que lleven a la generación de conclusiones válidas, lo que en esta investigación es de suma importancia, ante la imposibilidad de evaluar la aplicación de las herramientas a todo el universo de residuos

que se tienen en la ciudad de Guatemala. La aplicación del enfoque mixto se realiza en función de las etapas de investigación, de la siguiente forma:

- Etapa de Determinación de modelos: En este caso el enfoque mixto convergente, permite utilizar datos e información bibliográfica y tratarlos o depurarlos (empleando un enfoque cualitativo), además de poder integrar a este esfuerzo los datos generados previamente en el laboratorio para complementar con la información requerida para la parametrización de los modelos (integrando así el enfoque cualitativo). Esto lleva la obtención del set de datos requerido para poder desarrollar y evaluar las herramientas de prefactibilidad buscadas en la investigación.
- Etapa de Modelaje Técnico y Económico: En este caso el enfoque mixto secuencial se aplica en su parte cuantitativa, para permitir el desarrollo de los modelos y cuantitativamente determinar a través un análisis de varianza (Prueba F de correlación), su posible aplicación como herramienta de determinación de prefactibilidad.
- Etapa de Proceso Analítico: Finalmente, aplicando la parte cualitativa del enfoque mixto secuencial, se logra analizar comparativamente las herramientas desarrolladas, pudiendo validar cualitativamente sus aplicaciones con el estudio de los casos desarrollados para los diferentes tipos de residuos a tratar (con su análisis de varianza individual). Además, los resultados son interpretados cualitativamente de forma explicativa, para llegar a las conclusiones adecuadas sobre la aplicación de cada herramienta en los análisis de prefactibilidad.

3.2.2 Definición de métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos

Métodos de Investigación

Debido a las diferentes etapas de la investigación y a las necesidades de esta investigación, se utilizan métodos empíricos como: Métodos de consulta bibliográfica, que permite la generación de la información respecto a otros modelos o el soporte teórico, además de generar datos que permiten verificar la predictibilidad del modelo

con respecto a datos experimentales. Métodos experimentales, que se ha utilizado para generar datos que se utilizan dentro de la tesis doctoral como medio de comparación y validación de los modelos a la realidad de la ciudad de Guatemala. Estos métodos se desarrollaron en el Centro de Investigación de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala. Y método de estudio de casos, ya que se seleccionan casos a modo de representación de tratamientos escalados de residuos sólidos con la técnica estudiada y de esa forma comprobar el funcionamiento de los modelos o herramientas generados.

También se utilizan métodos teóricos desde el inicio de la investigación en la construcción del marco teórico referencial y generación de bases de datos, hasta llegar al proceso de interpretación y explicación de los datos generados. Se emplean en este trabajo: el método de modelación, que es fundamental para generar representaciones de la realidad que permitan el escalamiento y evaluación de los tratamientos planteados. Y el método inductivo-deductivo, que se emplea en la deducción de las razones por las que las herramientas desarrolladas muestran comportamientos o tendencias determinadas.

Técnicas e Instrumentos de la investigación

A partir de los métodos seleccionados y definidos, se presenta la fundamentación de las técnicas e instrumentos utilizados con su correspondencia con el método para el que se seleccionaron. El análisis se muestra a continuación:

Cuadro 6: Fundamentación de las Técnicas e Instrumentos seleccionados

Técnica	Instrumentos	Método Correspondiente
Revisión Documental	Guía de Revisión bibliográfica	Método de Consulta Bibliográfica
Fundamentación: Se seleccionó para poder contar con la información necesaria de bases de datos de investigaciones previas realizadas dentro o fuera de la institución donde se realizará la investigación.	Se utiliza una guía para poder revisar las diferentes fuentes de información (tanto primarias como secundarias) y de las mismas, obtener los resultados necesarios de composición, rendimientos y gastos energéticos.	

<p>Aplicación: Consulta de fuentes de investigación previa que permitan correlacionar los biocombustibles generados con la composición del residuo sólido a tratar.</p>	<p>Fichas Bibliográficas</p> <p>Instrumentos que permiten la clasificación y ordenamiento de la información extraída de la literatura.</p>	
	<p>Matrices de Análisis</p> <p>Se utilizan matrices con categorías generales de datos recopilados para poder integrar la información y organizarla</p>	
<p>Experimentación dirigida</p> <p>Fundamentación: Se seleccionó por haber sido ejecutada anteriormente dentro del centro de investigación, varias investigaciones experimentales, enfocadas en determinar características del proceso de pirólisis en función del tipo de residuo.</p> <p>Aplicación: Datos sobre rendimientos, cantidades y composiciones de productos obtenidos del tratamiento en función del tipo de residuo.</p>	<p>Guía de Experimentación (Metodología)</p> <p>Se desarrollaron guías para los experimentos realizados de pirólisis de diferentes tipos de residuos sólidos, las cuales referencian la forma estándar de realizar experimentos controlados.</p> <p>Análisis de Laboratorio</p> <p>Se utilizan para la determinación de propiedades y composiciones de los residuos y biocombustibles de las diferentes experimentaciones realizadas.</p>	<p>Método Experimental</p>
	<p>Matrices y gráficos de Análisis</p> <p>Se utilizan matrices con los resultados de los experimentos realizados en el centro donde se realiza la investigación, para poder integrar y organizar la información.</p>	
<p>Caso de estudio</p> <p>Fundamentación: Ante la imposibilidad técnica de poder analizar la composición del universo de residuos sólidos que se generan en Guatemala, se presentan casos de estudio de residuos representativos de las categorías generales de residuos identificadas teóricamente.</p> <p>Aplicación: Ejemplificación de casos representativos de un tipo de residuo y los resultados de la reacción.</p>	<p>Guía de elaboración de Caso</p> <p>Se utiliza una guía de elaboración de casos, para poder desarrollarlos con la misma información, enfocada en el posterior comparativo.</p> <p>Matrices y gráficos de Análisis</p> <p>Este instrumento integra la data en función de los diferentes tipos de residuos y los datos organizados de los combustibles obtenidos, incluyendo sus propiedades y parámetros de proceso.</p>	<p>Método de Estudios de Caso</p>

<p>Simulaciones</p> <p>Fundamentación: Con los datos empíricos obtenidos, se parametrizan modelos que permiten simular lo necesario para poder evaluar el proceso desde el punto de vista técnico y económico.</p> <p>Aplicación: Simulación de la composición de producto obtenidos, del progreso de la reacción con el tiempo o condiciones y del escalamiento industrial del proceso, que incluye la economía del mismo.</p>	<p>Simulación de obtención de biocombustibles</p> <p>Instrumento utilizado para predecir la composición y rendimiento de los biocombustibles producidos en función de la composición del residuo tratado.</p> <hr/> <p>Simulador de progreso de la reacción con Berkeley Madonna®</p> <p>Se emplea y desarrolla para poder predecir lo que se genera en la reacción en función del tiempo, logrando de esa forma determinar características operativas de los equipos que se utilizan en el tratamiento y condiciones del procesamiento.</p> <hr/> <p>Simulador de escalamiento de proceso con SuperPro Designer®</p> <p>Instrumento funcional para dimensionar los equipos necesarios en un proceso industrial y sus costos operativos e inversión necesaria. Es la base para la evaluación de la tecnología estudiada.</p>	<p>Método de Modelación</p>
<p>Inducción – Deducción</p> <p>Fundamentación: Estas técnicas teóricas permiten generar información para deducir los aspectos más importantes a considerar en un proceso industrial que utilice la tecnología de pirólisis.</p> <p>Aplicación: Basado en la inducción con los factores simulados, se generan cuadros con la información de las principales variables del proceso, para luego deducir las condiciones de un modelo de negocio que las afecten o se afecten positiva o negativamente por las mismas.</p>	<p>Gráficos de Análisis</p> <p>Instrumentos utilizados para poder clasificar y ordenar la información, además de depurarla. Permite generalizar hechos del fenómeno, para luego deducir posibles relaciones entre variables.</p> <hr/> <p>Matrices de indicadores técnicos y económicos</p> <p>Generados con el proceso analíticos/sintético, permiten la visualización de resultados de evaluación técnicos y económicos sobre la prefactibilidad del tratamiento estudiado.</p>	<p>Método Inductivo-Deductivo</p>

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3 Desarrollo de los instrumentos de obtención de datos

Partiendo de la definición de los instrumentos necesarios para la recopilación de datos y presentación de información, se utilizan los siguientes instrumentos ideados para las necesidades establecidas del tema de tesis doctoral:

Guía de Revisión bibliográfica

Para proceder con la revisión de fuentes bibliográficas, se realizó inicialmente una clasificación y calificación de las fuentes de donde se extrae la información. Con esto, se garantiza que las fuentes utilizadas cumplan con los requerimientos para proporcionar la información necesaria para el proyecto. El criterio de selección es: Utilizar los datos de la fuente mejor calificada. El criterio de eliminación es: Eliminar cualquier dato cuya fuente tenga una valoración menor a 3 en los aspectos evaluados. La evaluación se realiza de acuerdo con los criterios mostrados en el cuadro 7, evaluando los mismos de 1 a 5, donde el mayor puntaje significa una mejor calificación en el aspecto evaluado.

Cuadro 7: Registro de evaluación de Fuentes Bibliográficas

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia
Fuente 1	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5
Fuente 2	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5
Fuente 3	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5	Nota de 1-5

Fuente: Elaboración propia

De forma paralela al evaluar cada fuente bibliográfica encontrada con motores de búsqueda digital o herramientas para documentos físicos, se documentó: Nombre de los autores, Título de la fuente consultada, Nombre de la institución a que pertenecen los autores, Referencia APA de la fuente consultada. Además, se indagó sobre aspectos que no se conocieran de las fuentes consultadas, como la reputación de la institución y las publicaciones que los autores tienen en el campo, de manera que la ponderación contemplara la información necesaria para asegurar la evaluación de cada fuente.

Fichas Bibliográficas

Para documentar la información extraída de cada fuente, se utiliza el registro de los datos con fichas simples tabulares, que permiten llevar control de los datos encontrados, de acuerdo con la forma y con las necesidades encontradas para cada caso de la información extraída. Un ejemplo de ficha se muestra a continuación:

Cuadro 8: Ficha de extracción de datos bibliográficos

Fuente	Composición Química	Productos y rendimientos	Poder Calorífico	Modelo cinético	Parámetros cinéticos	Otros datos relevantes
Fuente 1						
Fuente 2						
Fuente 3						

Fuente: Elaboración propia.

Matrices de Análisis

Con base en la información recopilada, los cálculos y análisis efectuados, se desarrollaron matrices de análisis propias para cada dato a comparar o necesidades específicas de las herramientas a desarrollar, las mismas permiten el poder visualizar los datos obtenidos de forma comparativa y facilitan el análisis comparativo. Estos instrumentos se elaboran en función de lo utilizado comúnmente por fuentes consultadas, como el siguiente ejemplo:

Cuadro 9: Composición elemental de los residuos analizados por análisis proximal y de composición

Muestra	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Análisis Elemental (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fijo (%)	Cenizas (%)	Análisis Proximal (%)
Periódico	47.00	7.00	2.00	1.00	43.00	100.00	88.4	3.5	8.1	100.00
Cartón	48.00	8.00	2.00	1.00	41.00	100.00	87.5	6.6	5.9	100.00

Muestra	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Análisis Elemental (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fijo (%)	Cenizas (%)	Análisis Proximal (%)
Residuos de madera	49.52	5.81	0.31	0.02	44.34	100.00	84.9	15.0	0.1	100.00
HDPE	84.70	14.47	0.11	0.12	0.60	100.00	99.74	0.06	0.2	100.00

Fuente: (Ionescu y Bulmău, 2019).

Guía de Experimentación (Metodología)

Metodología para realizar pirólisis a escala laboratorio

Utilizando un reactor de acero inoxidable 304 DN 50, un kit de destilación VEVOR y una mufla Thermo Scientific F6030CM-33-AVL, armar un sistema como el de la Figura 15 para realizar las pruebas experimentales. Este arreglo permite calentar el material a altas temperaturas para lograr la reacción de pirólisis y cuantificar el producto líquido condensado y el gaseoso capturado o quemado.

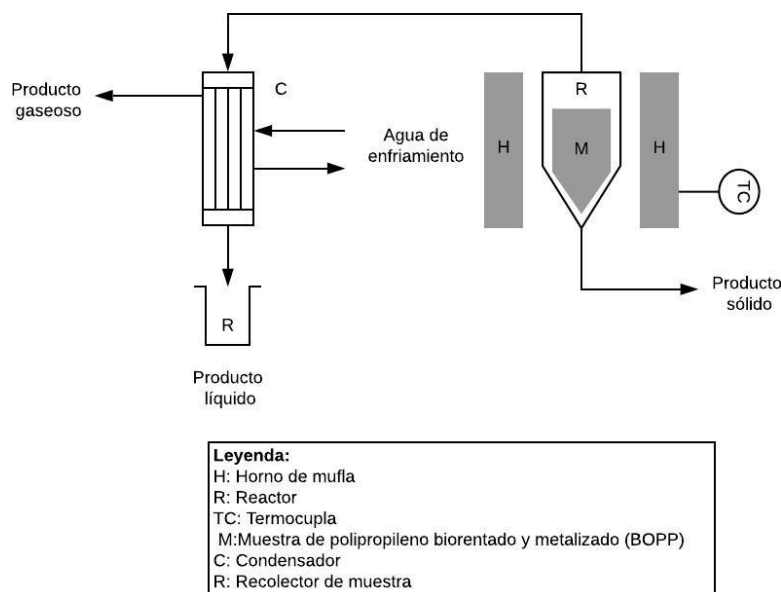
La progresión de temperaturas a utilizar depende de cada material, así como el modelo cinético que se proponga como puntos de partida. Se recomienda un modelo sigmoïdal de Boltzman para ajuste de las curvas de calentamiento y un modelo de pérdida de masa, que en muchos casos logra alta predictibilidad de la masa remanente en el reactor.

En cada corrida pesar la cantidad de muestra del material que cabe dentro del reactor, para aforarlo previo a la experimentación, luego encender los controles automáticos de enfriamiento y calentamientos de los equipos, que deben encontrarse calibrados y programados.

Habiendo calentado el sistema hasta la primera temperatura de degradación, proceder a recolectar el producto líquido a la salida del sistema de condensación y el producto gaseoso en la salida superior de dicho sistema. Para estudiar la formación del producto líquido en el tiempo, se recolectan las fracciones líquidas en rangos de tiempo

establecidos hasta agotar la producción de líquido a la temperatura definida en la rampa de temperaturas. Las muestras recolectadas son analizadas respecto a composición, densidad y viscosidad.

Figura 15: Esquema del sistema utilizado para pruebas experimentales



Fuente: (Fuentes & Núñez, 2022)

Análisis de parámetros cinéticos

El modelado cinético se realiza basado en el peso del producto líquido cuantificado y con una curva de calentamiento definida en base a la función sigmoïdal de Boltzman. Al terminar cada reacción, se cuantifica el producto sólido obtenido, que se encuentra remanente en el reactor. Con esto, se procede a la cuantificación de rendimientos de cada uno de los tres productos generados.

Al concluir la experimentación, utilizar el software Berkeley Madonna® de resolución de ecuaciones diferenciales para determinar el valor del triplete cinético: a) energía de activación (E_a), b) el factor de frecuencia (A) y c) el orden de reacción (n). También calcular los rendimientos porcentuales basados en la masa de los productos líquidos y

sólidos obtenidos. El producto gaseoso es determinado por diferencia de no ser por vías analíticas cuantificado.

Análisis de Laboratorio

Definición de la composición química

La composición de las muestras de los productos gaseosos, líquido y sólidos se analizan con cromatografía de gases de alta precisión, para determinar el o los compuestos predominantes. Dada la concentración del predominante se cuantifica la proporción presente en las muestras del resto de componentes y con respecto a la disminución de masa presente en el reactor, con lo que se puede calcular composiciones de manera instantánea. Esto es especialmente importante en la determinación o predicción de los resultados de la reacción y sus propiedades.

Guía de elaboración de Caso

La elaboración de los casos típicos de cada tipo de residuo, se realizan en función de la clasificación de residuos sólidos y su relevancia para Guatemala. De manera que, para cada categoría se escoge al menos un set de datos representativos de la categoría, para poder con los mismos definir los valores que permitan aplicar los diferentes tipos de herramientas y con ellas probar si son adecuadas para predecir el efecto del tipo de residuo. Para este efecto, el caso debe integrar: Propiedades del material, Cantidades porcentuales que se generan de residuos en Guatemala, Porcentaje de la categoría que representa, y Características que lo hacen representativo de la categoría

Simulación de obtención de biocombustibles, Simulador de progreso de la reacción y Simulador de escalamiento de proceso

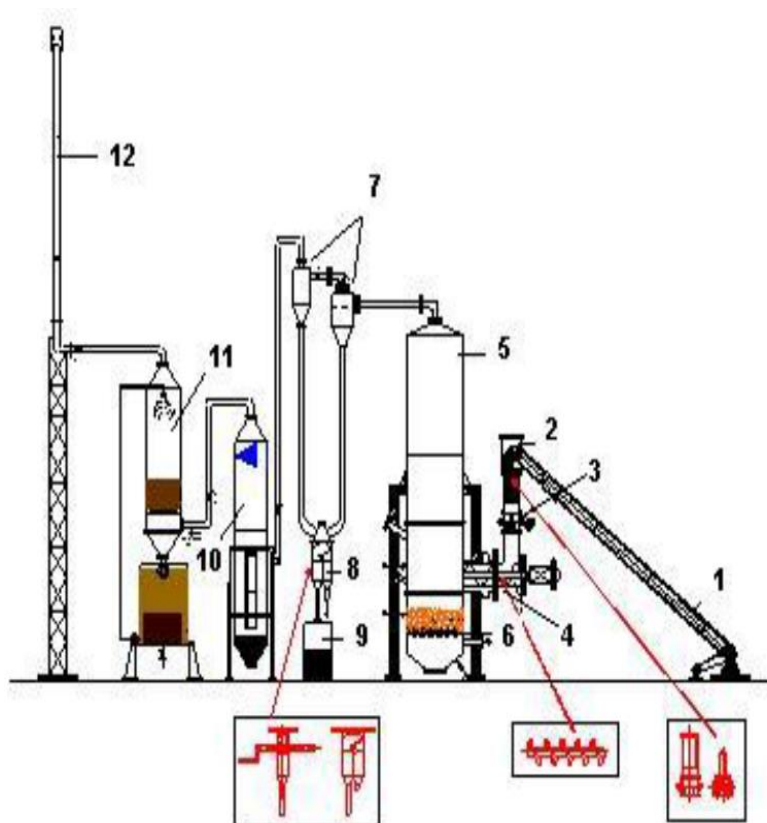
En función de los diferentes casos construido, de principios fisicoquímicos, reactivos, de escalamiento y cinéticos, se construye y parametriza el simulador en Berkeley Madonna® y SuperPro Designer®, que permiten evaluar la obtención de biocombustibles, pronosticando su rendimiento por cada fase, y su posible poder

calorífico, que permiten evaluar lo que pasa en un reactor con el tiempo y cuando se cambia de escala. Dichos simuladores se especifican como softwares que se proponen en la tesis doctoral, como parte de las herramientas para poder evaluar la prefactibilidad técnica y económica de un proyecto de pirólisis de cualquier residuo sólido.

Diagramas de proceso

Contando con los simuladores, los diferentes tipos de diagramas se desarrollan como otra de las herramientas a proponer como parte de la solución de la tesis doctoral. Estos diagramas tienen formas como las que se muestran en la Figura 16, pero que son desarrollados específicamente en función de los casos definidos a analizar con las herramientas de simulación en SuperPro Designer®.

Figura 16: Esquema de la planta de pirólisis rápida, Brasil (PPR-200)



Fuente: (Viltres y Alarcón, 2022).

Cuadros comparativos

Los instrumentos para presentar la analítica y deducciones de las herramientas utilizadas se desarrollan principalmente de forma comparativa en forma de cuadros o gráficos, que permiten la fácil visualización de los atributos de los diferentes resultados obtenidos. Estos cuadros se emplean como una herramienta propuesta (como la mostrada en la Cuadro 10), y como un instrumento para generar el análisis e interpretación.

Cuadro 10: Propiedades fisicoquímicas del Capín de Elefante y la paja de caña de azúcar

Propiedades	Unidades	Paja de caña de azúcar	Capín de Elefante
Composición elemental.			
(Libre de cenizas)			
C	% (m)	44,51 ± 0,51	43,16 ± 0,51
H	% (m)	5,47 ± 0,09	5,55 ± 0,08
N	% (m)	0,73 ± 0,06	1,78 ± 0,15
S	% (m)	< 0,15	< 0,15
O (por diferencia)	% (m)	49,29 ± 0,30	49,51 ± 0,50
Análisis inmediato			
Humedad	% (m)	11,98 ± 0,10	14 ± 0,12
Volátiles	% (m)	75,60±0,45	74,00 ± 0,5
Cenizas	% (m)	7,10 ± 0,15	11,00 ± 0,13
Carbono fijo	% (m)	19,30 ± 0,18	15,00 ± 0,14
Poder calórico superior	MJ kg ⁻¹	17,35 ± 0,42	16,8 ± 0,5
Composición química			
(Libre de cenizas y agua)			
Hemicelulosa y extractivos	% (m)	32,40	32,10
Celulosa	% (m)	45,10	40,30
Lignina	% (m)	22,50	27,60
Otras propiedades			
Densidad real de las partículas	kg m ⁻³	1 440 ± 20	1 468±7
Densidad aparente de las partículas	kg m ⁻³	535 ± 15	763 ± 14
Porosidad de las partículas	mm	0,63 ± 0,37	0,48 ± 0,01
Distribución del tamaño de partícula	mm	0,55<Dp<1,25	1,68<Dp<2,38

Fuente: (Viltres y Alarcón, 2022)

3.2.4 Determinación de la muestra y su criterio de selección

En función de las definiciones anteriormente realizadas, de las necesidades y objetivos del proyecto de investigación, y de lo establecido en el marco teórico referencial, se define la población y muestra con los siguientes aspectos:

Determinación de las características de la población

Para definir apropiadamente a la población, se presenta el siguiente cuadro sinóptico con la información de sus características:

Cuadro 11: Definición de la población

Definición de la Población	Tomando en cuenta que las herramientas desarrolladas se basan en su aplicación en la ciudad de Guatemala, y que el enfoque es para el tratamiento de residuos sólidos. Se define la población como la de los residuos sólidos que se generan en la ciudad de Guatemala.
Espacialidad	Se delimita únicamente a la población de los residuos sólidos generados en la ciudad de Guatemala.
Temporalidad	Corresponden a residuos que se generan en los años 2023 a 2025, sin embargo, se considera que la temporalidad no es un factor relevante para las herramientas a desarrollar, aunque si lo sea para la composición de la mezcla de residuos que se generan.
Homogeneidad	La mezcla es heterogénea y su composición depende del tiempo y espacialidad. Razón por la que se realiza un estudio por casos.
Universo Hipotético	Basado en la experiencia del autor y lo reportado por los autores que han publicado sobre el tema, se considera un universo hipotético de cerca de 1.1MT/año en la ciudad de Guatemala.
Universo Finito	De acuerdo con Kaza et al. (2018), en la ciudad de Guatemala se generan entre 1.4 y 2.5 kT/día.
Población blanco	Todos los residuos que se reciben en centros de acopio o tratamiento, para poder ser reciclados o descartados en vertederos.

Población accesible	La población accesible es la correspondiente a centros de acopio o de gestión de residuos que colaboran con el proyecto. Esto se delimita en 250 T/día. Aunque solamente se utilizará lo necesario para los análisis de laboratorio del muestreo selectivo experimental.
----------------------------	--

Fuente: Elaboración propia.

Definición de criterios de selección

Para determinar si un objeto o material pertenece a las poblaciones definidas, los criterios de selección de objetos que pertenecen a una población delimitada son:

- **Criterios de Inclusión:** Estos permiten definir las características que hacen una muestra parte de la población, que en este caso se deben pertenecer a alguna categoría de residuos sólidos, haber sido colectados en la ciudad de Guatemala, tener una naturaleza identificable, y poseer la capacidad para poder analizarse en los laboratorios disponibles.
- **Criterios de Exclusión:** Estos generan las características que hacen que una muestra deba excluirse de la población definida, en este caso se definieron como ser residuos que no sean sólidos, ser residuos no recolectados en la ciudad de Guatemala o fuera de los años 2023-2025, y ser residuos que no tengan una naturaleza identificable en los laboratorio disponibles para el estudio.
- **Criterios de Eliminación:** Estos criterios son características que provocarán la eliminación de una muestra obtenida del estudio, se definen como no poderse analizar en laboratorio disponible, ser residuos que sean multifase imposibilitando sus análisis, y ser residuos que no se conserven estables o puedan reaccionar de alguna forma, con lo que se genera imposibilidad de ser conservados o almacenados.

Con estos criterios se aseguró que el trabajo teórico y experimental se encuentran alineados hacia el mismo enfoque y que de existir algún tipo de discrepancias, serán factores que al analizarse, generan la posibilidad de obtener conclusiones válidas sobre las herramientas para evaluar la técnicas de pirólisis.

Determinación de las características necesarias del muestreo

De la misma forma que se realizó para la población, las muestras se seleccionan en función de características específicas y definidas de acuerdo con las necesidades del estudio y de características de estudios previos realizados en el campo, como los publicados por Viltres y Alarcón(2022), y Ionescu y Bulmău (2019). Estas características obedecen a la necesidad detectada y el enfoque en responder la pregunta de investigación. Las mismas se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 12: Definición de las muestras

Características base	Las muestras deben haberse tomado en la ciudad de Guatemala y ser de residuos sólidos de un centro de acopio o gestión de residuos para garantizar su integridad. Debe poderse separar en residuos individuales claramente identificables y deben poderse categorizar fácilmente.
Accesibilidad	Se delimita únicamente a muestras de centro de acopio o gestión de residuos en la ciudad de Guatemala que colaboran con la investigación.
Temporalidad	Corresponden a residuos que se generan y recolectan en los años 2023 a 2025.
Homogeneidad	Las muestras utilizadas deben ser homogéneas en composición, para poder analizar la pirólisis y cómo afecta un único tipo de residuo, además de poder comparar y generalizar resultados.

Fuente: Elaboración propia.

Derivado del tipo de estudio y sus objetivos, la técnica de muestreo utilizada es no probabilística de tipo intencional, ya que esta técnica permite seleccionar las muestras de casos característicos de una población o de categorías que representan lo que se busca evidenciar o probar en el estudio. Con esto, se asegura que los residuos analizados cumplen con los criterios para poder probar las herramientas desarrolladas en las diferentes categorías de residuos sólidos que se clasifican, y se cuenta con una aprobación de su aplicabilidad dentro del marco del estudio y las necesidades definidas para la investigación.

3.3 Trabajo de Campo

Para poder cumplir con los objetivos planteados y realizar el trabajo de campo requerido en la temporalidad necesaria, se desarrolló el cronograma que se muestra abajo y que incluye las actividades principales desarrolladas durante el proceso investigativo.

Cuadro 13: Cronograma General de Actividades

No.	Actividad	Correlación/ Dependencia	2024						2025				
			Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	
1	Recopilación de datos bibliográficos	Inicio de trabajo de campo	■	■									
2	Recopilación de datos de laboratorio	Inicio de trabajo de campo	■	■									
3	Depuración y análisis de datos	1 y 2			■								
4	Formulación de herramientas	1 y 2			■	■							
5	Simulaciones	3 y 4				■							
6	Generación de casos de estudio	1 y 2			■	■	■						
7	Comparativos Técnicos	4 y 5					■	■					
8	Comparativos Económicos	7						■	■				
9	Validación de Herramientas	6, 7 y 8							■	■			
10	Generación de resportes y Defensa de Tesis	9									■	■	

Fuente: Elaboración propia.

El detalle de las actividades incluye lo siguiente:

- **Recopilación de datos bibliográficos:** Para empezar con el trabajo de campo se utilizaron motores de búsqueda (Safari y Google Scholar), que permitieron encontrar libros y artículos pertinentes a los datos necesarios sobre las propiedades de diferentes categorías de residuos sólidos y los productos que se obtienen de la reacción de pirólisis, así como también los datos de modelos cinéticos que describan el progreso de la reacción. Estos datos fueron organizados en una base de datos para ser procesados posteriormente.
- **Recopilación de datos de Laboratorio:** Utilizando las instalaciones, equipos y reactivos del Centro de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala, se procedió a recopilar datos de residuos sólidos representativos de algunas de las categorías para las que se recopiló información referencial. Estos

datos de propiedades y características de los residuos, así como los resultados obtenidos al someterlos a la reacción de pirólisis y sus tiempos de reacción, fueron registrados en una base de datos empleada posteriormente para analizar casos en la ciudad de Guatemala.

- **Depuración y Análisis de datos:** En función de las valoraciones realizadas con las matrices comparativas desarrolladas de la información obtenida, se procedió a depurar los datos, descartando aquellos cuyo índice combinado tuviese menores valores. Para esto, se realizó una prueba piloto inicial con datos de la categoría de residuos alimenticios y de jardín, que se validó con pares con conocimiento y experiencia en el campo de estudio.
- **Formulación de herramientas:** Partiendo de la teoría establecida en el marco teórico y conceptual se generaron propuestas específicas de herramientas basadas en modelaje que permitieron a través de un proceso de ajuste matemático y teórico, el poder predecir el comportamiento de la reacción, su escalamiento o los productos obtenidos con la misma. Las herramientas consisten en conjuntos de ecuaciones y esquemas lógicos de proceso, que permiten simular.
- **Simulaciones:** Se emplearon los software Microsoft Excel®, Berkeley Madonna® y SuperPro Designer® debido a la accesibilidad y propiedades para poder simular el comportamiento de las reacciones de las diferentes categorías de residuos analizados. Con esto se consiguió parametrizar los siguientes tipos de modelos y comprobar su predictibilidad: 1) Modelos multivariable de predicción de resultados de la reacción, 2) modelos cinéticos de progreso de la reacción, 3) modelos de plantas industriales a diferentes escalas, 4) modelos de flujo de caja.
- **Generación de casos de estudio:** Utilizando datos referenciales y de laboratorio, se utilizaron datos de propiedades y rendimientos de productos o de progreso de la reacción, para comprobar el ajuste de los modelos simulados a los datos reales que se obtienen para la ciudad de Guatemala, con lo que fue posible posteriormente la validación. Estos casos de estudio se describen específicamente en las siguientes secciones y fueron cuidadosamente seleccionados para contar con tipos de residuos diversos, donde el residuos

tuviese una composición homogénea y comparable con categorías específicas de residuos de la base de datos.

- **Comparativos Técnicos:** Se desarrollaron en función de las simulaciones y de los casos de estudio, los comparativos técnicos que permitieron establecer las diferencias y establecer los porcentajes de error de cada modelo con respecto a las bases de datos referencial y experimental. Con esto se pudo validar las herramientas y su potencial aplicación para determinación de la viabilidad técnica en la ciudad de Guatemala.
- **Comparativos Económicos:** Con las simulaciones basadas en flujo de caja se desarrollaron escenarios comparativos, donde fue posible establecer los efectos del modelo de negocio en los resultados de los indicadores económicos definidos con la simulación. Además, se desarrollaron comparativos con casos reportados en la literatura sobre el potencial económico de la aplicación de la técnica, lo que permitió asegurar la confiabilidad de la simulación.
- **Validación de Herramientas:** Utilizando los comparativos y los indicadores de porcentaje de error/exactitud y coeficiente de correlación, se validaron las herramientas desarrolladas, considerando errores menores al 5% para la parte técnica y tolerando hasta el 10% para la parte económica, derivado de la variabilidad asociada a la ubicación.
- **Generación de Informe Final:** Con toda la información generada se redactó el informe final propio de la comunicación de la investigación y se presentó para revisión y aprobación.

3.3.1 Aplicación de los instrumentos

Al aplicar los instrumentos diseñados para la investigación durante el trabajo de campo, en general fue posible encontrar una gama amplia de datos, que requirieron una depuración instantánea de la información basado en los criterios de selección previamente establecidos. Esto especialmente importante, dado que se encontraron más fuentes de las esperadas para la obtención de la información referencial base del estudio y debió procesarse la información empleando los instrumento seleccionados.

Por otro lado, los instrumentos de comparación fueron rediseñados y configurados en función de los datos que se encontraron y de las simulaciones realizadas, razón por la que la apariencia de los gráficos y comparativos cambió en dependencia de las necesidades detectadas para presentar la información encontrada de la mejor forma posible. A pesar de esto, se mantuvo siempre la coherencia de lo que se buscaba expresar en todas las etapas de la investigación.

En el caso de los simuladores y su parametrización, se encontró que requieren de un profundo entendimiento técnico, que el autor ha podido desarrollar durante la experiencia profesional. Sin embargo, si se busca emplear los software y ecuaciones desde un punto de partida básico, es necesario el leer los manuales y ver tutoriales de estos, así como emplear referencias que expliquen la mejor forma para desarrollar cada tipo de modelo.

Para el ajuste y parametrización de los modelos se emplearon las herramientas de ajuste asociadas a Runge-Kutta 4, que permiten una alta certeza en la aproximación numérica. Sin embargo, se exploraron otras opciones que generaron resultados menos y exactos y fueron descartadas durante la ejecución, conservando el enfoque requerido del estudio.

En la fase inicial de recopilación de información referencial, y para poder generar una base de datos confiable y que permita el análisis de composición de materiales, se realizó una prueba piloto con el formato de evaluación de referencias, desarrollado para tener una calificación ponderada de 1 a 5 (siendo 1 la calificación más baja y 5 las más alta respecto a cada aspecto evaluado) de los factores considerados como relevantes la confiabilidad de la información. Los aspectos evaluados fueron: Confiabilidad de la información presentada, Relevancia de la información, Reputación de los autores o institución publicada, Autoridad de los autores consultados, Metodología adecuada a los datos presentados, y Pertinencia de los datos encontrados.

Para hacer este piloto se utilizaron fuentes referenciales buscadas de los residuos alimenticios y de jardín, que presentaron en la búsqueda información de las propiedades y composición de dicha clasificación de residuos. El piloto consistió en aplicar la

evaluación a tres referencias y luego verificar si esta evaluación permitía la ponderación de la mejor opción (Resaltada en el cuadro de la evaluación) de acuerdo con la opinión del autor y de pares revisores que trabajan en el campo. Al aplicar el instrumento, se obtuvo los datos que se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 14: Prueba piloto de la aplicación del instrumento de evaluación de fuentes referenciales, que muestra la media obtenida de los resultados de los pares consultados

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
García-García et al. (2017)	5	5	4	4	4	4	4.33	Los autores dominan el tema, aunque no tienen toda la información buscada.
Hart et al. (2022)	5	5	5	5	4	4	4.67	Datos adecuados a las necesidades, pero con metodología no 100% declarada. Solo tiene datos parciales.
Tanimu et al. (2014)	5	3	4	4	4	3	3.83	Reporta datos parciales útiles en el estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Los expertos consultados coincidieron en la fuente que el instrumento seleccionaba como la de mejor promedio y por lo tanto la mejor para extraer información, además de coincidir también en la fuente de menor utilidad. Todo esto con un error menor al 12.5% en general, y variabilidad menor al 5%. Los expertos consultados para este efecto son: 1) MSc. Gamaliel Zambrano (Director del Centro de Investigaciones de procesos industriales de la Universidad del Valle de Guatemala, 2) MA. José Andrés Lam (Investigador y catedrático de la Universidad del Valle de Guatemala, y 3) Inga. Carmen Ortiz (Catedrática del departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala).

3.3.2 Procesamiento de la información

El procesamiento de la información en la investigación realizada partió de una secuencia ordenada para poder llegar a la propuesta y validación de las herramientas desarrolladas para la evaluación de viabilidad técnica y económica de la aplicación de la técnica. El procesamiento partió de la recopilación de datos experimentales, donde se realizó un procesamiento inmediato basado en criterios de selección, para posteriormente ser evaluadas las fuentes, con lo que se obtuvo los rangos o datos representativos de las propiedades, características y cinéticas buscadas, las cuales fueron tabuladas para ser reportadas y brindan una base de datos con potencial aplicación en otros proyectos con diferente enfoque, pero que analicen los residuos sólidos.

Luego de esto, se procesaron cuatro diferentes tipos de residuos representativos en los equipos del Centros de Procesos Industriales de la Universidad del Valle de Guatemala, generando datos sobre las propiedades y progreso de la reacción. Al tener varias corridas, los mismos debieron tratarse estadísticamente para presentar únicamente el promedio de lo obtenido a las condiciones ambiente de la ciudad de Guatemala (Temperatura promedio de 27°C y 1500m de altitud sobre el nivel del mar).

Con esta información y los datos reportados en el marco teórico y conceptual, fue posible generar modelos multivariable de predicción de los productos de la reacción en función del tipo de residuo, los cuales fueron presentados en forma de ecuaciones para su potencial aplicación en otras investigaciones o determinaciones. De la misma formas se procesaron los datos referenciales de los modelos cinéticos y de plantas químicas, generando la posibilidad de presentar los modelos con ecuaciones y diagramas, además de sus parámetros base. Esto permite generar puntos de partida para la utilización de otros simuladores y otros estudios en el mismo campo.

Los datos referenciales de casos experimentales y datos de casos reales, fueron procesados, tabulados y presentados de forma comparativo, lo que permitió valorar la validez de las herramientas generadas. Y los modelos económicos fueron comparados de la misma forma empleando indicadores de rentabilidad que son comunes a la evaluación

de proyectos y permiten comparaciones rápidas y efectivas con otras posibilidades de inversión. La narrativa que se muestra en las siguientes secciones, muestra de forma progresiva la obtención y procesamiento a mayor detalle.

3.4 Análisis de los resultados en los datos obtenidos

3.4.1 Categorización de Residuos de la ciudad de Guatemala

Ante la ausencia de datos referenciales de diferentes fuentes, se optó por datos del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de Guatemala, lo cuales se generaron a partir de la información de clasificación presentada en (MARN, 2021c) y con la información de las municipalidades de diferentes ubicaciones de Guatemala. Desafortunadamente no fue posible contar con algún estudio de la ciudad de Guatemala, por lo que se optó por generar un promedio de las zonas identificadas como urbanas y partir de dicha clasificación generar los datos porcentuales de la categorización. Los datos referenciados de clasificación se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 15: Categorización de residuos en Guatemala de acuerdo con la Guía para elaborar estudios de caracterización de residuos sólidos comunes

ORGÁNICO	DESECHOS SANITARIOS
Residuos de alimentos	Papel sanitario
Residuos de jardinería	Pañal desechable
Hueso	PELIGROSOS
PAPEL Y CARTÓN	Pilas alcalinas
Papel	Pilas de litio
Cartón	Pilas de mercurio
Envase de cartón encerado	Pilas recargables
PLÁSTICO	Baterías y acumuladores
Película	Aceites y lubricantes
Rígido	Focos incandescentes
PET	Focos ahorradores
Poliuretano	Lámparas fluorescentes
Poliestireno expandido	Pinturas y solventes

VIDRIO	Insecticidas y Productos de limpieza
Vidrio de color	Medicamentos caducos
Vidrio transparente	Jeringas, lancetas, rastrillos
MATERIAL FERROSO	Gasas y algodones con restos de sangre
Material ferroso	Material de diálisis
Lata	Termómetros
MATERIAL NO FERROSO	ESPECIALES
Material no ferroso	Electrodomésticas
Lata de aluminio	Residuos tecnológicos (computadoras, celulares, etc.)
	Material de construcción
	VARIOS
	Loza y cerámica
	Madera
	Hule
	Tetrapak
	Cuero
	Algodón
	Trapo
	Fibra dura vegetal (esclerenquima)
	Fibras sintéticas
	Residuos finos (que pasen la criba M 2.00)

Fuente: Elaboración propia con base en (MARN, 2021c).

A partir de esta clasificación, se generaron los datos promedio de la base de datos del MARN (2021), que se procesaron para obtener el detalle porcentual de la composición buscado y se colocaron de manera gráfica en el siguiente cuadro y Figura:

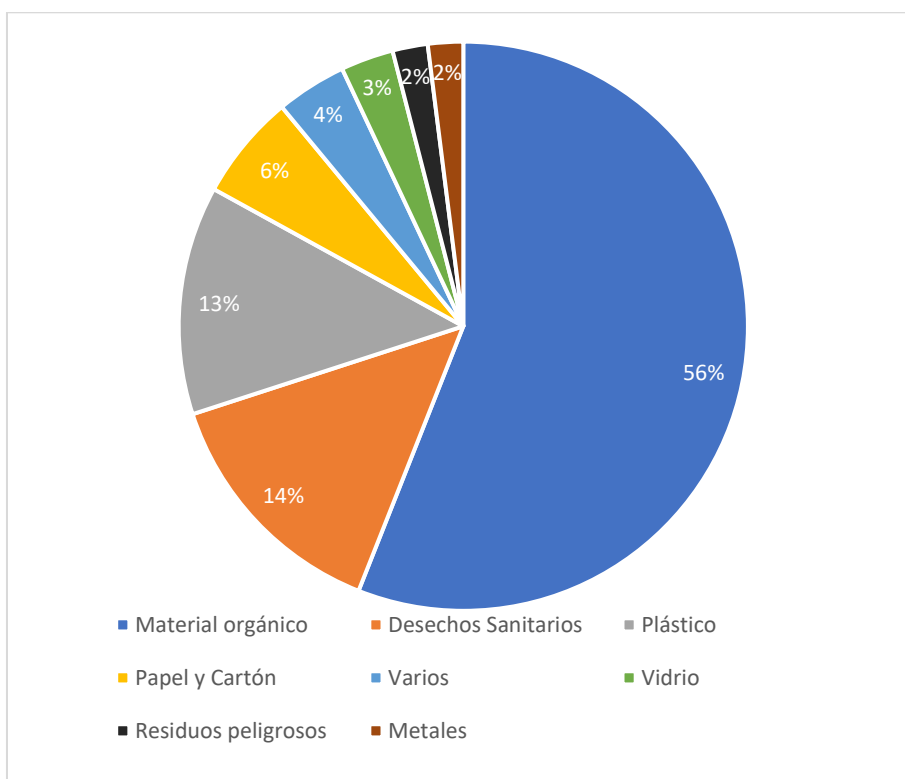
Cuadro 16: Promedio de la composición de residuos urbanos de los estudios de caracterización reportados al MARN

Material orgánico	56%
Desechos Sanitarios	14%
Plástico	13%
Papel y Cartón	6%
Varios	4%

Vidrio	3%
Residuos peligrosos	2%
Metales	2%

Fuente: Elaboración propia con base en MARN (2021).

Figura 17: Grafica de pie del promedio de la composición de residuos urbanos de los estudios de caracterización del MARN



Fuente: Elaboración propia con base en MARN (2021).

En estos resultados, se muestra que la mayor parte de los residuos sólidos generados en la ciudad de Guatemala tienen una composición normalmente llamada “orgánica”, mientras que son fracciones menores las que representan residuos especiales o con necesidades de tratamiento específicas.

Partiendo de esta clasificación y en función de las características fisicoquímicas relevantes (que se muestran en las subsecciones posteriores), dentro de las que destaca su composición elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, que

químicamente son los elementos más reportados como más impactantes en la obtención de productos con la técnicas estudiada, y por lo tanto, son relevantes en establecer la posibilidad de reacción, se obtiene la posibilidad de tratamiento con la técnica de pirólisis de forma analítica, lo cual se resume en el siguiente cuadro:

Cuadro 17: Potencial técnico de tratamiento del tipo de residuos estudiado con la técnica de pirólisis

Tipo de Material	Posibilidad Técnica de tratamiento con Pirólisis
Material orgánico	Alta posibilidad técnica, limitada por la humedad
Desechos Sanitarios	Alta posibilidad técnica, limitada por la humedad
Plástico	Alta posibilidad técnica
Papel y Cartón	Alta posibilidad técnica
Varios	Posibilidad baja, necesita clasificación intensiva para hacerlo factible
Vidrio	No tiene posibilidad de tratamiento con esta técnica
Residuos peligrosos	No tiene posibilidad de tratamiento con esta técnica
Metales	No tiene posibilidad de tratamiento con esta técnica

Fuente: Elaboración propia con base en las propiedades de residuos estudiados.

De esto se evidencia que las 4 mayores categorías de residuos sólidos encontradas en la ciudad de Guatemala tienen el potencial de ser tratadas con la técnica propuesta, representando una posibilidad de tratar al menos el 89% de los residuos sólidos generados, siempre que las limitantes de los mismos sean atendidas.

3.4.2 Evaluación de Fuentes referenciales de propiedades y composición de residuos sólidos

Partiendo de la prueba piloto del instrumento de evaluación de publicaciones, se procedió a la aplicación de la evaluación de todas las fuentes encontradas para la determinación de composiciones y otras propiedades de cada una de las categorías de materiales definidas. Al hacer esto, se seleccionaron con base en la ponderación

encontrada, los datos que la fuente proporcionaba y su potencial aplicabilidad, los cuadros resumen por categoría de residuos sólidos y se ejemplifican con los datos de residuos alimenticios y de jardinería que se muestra a continuación:

Cuadro 18: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos alimenticios y jardinería

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Edjabou et al. (2015)	4	5	4	4	2	4	3.83	No se tiene total claridad de la metodología utilizada
García-García et al. (2017)	5	5	4	4	4	4	4.33	Los autores dominan el tema, aunque no tienen toda la información buscada.
Hart et al. (2022)	5	5	5	5	4	4	4.67	Datos adecuados a las necesidades, pero con metodología no 100% declarada. Solo tiene datos parciales.
Parmar (2017)	4	4	4	3	4	4	3.83	El autor tiene datos importantes, pero no para todos los materiales.
Raw (2012)	5	5	5	5	4	5	4.83	Datos muy adecuados a las necesidades, pero con metodología no 100% declarada.
Tanimu et al. (2014)	5	3	4	4	4	3	3.83	Reporta datos parciales útiles en el estudio.

Fuente: Elaboración propia. Categorización de residuos de acuerdo con (MARN, 2021c).

Consultar el resto de las evaluaciones realizadas para las otras categorías de residuos en la sección de Anexos, que fueron elaborados con la misma técnica y generaron la certeza sobre la extracción de datos con las características necesarias para ser empleadas en el estudio.

3.4.3 Evaluación de Fuentes referenciales de proporciones de productos de pirólisis y sus propiedades

De manera análoga a la evaluación de fuentes referenciales de las propiedades de los residuos sólidos, se buscaron fuentes para obtener los datos de rendimientos de los productos de la reacción de pirólisis que se generan en el tratamiento de los diferentes tipos de residuos, así como las propiedades de cada uno de los productos generados. Como se ha profundizado en el marco teórico referencial, la reacción genera 3 principales tipos de productos: un producto sólido o carbón, un producto líquido o alquitrán, y un producto gaseoso. De estos productos, la principal propiedad determinante para la potencial aplicación de cada biocombustible es el poder calorífico. Por lo tanto, se buscaron bases de información para estos datos y se evaluaron empleando la misma técnica validada anteriormente. Los datos de las evaluaciones de las fuentes encontradas para los residuos alimenticios y jardín, se ejemplifican en el siguiente cuadro (Ver el detalle de todas las evaluaciones en los Anexos):

Cuadro 19: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos alimenticios y de jardinería

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Boateng et al. (2007)	4	4	4	4	5	3	4.00	Tiene datos solamente de uno de los residuos analizado.
Bridgewater (2012)	5	4	5	4	4	4	4.33	Tiene algunos detalles técnicos no explícitos en la metodología.
Demirbas (2009)	5	5	5	5	5	5	5.00	Es una fuente recomendada por la trayectoria del autor.
Demirbas (2007)	5	4	5	5	5	4	4.67	La información presentada no tiene todas las

								propiedades buscadas.
Mohan et al. (2006)	5	4	5	4	4	4	4.33	Presenta datos relevantes para el estudio.
Tripathi et al. (2016)	4	4	4	4	3	3	3.67	Presenta limitantes de la metodología respecto del detalle técnico presentado.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Propiedades Fisicoquímicas referenciales de las clasificaciones de residuos estudiadas

A partir de la revisión bibliográfica realizada y luego de la depuración de datos y fuentes consultadas con la evaluación de las fuentes, se obtuvo los datos de composición química y de propiedades físicas, químicas y mecánicas de los tipos de residuos analizados de acuerdo con la clasificación de MARN (2021c). Estos datos se muestran de forma tabular en los siguientes cuadros:

Composición Elemental y Proximal

Cuadro 20: Composición elemental y proximal resumida de los residuos Alimenticios, de jardín y hueso

Elemento	Composición en Residuos de Jardín (% m/m)	Composición en Residuos Alimenticios (% m/m)	Composición en Residuos de Hueso (% m/m)
Carbono (C)	40–50%	40–60%	30–40%
Nitrógeno (N)	0.5–4%	1–6%	1–2%
Hidrógeno (H)	5–6%	5–10%	3–5%
Oxígeno (O)	35–45%	30–45%	40–50%
Azufre (S)	0.05–0.3%	0.1–0.5%	0.1–1%
Metales	0.5–2%	0.5–2%	2–10%

- Calcio (Ca)	0.2–1.5%	0.05–1.0%	30–40%
- Magnesio (Mg)	0.1–0.5%	0.02–0.2%	0.5–1%
- Potasio (K)	0.5–2%	0.01–0.1%	0.02–0.1%
- Hierro (Fe)	0.01–0.05%	0.2–1.0%	0.01–0.05%
- Zinc (Zn)	0.005–0.03%	0.001–0.03%	0.01–0.05%
Carbohidratos	40–60%	50–70%	1–5%
Proteínas	2–5%	5–15%	10–25%
Lípidos	0.5–3%	5–25%	1–5%
Contenido de Agua	30–80%	10–60%	10–20%

Fuente: Hart et al. (2022) y Raw (2012).

Resalta del cuadro anterior en la composición elemental, la considerable proporción de oxígeno presente en los diferentes residuos alimenticios y de jardín, que va de 30 a 50% y el amplio rango de contenido de agua que este tipo de residuos pueden llevar al proceso al ser tratados con la reacción de pirólisis.

Cuadro 21: Composición elemental y proximal resumida de los residuos de papel y cartón

Elemento	Composición en Residuos de Papel (% m/m)	Composición en Residuos de Cartón (% m/m)
Carbono (C)	40–50%	40–50%
Nitrógeno (N)	0.1–0.5%	0.1–0.5%
Hidrógeno (H)	5–7%	5–7%
Azufre (S)	0.1–1%	0.1–0.5%
Oxígeno (O)	40–45%	40–45%
Metales	0.5–5%	0.5–5%
- Calcio (Ca)	1–3%	1–3%
- Magnesio (Mg)	0.1–0.5%	0.1–0.5%
- Hierro (Fe)	0.01–0.1%	0.01–0.1%
- Aluminio (Al)	0.1–0.5%	0.1–0.5%
- Silicio (Si)	0.1–0.5%	0.1–0.5%
Carbohidratos	40–60%	60–70%
Proteínas	0.5–1%	0.5–1.5%

Lípidos	0.1–0.5%	0.1–0.5%
Contenido de Agua	5–20%	8–12%

Fuente: Gupta et al. (2009), Ozola et al. (2019) y Weißenbach et al. (2019).

De la misma forma que en el caso de los residuos de jardín y alimenticios, los residuos de papel y cartón presentan contenido de oxígeno que supera el 40%, pero en este caso, el contenido de agua se encuentra más controlado, teniendo 20% como máximo del rango del agua que estos residuos pueden contener

Cuadro 22: Composición elemental resumida de los residuos de plástico

Componente	Tipo de Plástico						
	HDPE	LDPE	PP	PET	PVC	Poliuretano	Poliestireno
Carbono (C) [%]	85–87	85–87	85–87	62–63	38–40	57–61	92–93
Hidrógeno (H) [%]	13–15	13–15	13–15	4–5	4–5	6–7	7–8
Oxígeno (O) [%]	<1	<1	<1	33–34	<1	29–32	<1
Nitrógeno (N) [%]	<1	<1	<1	<1	<1	6–10	<1
Azufre (S) [%]	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Cloro (Cl) [%]	<1	<1	<1	<1	56–58	<1	<1
Metales [ppm]	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50

Fuente: Al-Salem et al. (2009), Ashby et al. (2018), Pielichowski et al. (2022) y Shea (2006).

En el caso de los residuos de plástico se observa una tendencia de algunos residuos a contener mayores porcentajes de carbono que los residuos de papel, cartón, alimentos y jardín, además de no reportar contenido de agua, por considerarlo nulo de acuerdo con Pielichowski et al. (2022). En este tipos de residuos, la clasificación en dependencia de la familia de moléculas que integra el material está relacionado directamente con la composición elemental, lo cual nuevamente tiene un impacto determinante en el tratamiento con una técnicas de degradación térmica, como lo es una reacción de pirólisis en condiciones controladas.

Cuadro 23: Composición elemental resumida de los residuos de vidrio y metal

Componente	Vidrio	Aluminio	Acero	Cobre	Latón	Estaño
Carbono (C) [%]	<0.1	<0.1	0.05–2	<0.1	<0.1	<0.1
Nitrógeno (N) [%]	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Hidrógeno (H) [%]	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Oxígeno (O) [%]	47–50	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Azufre (S) [%]	<0.1	<0.1	0.01–0.05	<0.1	<0.1	<0.1
Silicio (Si) [%]	20–30	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Metales [%]	<1 (trazas de Na, Ca, K)	99–100	98–99 (Fe, Mn, Cr, Ni)	99–100	60–70 (Cu, Zn)	99–100

Fuente: McLellan (1984) y Moosbrugger et al. (2003).

Del cuadro anterior, se observa como los residuos de vidrio y metal poseen concentraciones bajas de carbono e hidrógeno en comparación con otros tipos de residuos previamente mostrados. A pesar de no reportar contenidos de agua considerables, esta característica les confiere un bajo potencial de poder ser tratados con la técnica de pirólisis, como se analizó anteriormente, puesto que al elevar la temperatura, estos residuos no generarán una degradación termoquímica en el rango de temperaturas que la pirólisis utiliza.

Cuadro 24: Composición elemental y proximal resumida de los residuos sanitarios

Componente	Residuos de Papel Higiénico	Residuos de Pañales
Carbono (C) [%]	40–50	40–45
Nitrógeno (N) [%]	<1	1–2
Hidrógeno (H) [%]	5–6	6–7
Azufre (S) [%]	<1	<1
Oxígeno (O) [%]	40–45	30–40
Metales [ppm]	<10	10–50
Contenido de agua [%]	5–10	50–70
Materia orgánica [%]	85–95	60–70

Fuente: Lambert et al. (2013) y Luchese et al. (2021).

Del cuadro anterior puede observarse una tendencia parecida de los residuos sanitarios a la que presentan el papel y el cartón, pero con la diferencia que el contenido de agua puede ser más alto debido al tipo de residuo del que se trata. El resto de la composición tiende a ser comparable con el papel y cartón.

Cuadro 25: Composición elemental y proximal resumida de los residuos varios estudiados

Componente	Residuos de Cerámica	Residuos de Madera	Residuos de Hule	Residuos de Cuero	Residuos de Algodón	Residuos de Fibras
Carbono (C) [%]	<1	40–50	50–60	50–60	40–50	30–40
Nitrógeno (N) [%]	<1	<1	<1	10–15	<1	1–5
Hidrógeno (H) [%]	<1	5–6	7–8	6–7	5–6	5–6
Azufre (S) [%]	<1	<1	0.5–1	1–2	<1	<1
Oxígeno (O) [%]	<1	40–50	20–30	10–15	40–50	50–60
Metales [ppm]	10–50	<10	10–50	50–100	<10	10–20
Contenido de agua [%]	<1	10–15	1–5	5–10	5–10	5–10
Materia orgánica [%]	<1	85–95	90–95	85–90	95–98	80–90

Fuente: Calister et al. (2020), Chen et al. (2008) y Ferrerira et al. (2011).

La tendencia de la clasificación de residuos “varios” posee una alta variabilidad, conteniendo desde residuos con bajo potencial para ser tratados con la reacción de pirólisis, hasta residuos con altos porcentajes de carbono en comparación con otras categorías. De manera, que acá el potencial es variable en dependencia del tipo de residuo.

Cuadro 26: Composición elemental y proximal resumida de los residuos peligrosos estudiados

Componente	Residuos de Baterías	Residuos de Aceites	Residuos de Lámparas	Residuos de Recubrimientos
Carbono (C) [%]	5–10	70–85	<1	20–30
Nitrógeno (N) [%]	<1	<1	<1	5–10
Hidrógeno (H) [%]	0.5–1	10–15	<1	2–5
Azufre (S) [%]	0.5–2	0.1–1	<1	0.5–1
Oxígeno (O) [%]	10–15	5–10	<1	20–30

Metales [ppm]	50,000–200,000	10–50	100–500	1,000–5,000
Contenido de agua [%]	5–10	<1	1–5	5–10
Materia orgánica [%]	10–20	90–95	<1	50–60

Fuente: Lu et al. (2013) y Viktoryová et al. (2022).

Los residuos peligrosos tienen concentraciones bajas de carbono, lo que hace que a excepción de los aceites o los recubrimientos, se clasifiquen dentro de un bajo potencial para poder ser tratados con la técnica. Esto no significa que la técnica no podrá aplicarse, sino que los productos obtenidos tendrán propiedades que harán menos factible su aplicación como biocombustibles.

Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas

De la misma forma que con la composición elemental, las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los diferentes tipos de residuos se extrajeron de la literatura de forma referencial. Estas propiedades de los residuos alimenticios, de jardín y hueso se presentan como ejemplo en el siguiente cuadro (ver en el Anexo las propiedades del resto de los tipos de residuos):

Cuadro 27: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos Alimenticios, de jardín y hueso

Tipo de Propiedad	Parámetro	Valores Típicos para residuos Alimenticios	Valores Típicos para residuos de Jardín	Valores Típicos para residuos de hueso
Físicas	Contenido de Humedad	10–60%	30–80%	5–20%
	Densidad Aparente	400–800 kg/m ³	100–500 kg/m ³	1.2–2.0 g/cm ³
	Tamaño de Partícula	0.5–50 mm	0.5–50 mm	50–500 μm
	Conductividad Térmica	0.2–0.5 W/m·K	0.2–0.4 W/m·K	0.2–0.4 W/m·K
Químicas	pH	4.5–7.0	5.0–7.0	6–8
	Contenido de Materia Orgánica	80–95%	50–95%	40–65%

	Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)	10–30	20–30	20–40
	Contenido de Cenizas	1–10%	1–10%	1–5%
Mecánicas	Compresibilidad	20–50%	10–40%	10–40%
	Resistencia al Corte	10–30 kPa	10–30 kPa	5–20 MPa
	Ángulo de Fricción	30–50°	25–45°	25–45°
	Resistencia a la Tracción	0.1–1 MPa	0.1–2 MPa	10–50 MPa

Fuente: Hart et al. (2022) y Raw (2012).

Del cuadro anterior puede notarse que los residuos alimenticios y de jardín poseen propiedades mecánicas en el rango de lo que es una pasta o un material que puede fluir. Esto depende claramente del tipo de residuo, pero en general el contenido de humedad es determinante en la resistencia y propiedades que el material pueda tener.

3.4.5 Porcentajes de productos obtenidos y sus propiedades para las clasificaciones de residuos estudiadas

Utilizando las referencias bibliográficas citadas y evaluadas, y luego de un proceso de depuración de datos y fuentes consultadas con la evaluación de fuentes que se muestra en el apartado 3.4.2 para los productos de las reacciones, se obtuvo los datos de los porcentajes de productos de pirólisis que se obtienen y su poder calorífico respectivo, cuando la técnica se aplica a los tipos de residuos analizados de acuerdo con la clasificación de (MARN, 2021c). Estos datos importantes como base para la obtención posterior de modelos, se muestran de en los siguientes cuadros:

Cuadro 28: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos alimenticios y de jardín y sus respectivos poderes caloríficos máximos

Residuo	Producto Sólidos [%]	Producto Líquido [%]	Producto Gaseoso [%]	Poder calorífico sólido [MJ/kg]	Poder calorífico líquido [MJ/kg]	Poder calorífico gaseoso [MJ/m ³]
---------	----------------------	----------------------	----------------------	---------------------------------	----------------------------------	---

Residuos de alimentos	25–35	40–50	20–30	15–20	25–30	10–15
Hojas secas	30–40	35–45	20–25	18–22	28–32	12–16
Ramas y madera	25–35	40–50	20–30	20–25	30–35	15–20
Cáscaras de frutas	20–30	45–55	15–25	12–15	20–25	8–12
Césped	20–30	50–60	10–20	10–15	18–22	7–10

Fuente: Bridgewater (2012), Demirbas (2009), Demirbas (2007) y Mohan et al. (2006).

Para los residuos de jardín y alimenticios se observa rangos amplios de rendimiento de los diferentes biocombustibles que se obtienen con la reacción de pirólisis, llegando a un porcentaje máximo de 60% para el combustible líquido, pero repartido en rangos cercanos entre sí de los 3 tipos de biocombustibles. Los poderes caloríficos de los combustibles líquidos se encuentran por debajo de los combustibles comerciales, mientras que los de los combustibles sólidos se observan en el mismo rango de otros combustibles sólidos comerciales.

En el caso de los residuos de papel y cartón, se observa comparativamente con los residuos de jardín y alimenticios, un incremento en el rendimiento de producto líquido obtenido y un leve incremento en el poder calorífico de los poderes caloríficos de los biocombustibles líquidos. Sin embargo, aún los poderes caloríficos de todos los biocombustibles obtenidos con este tipo de residuos se observan por debajo de otros combustibles comerciales.

Cuadro 29: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos de papel y cartón y sus respectivos poderes caloríficos máximos

Residuo	Producto Sólidos [%]	Producto Líquido [%]	Producto Gaseoso [%]	Poder calorífico sólido [MJ/kg]	Poder calorífico líquido [MJ/kg]	Poder calorífico gaseoso [MJ/m ³]
Papel blanco	20–30	50–60	10–20	14–18	25–30	10–15
Papel periódico	25–35	45–55	10–20	12–16	22–27	9–12

Cartón corrugado	30-40	40-50	10-20	16-20	27-32	11-14
Cartón laminado	25-35	45-55	10-20	15-19	25-30	10-13
Cartón reciclado	20-30	50-60	10-20	14-18	22-28	9-12

Fuente: Demirbas (2009), Demirbas (2007) y Rosenfeld et al. (2011).

Cuadro 30: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos de plástico y sus respectivos poderes caloríficos máximos

Residuo	Producto Sólidos [%]	Producto Líquido [%]	Producto Gaseoso [%]	Poder calorífico sólido [MJ/kg]	Poder calorífico líquido [MJ/kg]	Poder calorífico gaseoso [MJ/m ³]
HDPE	5-10	70-80	10-15	43-46	40-45	25-30
LDPE	5-10	70-80	10-15	42-45	38-42	24-28
PP (Polipropileno)	5-10	65-75	15-20	42-46	38-43	23-28
PET	10-15	50-60	20-30	22-25	32-37	15-20
PVC	10-20	50-60	20-30	18-22	28-32	12-15
Poliuretano	10-15	60-70	15-20	25-30	30-35	18-22
Poliestireno	5-10	70-85	10-15	40-45	35-40	20-25

Fuente: Al-Salem et al. (2017), Charitopoulou et al. (2023), Demirbas (2004) y Panda et al. (2020).

En el caso de los residuos plásticos, contrasta el crecimiento en el rendimiento de producto líquido en comparación con otros tipos de residuos. De la misma forma, en la mayoría de los residuos se reportan rangos de poderes caloríficos comparables o superiores a los rangos de combustibles derivados del petróleo. De estas observaciones, se deduce que la estructura molecular posee un efecto directo sobre los rendimientos y propiedades de los productos de la reacción de pirólisis.

Cuadro 31: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos sanitario y peligrosos y sus respectivos poderes caloríficos máximos

Residuo	Producto Sólidos [%]	Producto Líquido [%]	Producto Gaseoso [%]	Poder calorífico sólido [MJ/kg]	Poder calorífico líquido [MJ/kg]	Poder calorífico gaseoso [MJ/m ³]
Papel higiénico	20-30	45-55	15-25	12-15	20-25	8-12
Pañales desechables	25-35	40-50	15-25	10-14	18-22	7-10
Baterías	10-15	20-25	60-70	5-10	15-20	18-25
Aceites usados	5-10	70-80	10-20	8-12	38-45	22-28
Lámparas fluorescentes	15-20	20-30	50-60	5-8	10-15	15-20
Recubrimientos (pinturas)	15-25	30-40	35-50	8-12	20-25	18-22

Fuente: Demirbas (2007), Demirbas (2009) y Gholizadeh et al. (2020).

En el caso de los residuos sanitarios y peligrosos se observa un rango variable de rendimientos de los productos obtenidos y rangos inferiores de poderes caloríficos en comparación con los otros tipos de residuos estudiados anteriormente.

Cuadro 32: Proporción de productos de la reacción de pirólisis de residuos varios y sus respectivos poderes caloríficos máximos.

Residuo	Producto Sólidos [%]	Producto Líquido [%]	Producto Gaseoso [%]	Poder calorífico sólido [MJ/kg]	Poder calorífico líquido [MJ/kg]	Poder calorífico gaseoso [MJ/m ³]
Cerámica	90-95	3-5	1-2	2-4	N/A	N/A
Madera	20-30	45-55	15-25	15-20	25-30	10-15
Hule	10-15	60-70	20-30	25-30	35-40	20-25
Cuero	25-35	40-50	20-30	12-15	22-28	10-15
Algodón	20-30	50-60	10-20	10-15	20-25	8-12
Fibras textiles	15-25	55-65	10-20	12-18	22-28	9-14

Fuente: Bañon et al. (2016), Conesa et al. (2009) y Demirbas (2009).

Finalmente, con los residuos “varios” o peligrosos se observan rangos de rendimientos y poderes caloríficos parecidos a los del papel y el cartón, aunque con una variabilidad que depende del tipo de material que se analice. Se observa en este caso que la cerámica tiene un bajo potencial de tratamiento con esta técnica, lo que ya se infería por sus composición y propiedades, pero se comprueba como otro medio de asegurar la deducción proveniente del concepto de la técnica.

Es importante recalcar que para esta información se presentan los datos de aquellas categorías en donde analítica y referencialmente la técnica cobra factibilidad técnica, es decir, todas aquellas categorías en donde existen materiales con la composición orgánica necesaria para proseguir una descomposición termoquímica en el rango de temperaturas de 300 a 900°C. Referencialmente se comprueba, que la inferencia de descartar las categorías de metales y vidrio es correcta, así como de otros materiales peligrosos relacionados a estas categorías.

3.4.6 Determinación del Progreso de la reacción de pirólisis

Como menciona Miandad et al. (2019), el proceso de pirólisis de cualquier residuo depende principalmente de su etapa reactiva, en donde el material se degrada térmicamente a los productos propios de la reacción de pirólisis. Las etapas previas y posteriores dependen exclusivamente de las propiedades y flujos necesarios de material. Además, de acuerdo con lo descrito en Levenspiel (1999), la técnica de escalamiento de reacciones químicas se basa en la determinación del comportamiento de las especies reactivas con el tiempo, que recibe el nombre de cinética de reacción. Es por esto que en esta sección se presenta un resumen de las principales cinéticas encontradas de forma referencial:

Evaluación de Fuentes referenciales de modelos cinéticos de la reacción de pirólisis

De manera análoga a la evaluación de fuentes referenciales mostradas en la sección 3.4.2, se buscaron fuentes para obtener los modelos cinéticos de la reacción de pirólisis de diferentes tipos de residuos sólidos estudiados y los parámetros propios de la

expresión de la velocidad de reacción de acuerdo con la teoría cinética de reacciones químicas. Estos modelos se han estudiado en diferentes fuentes con procedimientos que, al usar los parámetros encontrados, minimizan el error que el modelo genera al predecir los datos. Los datos de las evaluaciones de las fuentes encontradas, se muestra en los Anexos.

Estas evaluaciones evidenciaron coincidencias y múltiples estudios del campo de cinética. Aunque los mismos presentaron este comportamiento, es notoria la variabilidad en función de la ubicación donde se realice la experimentación, por lo que esto último se tomó en cuenta como criterio para poder generar datos lo más parecido posibles a la ciudad de Guatemala.

Cinéticas de reacción de pirólisis obtenidas referencialmente para los residuos analizados

Dentro de las fuentes consultadas, se evidencia la posibilidad de obtener información solamente para tres categorías de cinéticas en dependencias del tipo de residuo, que son: 1) cinéticas de residuos orgánicos (alimentos, de jardín, papel y cartón), 2) cinéticas de residuos plásticos, y 3) cinéticas de residuos varios. A pesar de la diversidad de residuos y de lo específico que pueden ser algunos modelos para los tipos de residuos estudiados, en general las fuentes consultadas coinciden en la utilización del modelo que se muestra a continuación:

Ecuación 2: Cambio de masa dentro del reactor de pirólisis

$$-\frac{dW}{dt} = k * W^n$$

Donde W es la masa de residuo que se tiene dentro del reactor de pirólisis, t es el tiempo efectivo de la reacción, k es una constante cinética de reacción y n el denominador orden de reacción, estos últimos dos son considerados parámetros cinéticos y dependen del orden de la reacción.

Partiendo de la definición de constante cinética de reacción y su dependencia con la temperatura publicada en Levenspiel (1999), se puede emplear la siguiente ecuación para sustituir en la Ecuación 2 posteriormente:

Ecuación 3: Definición de constante cinética de reacción simplificada con la ecuación de Arrhenius

$$k = A * e^{-\frac{Ea}{R*T}}$$

Donde A es el denominado factor de frecuencia, Ea es la energía de activación de la reacción, R es la constante de los gases ideales que se emplea con el valor de 8.314 J/mol*K en los cálculos, y T es la temperatura del sistema de reacción.

Haciendo la sustitución en la Ecuación 2, se obtiene:

Ecuación 4: Cambio de masa en función de la masa en el reactor y temperatura de reacción

$$-\frac{dW}{dt} = A * e^{-\frac{Ea}{R*T}} * W$$

Esta ecuación resulta en todos los casos de suma importancia, dado que los sistemas de pirólisis funcionan generalmente con temperatura variable de acuerdo con una progresión que depende del diseño del equipo de calentamiento.

Empleando un procedimiento convencional de balance de masa de la reacción y asumiendo que a los rendimientos de formación de producto tienen valores constantes durante la reacción, se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 5: Generación del producto i en función de la masa en el reactor y temperatura de reacción

$$\frac{dN_i}{dt} = Y_i * A * e^{-\frac{Ea}{R*T}} * W$$

Donde N_i representa la masa producida del componente i (que es la fase gaseosa, líquida o sólida generada en la reacción) y Y_i representa el rendimiento del componente i en la reacción de pirólisis de cada residuo obtenido.

La temperatura se presenta en los casos estudiados como una progresión que depende de la forma de calentamiento del equipo, existiendo calentamientos continuos que tienen a usar funciones lineales o polinómicas, o bien, calentamientos suavizados que tienden a tener formas derivadas de la ecuación de Boltzman (Levenspiel, 1999).

A partir de estos modelos generales, se pudo obtener de las fuentes depuradas los valores de las constantes cinéticas de reacción, que como se muestran en las ecuaciones 4 y 5, consisten en un factor de frecuencia, la energía de activación de la reacción y el orden de la reacción. El resumen de los valores reportados y que minimizan el error con modelos experimentales efectuados por los autores referenciados, se muestran a modo de ejemplo para los residuos alimenticios, de jardín, papel y cartón en el cuadro 33 que se presentan a continuación. Para el resto de los residuos, se obtuvieron los mismos parámetros, que se encuentran tabulados en los anexos de la tesis doctoral con su respectiva explicación y observaciones analíticas.

Cuadro 33: Parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis de residuos alimenticios, de jardín, papel y cartón

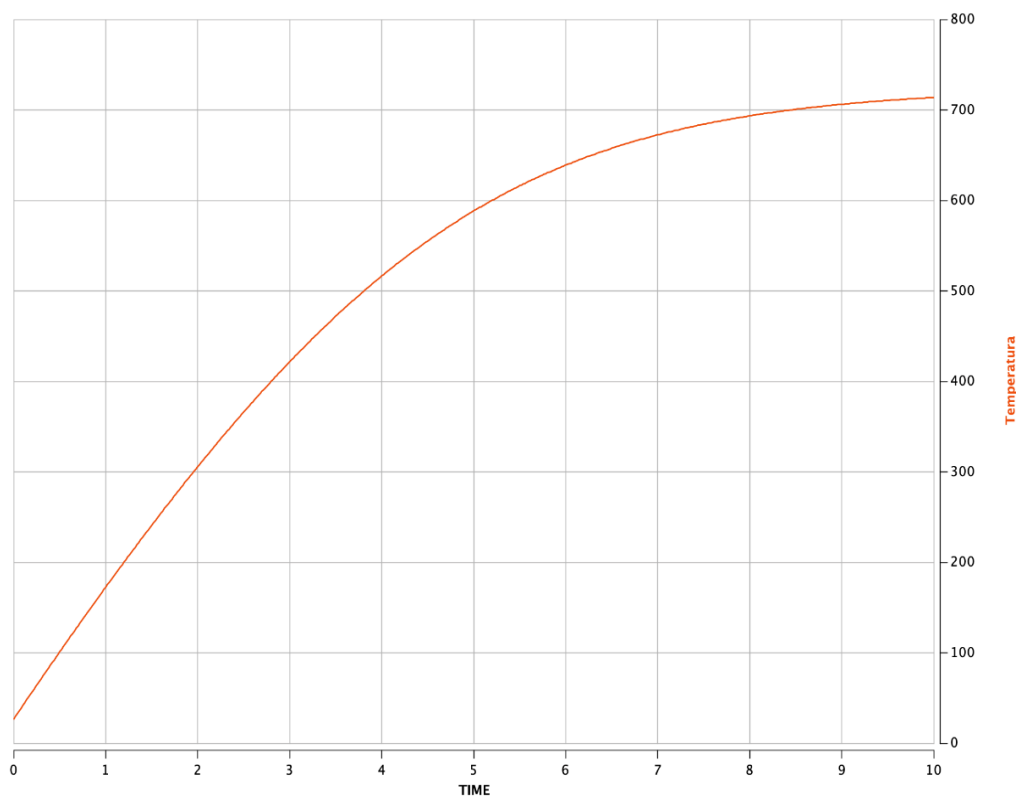
Residuo	Parámetros cinéticos		
	Factor de Frecuencia [A] (s^{-1})	Energía de Activación (kJ/mol)	Orden de Reacción
Residuos de alimentos	2.00E+05	150	1.2
Hojas secas	1.50E+06	180	1
Ramas y madera	3.00E+06	200	1.1
Cáscaras de frutas	1.00E+05	140	1.3
Césped	1.80E+05	160	1

Papel	1.80E+06	160	1.1
Cartón	1.55E+06	170	1

Fuente: Alvarado et al. (2022), Bovee (2014), Gai et al. (2013), Ounas et al. (2011) y White et al. (2011).

Comparativamente, estos datos muestran para los residuos alimenticios y de jardín una menor energía de activación y menor factor de frecuencia, esto representa factores que influyen de manera contraria sobre la velocidad de reacción, por lo que en comparación con otros residuos, su impacto dependerá de la temperatura a la que se ejecute la reacción.

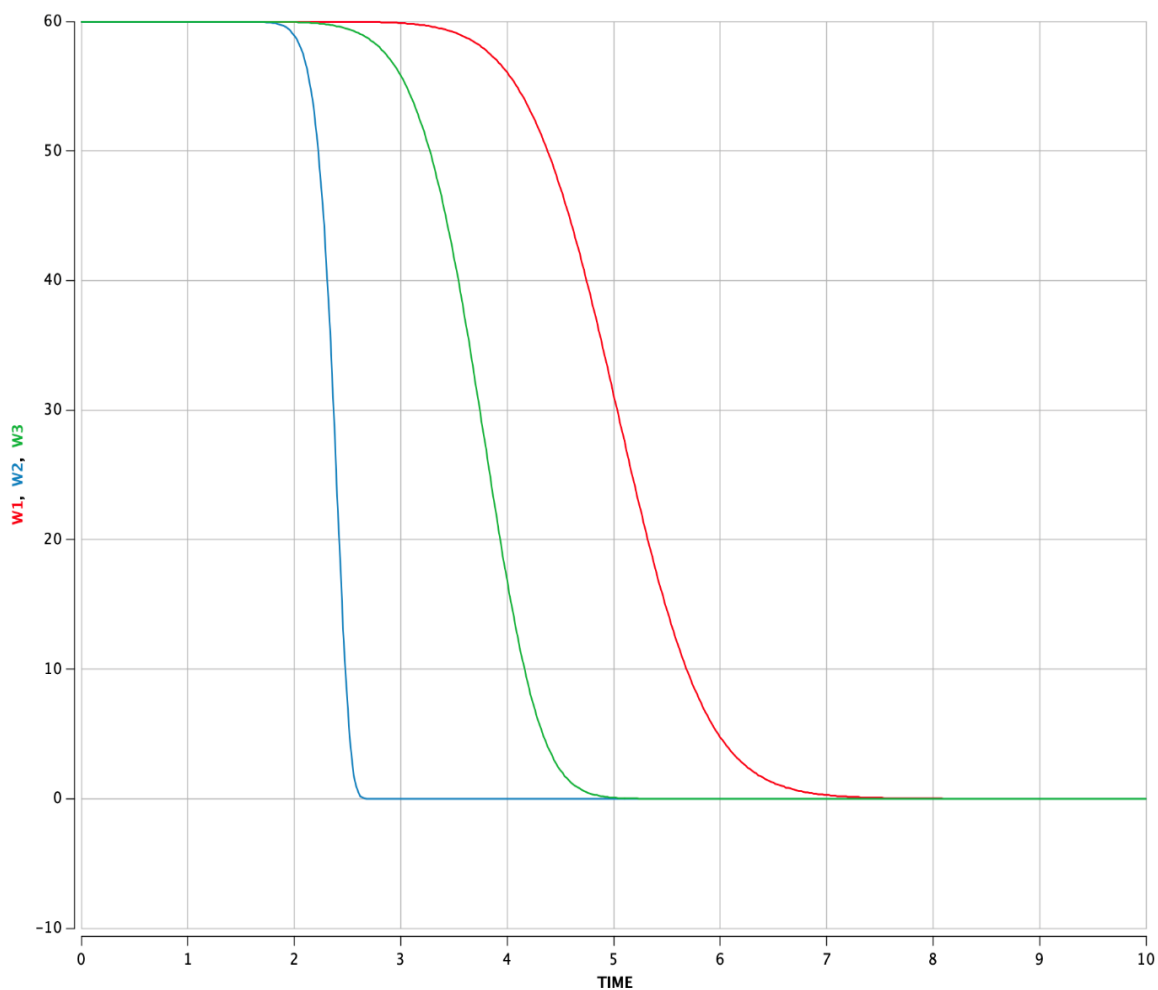
Figura 18: Grafica del modelo de incremento de temperatura empleado en las simulaciones del progreso de la reacción utilizando el software Berkeley Madonna®



En el eje Y se muestra la temperatura en °C y en el eje X el tiempo en horas de la reacción de pirólisis. Fuente: Elaboración propia.

Estos parámetros se pueden utilizar en modelos que permiten predecir el comportamiento de la reacción con el tiempo, los mismos se muestran de forma ejemplificada en las siguientes gráficas, en donde se muestra el progreso de la reacción con respecto a un progreso típico de la temperatura en una reacción de pirólisis. Además, en las figuras se muestran comparativamente 3 tipos de residuos pertenecientes a cada una de las categorías anteriormente mostradas para las cinéticas, y como los mismos se consumen en la reacción de pirólisis generando productos líquidos, sólidos y gaseosos. Se evidencia la celeridad de la reacción de los materiales poliméricos, que por sus características moleculares reportan un progreso acelerado de la reacción. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que este tipo de materiales en general son buenos aislantes térmicos, por lo que el reto con ellos es generar una rampa de temperatura adecuada como la que se muestra en las Figuras. Los residuos celulósicos y orgánicos suelen ser más lentos en degradación, aunque con mejor conducción del calor por los porcentajes de humedad con que cuentan.

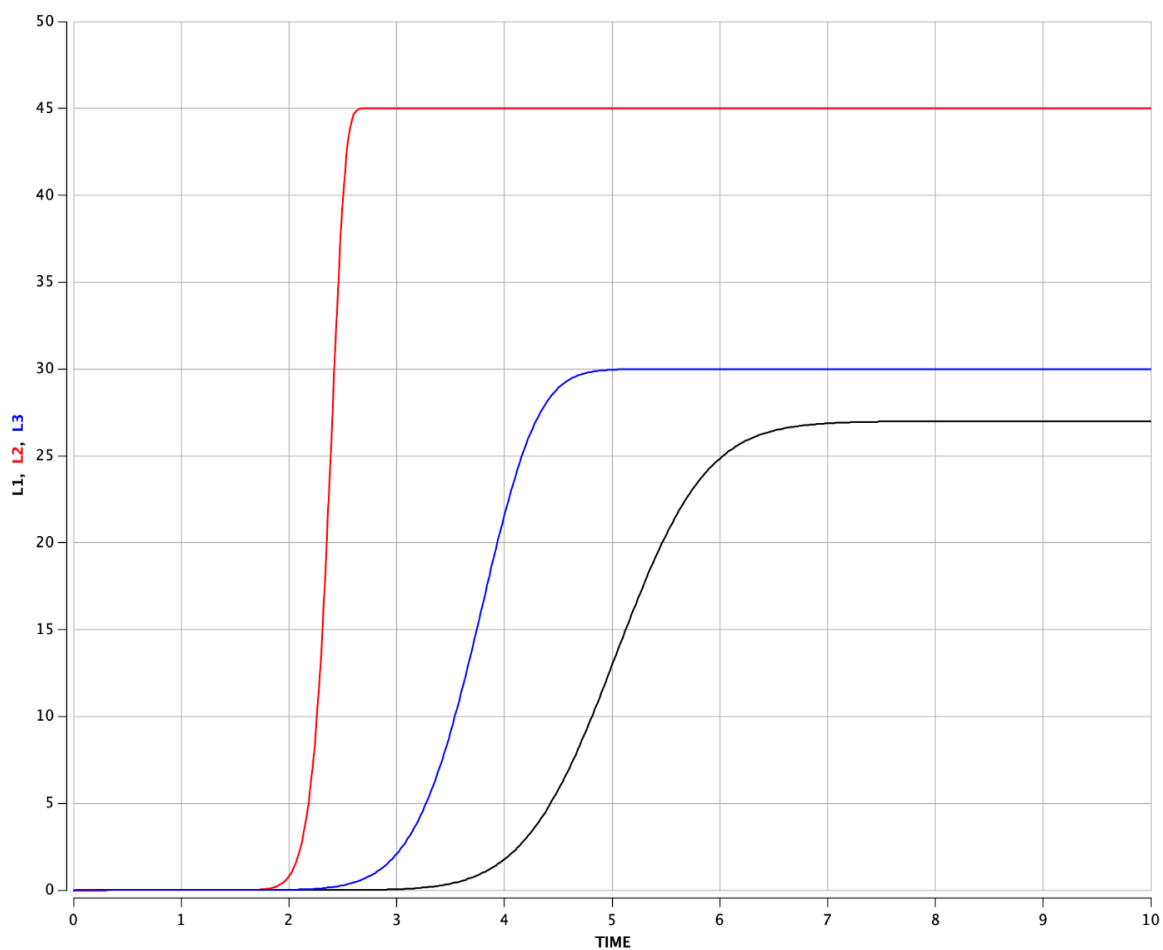
Figura 19: Grafica del modelo cinético prediciendo el consumo de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis



Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna®.

En el eje Y se muestra la masa de reactivos remanente en el reactor de pirólisis en kg, y en el eje X el tiempo en horas de la reacción de pirólisis. El modelo Rojo representa el progreso de la reacción de residuos alimenticios, el verde representa a los residuos de papel higiénico y el azul representa los residuos de polietileno de alta densidad.

Figura 20: Grafica del modelo cinético prediciendo la producción de alquitranes de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis



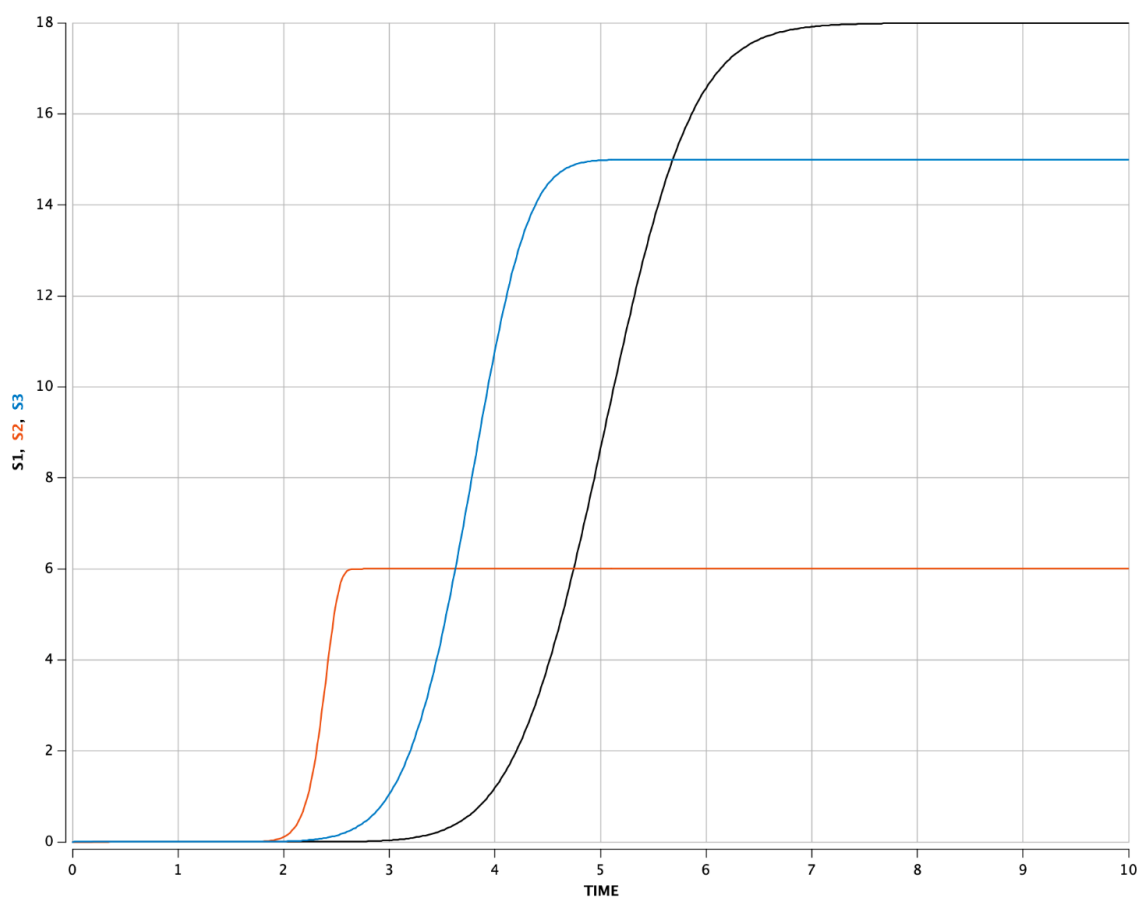
Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna®.

En el eje Y se muestra la masa de producto líquido acumulada con la reacción de pirólisis en kg, y en el eje X el tiempo en horas de la reacción de pirólisis. El modelo negro representa el progreso de la reacción de residuos alimenticios, el azul representa a los residuos de papel higiénico y el rojo representa a los residuos de polietileno de alta densidad.

Con estos gráficos se puede observar claramente la mayor velocidad de reacción que se obtiene con los residuos plásticos y como esto influye en que se complete en menores tiempos la reacción. La velocidad intermedia se obtiene para el papel higiénico y la más lenta los residuos alimenticios.

Las figuras también muestran el rendimiento que se obtiene en la reacción para cada uno de los biocombustibles, pudiendo notar que el rendimiento de biocombustible líquido es mayor en los residuos plásticos y menor en los alimenticios, mientras que para el biocombustible sólido, la tendencia es inversa que para el producto líquido. Este es un factor clave, puesto que la rentabilidad se obtiene en mayor proporción por la venta del líquido y sus propiedades.

Figura 21: Grafica del modelo cinético prediciendo la producción de char de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis

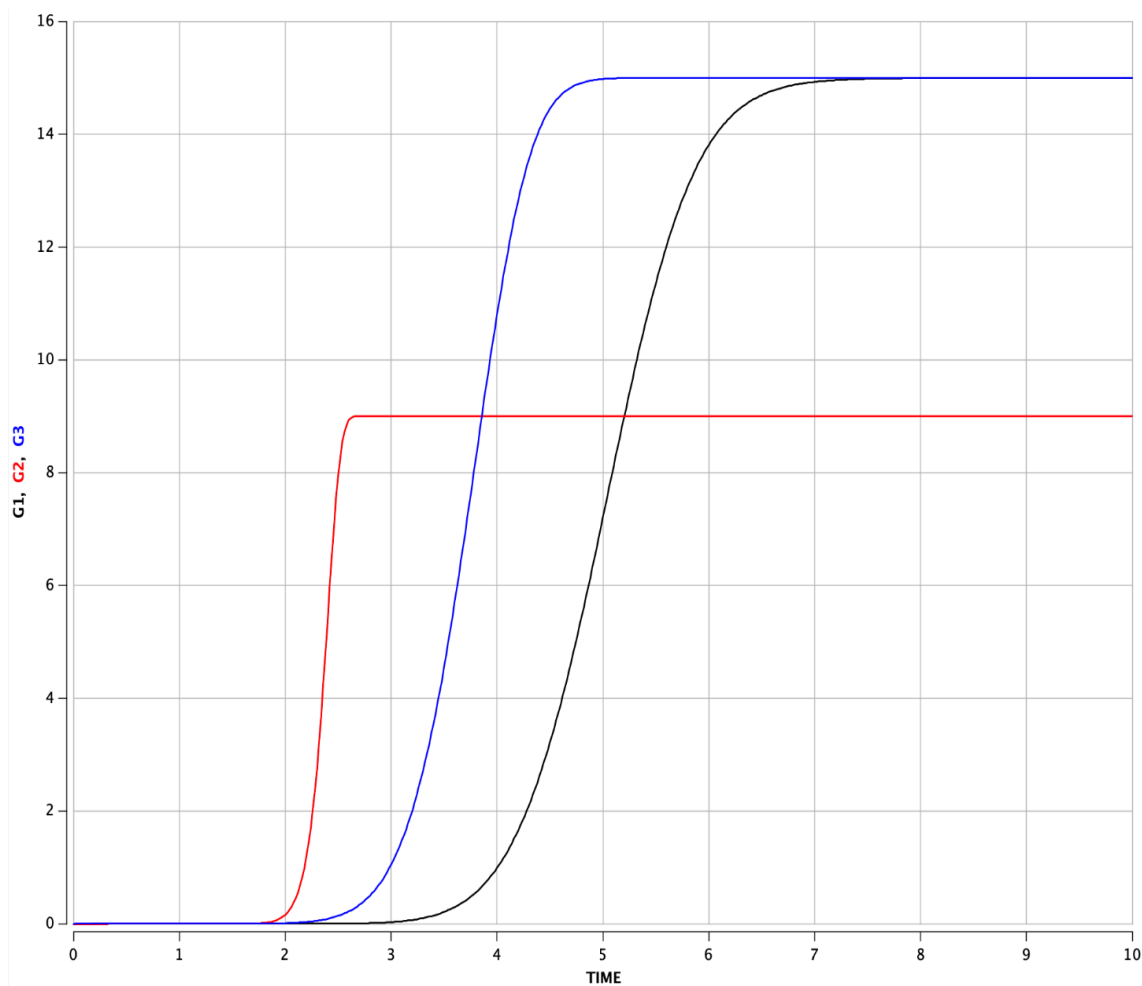


Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna®.

En el eje Y se muestra la masa de producto sólido acumulada con la reacción de pirólisis en kg, y en el eje X el tiempo en horas de la reacción de pirólisis. El modelo negro representa el progreso de la reacción de residuos alimenticios, el azul representa a los

residuos de papel higiénico y el rojo representa a los residuos de polietileno de alta densidad.

Figura 22: Grafica del modelo cinético prediciendo la producción de gases de residuos típicos con respecto al tiempo de reacción de pirólisis



Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna®.

En el eje Y se muestra la masa de producto gaseoso acumulada con la reacción de pirólisis en kg, y en el eje X el tiempo en horas de la reacción de pirólisis. El modelo negro representa el progreso de la reacción de residuos alimenticios, el azul representa a los residuos de papel higiénico y el rojo representa a los residuos de polietileno de alta densidad.

Estos modelos que se han conseguido graficar son la base del escalamiento de las reacciones, dado que el tiempo necesario para ejecutar dicho proceso es la base del dimensionamiento de los equipos necesarios para la reacción.

3.4.7 Modelo multivariable de predicción de características de los productos en función del tipo de residuo sólido

Empleando los principios de reacción termoquímica y la conocida proporcionalidad entre la energía de reacción y la composición de la muestra (Levenspiel, 1999), se plantearon modelos que permitieran la predicción de los productos generados en función de las propiedades mostradas en la sección A de resultados. Los primeros modelos desarrollados tomaban en cuante composiciones simples de carbono e hidrógeno, buscando establecer las propiedades en función de estas dos composiciones. Sin embargo, los errores de predicción mayores al 10% brindaron la certeza de necesitar modelos más complejos. Un ejemplo de estas ecuaciones inicialmente desarrolladas se muestra a continuación:

Ecuación 6: Modelo lineal de porcentaje de rendimiento de biocombustible líquido obtenido en la reacción de pirólisis en función de la composición de carbono e hidrógeno

$$\text{Rendimiento de líquido (\%)} = a * X_1 + b * X_2$$

Donde X_1 es la concentración de carbono en la muestra y X_2 la concentración de hidrógeno, mientras a y b son los coeficientes que ajustan a los datos referenciales.

Con base en este resultado, se realizaron pruebas de simulación en Microsoft Excel® para generar modelos con las mejores capacidades predictivas, comprobadas con herramientas estadísticas de correlación y porcentajes de error para cada modelo desarrollado. Se determinó que las siguientes ecuaciones son las que presentaron los mejores ajustes:

Ecuación 7: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible sólido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento de sólido (\%)} = & a + b * X_1 + c * X_2 + d * X_3 + e * X_4 \\ & + f * X_5 + g * X_6 + h * X_7 \end{aligned}$$

Donde X_1 es la concentración de carbono en el residuo sólido, X_2 es la concentración de nitrógeno en el residuo sólido, X_3 es la concentración de hidrógeno en el residuo sólido, X_4 es la concentración de oxígeno en el residuo sólido, X_5 es la concentración de azufre en el residuo sólido, X_6 es la concentración de cloro en el residuo sólido, y X_7 es la concentración de metales en el residuo sólido, mientras a es el “intercepto” y b, c, d, e, f, g y h son los coeficientes que ajustan los datos a las variables X_1 a X_7 respectivamente.

Ecuación 8: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible líquido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento de líquido (\%)} = & a + b * X_1 + c * X_2 + d * X_3 + e * X_4 \\ & + f * X_5 + g * X_6 + h * X_7 \end{aligned}$$

Donde X_1 es la concentración de carbono en el residuo sólido, X_2 es la concentración de nitrógeno en el residuo sólido, X_3 es la concentración de hidrógeno en el residuo sólido, X_4 es la concentración de oxígeno en el residuo sólido, X_5 es la concentración de azufre en el residuo sólido, X_6 es la concentración de cloro en el residuo sólido, y X_7 es la concentración de metales en el residuo sólido, mientras a es el “intercepto” y b, c, d, e, f, g y h son los coeficientes que ajustan los datos a las variables X_1 a X_7 respectivamente.

Ecuación 9: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible gaseoso obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento de gas (\%)} = & a + b * X_1 + c * X_2 + d * X_3 + e * X_4 \\ & + f * X_5 + g * X_6 + h * X_7 \end{aligned}$$

Donde X_1 es la concentración de carbono en el residuo sólido, X_2 es la concentración de nitrógeno en el residuo sólido, X_3 es la concentración de hidrógeno en el residuo sólido, X_4 es la concentración de oxígeno en el residuo sólido, X_5 es la concentración de azufre en el residuo sólido, X_6 es la concentración de cloro en el residuo sólido, y X_7 es la concentración de metales en el residuo sólido, mientras a es el “intercepto” y b, c, d, e, f, g y h son los coeficientes que ajustan los datos a las variables X_1 a X_7 respectivamente.

Ecuación 10: Modelo multivariable de poder calorífico del biocombustible gaseoso obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición

$$\begin{aligned} \text{Poder Calorífico del gas } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right) = & a + b * X_1 + c * X_2 + d * X_3 + e * X_4 \\ & + f * X_5 + g * X_6 + h * X_7 \end{aligned}$$

Donde X_1 es la concentración de carbono en el residuo sólido, X_2 es la concentración de nitrógeno en el residuo sólido, X_3 es la concentración de hidrógeno en el residuo sólido, X_4 es la concentración de oxígeno en el residuo sólido, X_5 es la concentración de azufre en el residuo sólido, X_6 es la concentración de cloro en el residuo sólido, y X_7 es la concentración de metales en el residuo sólido, mientras a es el “intercepto” y b, c, d, e, f, g y h son los coeficientes que ajustan los datos a las variables X_1 a X_7 respectivamente.

Ecuación 11: Modelo multivariable de poder calorífico del biocombustible líquido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición

$$\begin{aligned} \text{Poder Calorífico del líquido } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right) = & a + b * X_1 + c * X_2 + d * X_3 + e * X_4 \\ & + f * X_5 + g * X_6 + h * X_7 + i * X_8 \end{aligned}$$

Donde X_1 es la concentración de carbono en el residuo sólido, X_2 es la concentración de nitrógeno en el residuo sólido, X_3 es la concentración de hidrógeno en el residuo sólido, X_4 es la concentración de oxígeno en el residuo sólido, X_5 es la concentración de azufre en el residuo sólido, X_6 es la concentración de cloro en el residuo sólido, X_7 es la concentración de metales en el residuo sólido y X_8 es la concentración de agua

porcentual en el residuo sólido, mientras “a” es el “intercepto” y “b”, “c”, “d”, “e”, “f”, “g”, “h” e “i” son los coeficientes que ajustan los datos a las variables X_1 a X_8 respectivamente.

Ecuación 12: Modelo multivariable de porcentaje de rendimiento de biocombustible sólido obtenido en la reacción de pirólisis en función de su composición y parámetros

$$\text{Poder Calorífico del sólido } \left(\frac{MJ}{kg} \right) = a + b * X_1 + c * X_2 + d * X_3 + e * X_4 + f * X_5 + g * X_6 + h * X_7 + i * X_8$$

Donde X_1 es la concentración de carbono en el residuo sólido, X_2 es la concentración de nitrógeno en el residuo sólido, X_3 es la concentración de hidrógeno en el residuo sólido, X_4 es la concentración de oxígeno en el residuo sólido, X_5 es la concentración de azufre en el residuo sólido, X_6 es la concentración de cloro en el residuo sólido, X_7 es la concentración de metales en el residuo sólido y X_8 es la concentración de agua porcentual en el residuo sólido, mientras “a” es el “intercepto” y “b”, “c”, “d”, “e”, “f”, “g”, “h” e “i” son los coeficientes que ajustan los datos a las variables X_1 a X_8 respectivamente.

Los valores de los parámetros ajustados que minimizaron error y sus análisis estadísticos respectivos se muestran en los siguientes cuadros. En el cuadro 34 se muestran los parámetros de las ecuaciones 7 a la 12 que minimizan el error de predecir el comportamiento de cada una de las propiedades obtenidas para los 3 biocombustibles de la reacción, en función de su composición, con lo que se hace posible simular el resultado de lo que se obtendrá con cada tipo de residuo. Mientras que el cuadro 35 muestra los coeficientes de regresión de los modelos elaborados, que proporcionan la información necesaria para asegurar la predictibilidad de los modelos elaborados y la correcta relación existente entre las variables independientes y su efecto sobre las variables dependientes.

Cuadro 34: Parámetros “a” al “i” de los modelos multivariantes para la predicción de propiedades de los biocombustibles obtenidos con la reacción de pirólisis en función de la composición del residuo

Propiedad del Biocombustible	a (Intercepto)	b (Variable X1)	c (Variable X2)	d (Variable X3)	e (Variable X4)	f (Variable X5)	g (Variable X6)	h (Variable X7)	i (Variable X8)
Poder calorífico del biocombustible sólido	152.77	-132.04	-84.37	-93.34	-153.43	-158.26	-149.24	-142.59	-12.06
Poder calorífico del biocombustible líquido	231.43	-194.90	-191.87	-162.80	-214.20	-219.61	-210.88	-239.84	-15.08
Poder calorífico del biocombustible gaseoso	144.59	-119.37	-71.14	-116.30	-154.39	-153.20	-141.61	-132.66	-
Porcentaje de Rendimiento del biocombustible gaseoso	3.44	-3.20	-3.15	-4.04	-3.19	-3.45	-3.14	-2.84	-
Porcentaje de Rendimiento del biocombustible líquido	-2.88	3.67	4.15	3.71	3.03	3.26	3.27	3.10	-
Porcentaje de Rendimiento del biocombustible sólido	0.39	-0.43	-0.94	0.47	0.19	0.23	-0.09	-0.21	-

Fuente: Elaboración propia con regresiones multivariable.

Con estos modelos es posible generar una simulación de los rendimientos y poderes caloríficos de los productos de la reacción en función de las propiedades del residuo que se necesite predecir, lo cual es especialmente útil para evaluaciones técnicas y económicas de la viabilidad del tratamiento con la técnica, puesto que estas dos características son la base para generar toda la información relacionada al proceso de tratamiento.

Cuadro 35: Coeficientes de regresión de los modelos multivariable predictivos para las propiedades de los biocombustibles obtenidos con la reacción de pirólisis en función de la composición del residuo

Coeficiente determinado	Modelo del Rendimiento porcentual de biocombustible sólido	Modelo del Rendimiento porcentual de biocombustible líquido	Modelo del Rendimiento porcentual de biocombustible gaseoso	Modelo del poder calorífico del biocombustible gaseoso	Modelo del poder calorífico del biocombustible líquido	Modelo del poder calorífico del biocombustible sólido
Coeficiente de correlación múltiple	0.97	0.99	0.95	0.95	0.98	0.99
Coeficiente de determinación R ²	0.93	0.98	0.91	0.90	0.95	0.98
R ² ajustado	0.87	0.95	0.82	0.79	0.89	0.95
Error típico	0.04	0.03	0.04	2.99	2.52	1.52
Número de observaciones usados para el modelaje	15	15	15	15	15	15

Fuente: Elaboración propia con regresiones multivariable.

Todos los modelos fueron ajustados utilizando prueba F para asegurar la predictibilidad de los datos utilizando el modelo multivariable y obteniendo coeficientes de correlación por arriba del 95% como se muestra en el cuadro anterior. Esto permite asegurar la predictibilidad de los residuos empleados para parametrizar el modelo.

3.4.8 Validación de modelos multivariable empleando la predicción de categorías de residuos sólidos y sus valores de propiedades reportadas

Para validar los resultados de los modelos multivariable obtenidos previamente, se emplearon los valores de las composiciones obtenidas referencialmente que se muestran en el apartado 3.4.4 y los valores de los productos obtenidos y sus propiedades,

mostrado en el apartado 3.4.5, con lo que fue posible el utilizar los primeros para aplicar los modelos y predecir las características de los productos obtenidos. Los resultados predictivos se muestran a continuación:

Cuadro 36: Predicción de Rendimientos y poderes caloríficos de biocombustibles de la reacción de pirólisis con diferentes tipos de residuos típicos

Tipo de Residuo sólido	Predicción del rendimiento o de biocombustible sólido [% m/m]	Predicción del rendimiento o de biocombustible líquido [% m/m]	Predicción del rendimiento de biocombustible gaseoso [% m/m]	Predicción del Poder calorífico del biocombustible sólido [MJ/kg]	Predicción del Poder calorífico del biocombustible líquido [MJ/kg]	Predicción del Poder calorífico del biocombustible gaseoso [MJ/m³]
Alimentos	28.9%	48%	23%	12.87	27.05	13.59
Residuos de Jardinería	27.5%	49%	23%	8.92	22.21	12.20
Papel	32.5%	53%	15%	12.16	28.04	12.30
Cartón	32.5%	52%	15%	12.84	28.95	12.69
HDPE	9.2%	79%	12%	26.15	41.02	25.65
LDPE	9.2%	79%	12%	26.15	41.02	25.65
PP	9.2%	79%	12%	26.15	41.02	25.65
PET	21.2%	58%	21%	15.41	31.60	13.80
PVC	20.0%	55%	25%	13.50	30.00	13.50
Poliuretano	15.7%	64%	21%	20.06	32.59	18.73
Poliestireno	3.4%	79%	18%	23.63	38.94	25.45
Residuos de Papel Higiénico	29.6%	48%	23%	12.13	25.82	9.58
Residuos de Pañales	26.9%	50%	23%	7.75	17.98	11.86
Residuos de Madera	30.7%	46%	23%	11.96	26.90	9.70
Residuos de Recubrimientos	21.1%	34%	45%	19.81	22.34	19.17

Fuente: Elaboración propia con los modelos multiparamétricos y composiciones mostradas en 3.4.4.

Cualitativamente se observa la misma tendencia que tienen los datos referenciales presentados en las secciones anteriores, donde se observa un mayor rendimiento de

producto líquido y mayores poderes caloríficos del mismo biocombustible en residuos plásticos. Mientras que los residuos varios, como los de recubrimientos, presentan mayores rendimientos y poderes caloríficos en el biocombustible gaseoso.

Por otro lado, con esta información se generó un comparativo del error de la predicción realizado, validando que todos los resultados obtenidos se encontraban por debajo del 5% de error (indistintamente si la variación encontrada es positiva o negativa), lo que proporciona certeza sobre los resultados que el modelo permite obtener. Los errores porcentuales se muestran a continuación:

Cuadro 37: Porcentajes de error de las predicciones de rendimientos y poderes caloríficos de los biocombustibles de la reacción de pirólisis con diferentes tipos de residuos típicos

Tipo de Residuo sólido	Porcentaje de error de la Predicción del rendimiento de biocombustible sólido [% m/m]	Porcentaje de error de la Predicción del rendimiento de biocombustible líquido [% m/m]	Porcentaje de error de la Predicción del rendimiento de biocombustible gaseoso [% m/m]	Porcentaje de error de la Predicción del Poder calorífico del biocombustible sólido [MJ/kg]	Porcentaje de error de la Predicción del Poder calorífico del biocombustible líquido [MJ/kg]	Porcentaje de error de la Predicción del Poder calorífico del biocombustible gaseoso [MJ/m ³]
Alimentos	-0.35%	2.52%	0.20%	3.28%	-1.63%	4.57%
Residuos de Jardinería	-1.67%	-1.50%	3.01%	3.61%	0.96%	1.64%
Papel	4.92%	-3.86%	4.31%	-1.01%	1.97%	-1.58%
Cartón	-4.48%	2.20%	2.67%	-4.68%	-1.85%	1.51%
HDPE	2.29%	-0.82%	2.04%	-1.83%	-3.47%	-6.73%
LDPE	2.29%	-0.82%	-2.04%	0.43%	2.56%	-1.35%
PP	2.29%	-0.82%	-2.04%	-0.71%	0.06%	0.59%
PET	-3.65%	-0.11%	3.54%	-2.54%	1.95%	-1.42%
PVC	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Poliuretano	4.34%	-2.03%	3.20%	-3.48%	0.26%	-1.44%
Poliestireno	-4.23%	2.05%	-1.64%	2.47%	3.83%	1.80%
Residuos de Papel Higiénico	-1.45%	-4.18%	2.40%	1.92%	3.26%	-4.25%
Residuos de Pañales	-3.82%	2.96%	-1.04%	4.33%	-0.11%	-1.19%

Residuos de Madera	2.24%	-1.70%	0.36%	-4.61%	-2.18%	-3.05%
Residuos de Recubrimientos	0.40%	-2.10%	-0.86%	-4.12%	-0.70%	-4.17%

Fuente: Elaboración propia con los modelos multiparamétricos y composiciones mostradas en 3.4.4 y los rendimientos y poderes caloríficos mostrados en 3.4.5.

Esta comparación muestra que el modelo multivariable elaborado es capaz de mostrar resultados predictivos adecuados a los tipos de residuos sólidos típicos que potencialmente pueden tratarse con la técnica de pirólisis, mostrando que la primera herramienta de evaluación técnica es capaz de brindar resultados con menos del 5% de error.

3.4.9 Estudios de caso de predicción de modelos multivariable empleando la predicción de residuos sólidos estudiados a nivel laboratorio

Contrastando la aplicación de los modelos predictivos multivariable en casos específicos, se desarrolló un análisis de propiedades de diferentes materiales residuales en las instalaciones del instituto de investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, específicamente en el centro de procesos industriales de dicha institución. Los materiales definidos a estudiar y las razones para usarlos como caso de estudio fueron:

- Residuo de Aguacate (cáscara, semilla, pulpa no aprovechada): Guatemala es uno de los principales productores de aguacate en Centroamérica, con una creciente industria de exportación. La transformación agroindustrial genera una gran cantidad de residuos orgánicos, especialmente cáscaras y semillas, que actualmente no se valorizan y se estima generan alrededor de 14,000t anuales de residuos sólidos (ICTA, 2024). Estos residuos tienen alto contenido de carbono, aceites y compuestos bioactivos, lo que los hace atractivos para procesos como pirólisis, producción de biochar o extracción de antioxidantes naturales. Estudiarlos permitiría desarrollar soluciones de economía circular para pequeños

productores y procesadores rurales, reduciendo la carga ambiental y generando valor añadido.

- **Bagazo de Caña de Azúcar:** El sector azucarero es uno de los pilares de la economía agrícola de Guatemala. El bagazo es el residuo fibroso que queda tras la extracción del jugo, y constituye una fuente significativa de biomasa lignocelulósica que llega hasta 6.4 millones de toneladas anuales en Guatemala. Aunque parte del bagazo ya se utiliza para generación térmica, existe un excedente mal aprovechado en muchas plantas pequeñas y cooperativas (AZAGUA, 2022). Su estudio permite mejorar su uso energético a través de tecnologías como la gasificación o la producción de biocombustibles sólidos, contribuyendo a la autosuficiencia energética, reducción de emisiones y disminución del uso de combustibles fósiles en procesos agroindustriales.
- **HDPE (polietileno de alta densidad, común en botellas de productos de limpieza y alimentos):** Con un volumen anual estimado en 80,000t, el HDPE es uno de los plásticos más comunes en Guatemala, presente en envases de productos de consumo masivo (Kaza, 2018). Sin embargo, su tasa de reciclaje sigue siendo baja debido a la falta de separación en la fuente y a la ausencia de incentivos en el mercado secundario. Estudiar este residuo permite identificar oportunidades de valorización térmica (por ejemplo, en pirólisis para producir combustibles líquidos) o mecánica, así como evaluar sus impactos ambientales cuando no es gestionado correctamente.
- **PET (tereftalato de polietileno, común en botellas de bebidas):** El PET representa una fracción considerable de los residuos sólidos urbanos en Guatemala con volumen estimado en 120,000t anuales, especialmente en zonas urbanas y turísticas (Kaza, 2018). Si bien existen iniciativas de reciclaje, su cobertura es limitada y el acopio es informal. Estudiar el PET permite evaluar su potencial en procesos alternativos como la despolimerización, la pirólisis o la incorporación en materiales compuestos. Además, proporciona una base técnica para políticas públicas orientadas a la responsabilidad extendida del productor (REP) y mejora el diseño de sistemas de reciclaje integrando a recolectores y recicladores.

- BOPP Metalizado (envases flexibles como chips, café y snacks): El BOPP (polipropileno biorientado) metalizado es un residuo complejo que está creciendo en volumen por su uso masivo en empaques de alimentos procesados en Guatemala, se estima genera 20,000t anuales de residuos. Debido a su estructura multicapa y contenido metálico (generalmente aluminio), es difícil de reciclar con métodos convencionales. Su acumulación en vertederos y espacios naturales representa un reto ambiental significativo. Estudiarlo permite explorar soluciones tecnológicas como su co-procesamiento en cementeras, su uso como insumo energético en pirólisis, o el desarrollo de alternativas biodegradables.

Partiendo de esta necesidad detectada y de la oportunidad de estudiar estos materiales en el centro anteriormente mencionado, se emplearon metodologías analíticas de análisis proximal, metodologías de determinación de metales y de porcentaje de humedad, para establecer las propiedades base de muestras representativas que se obtuvieron de la industria local. Con estos análisis se obtuvo los siguientes resultados:

Cuadro 38: Porcentajes máxicos de composición analizados experimentalmente para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala

Tipo de Residuo sólido	Contenido de Carbono (C)	Contenido de Nitrógeno (N)	Contenido de Hidrógeno (H)	Contenido de Oxígeno (O)	Contenido de Azufre (S)	Contenido de Cloro (Cl)	Contenido de Metales	Contenido de Agua
Aguacate (residuo)	48.0%	2.0%	6.5%	37.0%	0.1%	0.0%	0.1%	65.0%
Caña de azúcar (bagazo)	45.0%	0.4%	5.5%	45.0%	0.1%	0.0%	0.1%	48.0%
HDPE (botellas)	86.0%	0.0%	13.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.04%	0.1%
PET (botellas)	63.0%	0.0%	4.4%	32.5%	0.0%	0.0%	0.05%	0.1%
BOPP metalizado	85.0%	0.0%	14.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	0.1%

Fuente: Elaboración propia en el centro de procesos industriales de la Universidad del Valle de Guatemala. Ver la metodología experimental en los Anexos.

Estos resultados coinciden con las tendencias evidenciadas de los datos referenciales mostrados anteriormente, donde los residuos plásticos presentan los mayores contenidos de carbono y los menores contenidos de oxígeno. Mientras que en los residuos alimenticios o celulósicos, la tendencia es inversa.

Por otro lado, empleando la metodología desarrollada en el mismo centro, que se muestra en los Anexos, se utilizó un reactor experimental a escala laboratorio para generar los productos de la pirólisis de los materiales obtenidos y de esa forma poder determinar sus rendimientos y poderes caloríficos, que como se evidenció anteriormente, son los parámetros principales para establecer el potencial técnico de aplicación de la reacción de pirólisis en el tratamiento de residuos sólidos.

Los productos obtenidos fueron entonces estudiados con técnicas de análisis de laboratorio de determinación de poder calorífico y cromatografía de gases, que permitió llegar a los valores de rendimientos y poderes caloríficos que se muestran en el cuadro que se muestra a continuación.

Cuadro 39: Rendimientos y poderes caloríficos analizados experimentalmente para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala

Tipo de Residuo sólido	Rendimiento de biocombustible sólido [% m/m]	Rendimiento de biocombustible líquido [% m/m]	Rendimiento de biocombustible gaseoso [% m/m]	Poder calorífico del biocombustible sólido [MJ/kg]	Poder calorífico del biocombustible líquido [MJ/kg]	Poder calorífico del biocombustible gaseoso [MJ/m ³]
Aguacate (residuo)	29.0%	32.5%	38.5%	16.10	34.21	20.01
Caña de azúcar (bagazo)	31.0%	37.0%	32.0%	12.54	29.50	13.22
HDPE (botellas)	9.0%	78.0%	15.5%	27.98	42.88	26.00
PET (botellas)	21.0%	58.0%	21.0%	15.01	31.47	14.17
BOPP metalizado	9.8%	78.0%	13.0%	25.32	41.22	24.30

Fuente: Elaboración propia en el centro de procesos industriales de la Universidad del Valle de Guatemala. Ver la metodología experimental en los Anexos.

En este caso, el criterio técnico indica que todos los residuos estudiados pueden ser tratados con la técnica de pirólisis al tener rendimientos arriba del 30% en el biocombustible sólido o líquido y además productos con poderes caloríficos comparables con otros combustibles. Por ejemplo, el HDPE y BOPP que generan un poder calorífico parecido al de la gasolina (40MJ/kg) (Perry, 2008).

Ahora bien, estudiando estos casos se puso a prueba también los modelos multivariable descritos anteriormente, con lo que fue posible también determinar con los mismos el rendimiento de cada biocombustible y su poder calorífico de forma predictiva, para poder compararlos con los valores anteriormente obtenidos de forma experimental. Los resultados predictivos de los modelos empleados se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 40: Predicción de los rendimientos y poderes caloríficos para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala empleando los modelos multivariable desarrollados

Tipo de Residuo sólido	Predicción del rendimiento de biocombustible sólido [% m/m]	Predicción del rendimiento de biocombustible líquido [% m/m]	Predicción del rendimiento de biocombustible gaseoso [% m/m]	Predicción del Poder calorífico del biocombustible sólido [MJ/kg]	Predicción del Poder calorífico del biocombustible líquido [MJ/kg]	Predicción del Poder calorífico del biocombustible gaseoso [MJ/m ³]
Aguacate (residuo)	27.2%	33%	39%	16.73	33.94	20.90
Caña de azúcar (bagazo)	31.1%	36%	33%	12.75	29.92	14.43
HDPE (botellas)	8.7%	76%	16%	27.01	42.54	26.76
PET (botellas)	20.8%	58%	21%	15.53	31.73	14.03
BOPP metalizado	9.4%	79%	13%	26.03	40.56	25.52

Fuente: Elaboración propia con los modelos multivariable desarrollados.

Partiendo de estos valores y para poder compararlos, se calculó un porcentaje de error sobre el valor experimental reportado, obteniendo los valores que se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 41: Errores porcentuales de la predicción de los rendimientos y poderes caloríficos para los residuos seleccionados de la oferta local de Guatemala empleando los modelos multivariable desarrollados

Tipo de Residuo sólido	Error porcentual de la predicción del rendimiento de biocombustible sólido [% m/m]	Error porcentual de la predicción del rendimiento de biocombustible líquido [% m/m]	Error porcentual de la predicción del rendimiento de biocombustible gaseoso [% m/m]	Error porcentual de la predicción del Poder calorífico del biocombustible sólido [MJ/kg]	Error porcentual de la predicción del Poder calorífico del biocombustible líquido [MJ/kg]	Error porcentual de la predicción del Poder calorífico del biocombustible gaseoso [MJ/m³]
Aguacate (residuo)	-6.1%	2.2%	2.2%	3.9%	-0.8%	4.4%
Caña de azúcar (bagazo)	0.4%	-2.4%	1.7%	1.6%	1.4%	9.2%
HDPE (botellas)	-3.1%	-2.9%	4.3%	-3.5%	-0.8%	2.9%
PET (botellas)	-0.8%	0.1%	-0.2%	3.5%	0.8%	-1.0%
BOPP metalizado	-3.8%	1.0%	-3.0%	2.8%	-1.6%	5.0%

Fuente: Elaboración propia con los modelos multivariable desarrollados.

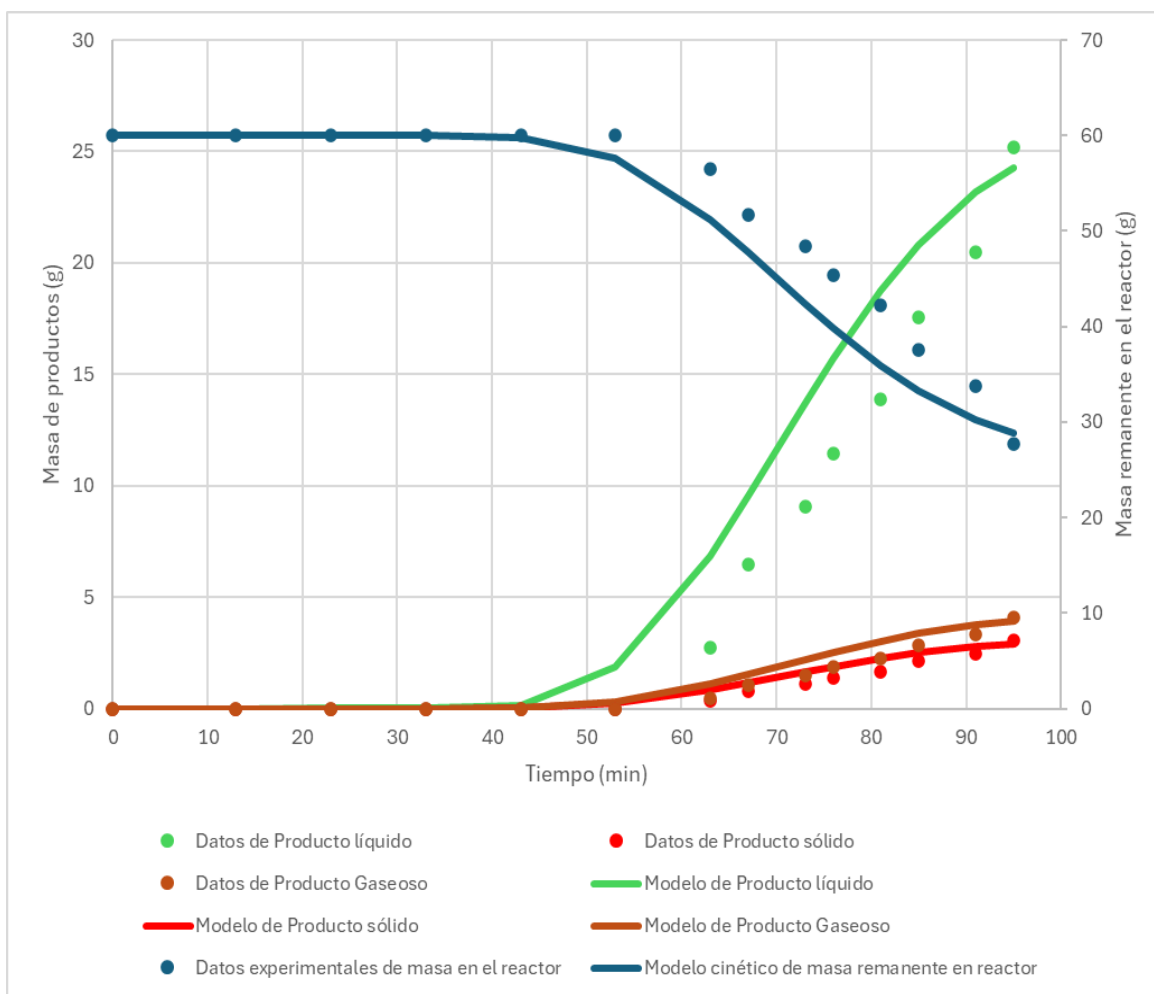
De estos valores se observa una alta predictibilidad con error menor al 5% para todos los residuos evaluados, excepto para el aguacate y la caña de azúcar, en donde el rendimiento de biocombustible sólido generado y el poder calorífico del gas tuvieron errores mayores al 5%, pero menores al 10%. Esto genera certeza sobre los resultados obtenidos con los modelos, pero con potenciales errores causados por la heterogeneidad que este tipo de residuos presenta a nivel experimental.

3.4.10 Modelos cinéticos ajustados para la predictibilidad de tiempos de reacción y determinación de potencial escalamiento

De la misma forma que con los modelos multivariable desarrollados, se seleccionó modelos cinéticos que se describen en la sección 3.4.6 para poder proporcionar la predictibilidad con respecto al progreso de la reacción. Estos se probaron con datos del progreso de la reacción para residuos típicos que se obtuvieron en el centro de procesos industriales de la Universidad del Valle de Guatemala. Para esto, se realizaron balances de masa midiendo la masa de cada uno de los productos obtenidos y cuantificándolos en función del tiempo para tres tipos de residuos: 1) Residuos de Aguacate, 2) Residuos de HDPE y 3) Residuos de BOPP. Con esto se obtuvo los datos prácticos necesarios para comparar con el modelo cinético y de esa forma asegurar la predictibilidad del avance de la reacción.

Al realizar la comparación entre el modelo cinético y los datos de laboratorio utilizando el coeficiente de correlación como medio de comparación estadístico, se obtuvo que el modelo general de la sección 3.4.6 tenía coeficientes de correlación abajo del 70%, que, si bien explican parcialmente la variación de los datos, no generan una predictibilidad tan exacta como para escalar o diseñar. Esto último varía de acuerdo con las necesidades, pero en general coeficientes de correlación arriba del 90% generan en procesos químicos una adecuada descripción para escalar (Levenspiel, 1999). La simulación efectuada para los residuos de BOPP y su comparación con los datos obtenidos experimentalmente, que presentaron un coeficiente de correlación de 82% para la masa de residuos en el reactor y de 83.5% para el modelaje del residuo líquido (que es el que mayormente se obtiene de este residuo), se muestran en la siguiente figura.

Figura 23: Grafica del modelo cinético prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de BOPP a escala laboratorio



Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna® y los datos experimentales generados en el centro de procesos Industriales de UVG.

En el eje Y izquierdo se muestra la masa de productos acumulada que sale del reactor con la reacción de pirólisis en g, en el eje Y izquierdo se muestra la masa de reactivos remanentes en el reactor, y en el eje X el tiempo en horas de la reacción de pirólisis. El modelo azul presenta los datos y modelo de la disminución de concentración de reactivos, mientras que el verde, café y rojo, el progreso de la producción de biocombustible líquido, gaseoso y sólido respectivamente. Orden de reacción de 0.54, energía de activación de 241KJ/mol y factor de frecuencia de $5.8 \cdot 10^{17} \text{ min}^{-1}$.

Analizando el modelo con el que se generó la figura anterior, presentado de las ecuaciones 4 y 5, se pudo observar que las mismas consideran que el sistema se encuentra a condiciones ideales de variación de temperatura, que en la práctica y reactor utilizados no era viable realizar, por lo que se ideó una modificación al modelo para poder incluir la aproximación a la rampa de temperatura utilizada y modelar su cambio en el reactor. Esto se realizó con la ecuación de Boltzmann, que permite la predicción de condiciones crecientes tipo “S” y con ello fue posible realizar nuevamente la simulación. Las ecuaciones modificadas que se utilizan se muestran a continuación:

Ecuación 13: Consumo corregido de reactivo en función de la masa en el reactor y temperatura de reacción

$$-\frac{dW}{dt} = A \exp \left[-\frac{E_a}{R * \left(T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{t_{1/2} - t}{m}}} \right)} \right] (W - W_f)^n$$

Donde A es el denominado factor de frecuencia, E_a es la energía de activación de la reacción, R es la constante de los gases ideales que se emplea con el valor de 8.314 J/mol*K en los cálculos, T_1 es la temperatura inicial del sistema de reacción, T_2 es la temperatura final del sistema de reacción, $t_{1/2}$ y m son las constantes del modelo de Boltzmann, t es el tiempo de reacción, n es el orden de la reacción y W y W_f son la masa instantánea y final presentes en el reactor respectivamente.

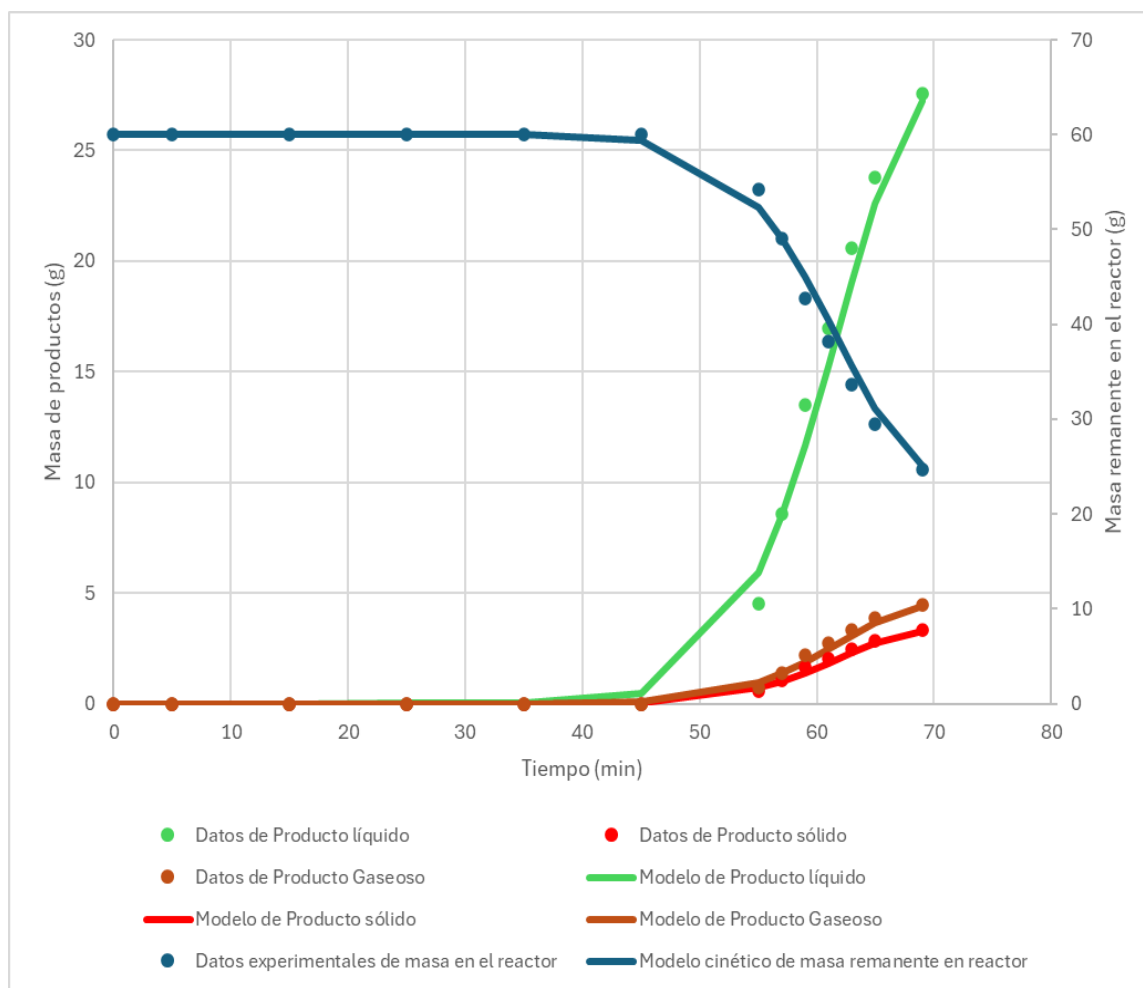
Ecuación 14: Generación corregida del producto i en función de la masa y temperatura de reacción

$$\frac{dN_i}{dt} = A \exp \left[-\frac{E_a}{R * \left(T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{t_{1/2} - t}{m}}} \right)} \right] (W - W_f)^n * Y_i$$

Donde N_i representa la masa producida del componente i (que es la fase gaseosa, líquida o sólida generada en la reacción) y Y_i representa el rendimiento del componente i en la reacción de pirólisis de cada residuo obtenido.

Con estas modificaciones al modelo y siempre para el caso del BOPP residual, se obtuvo un comparativo mejorado en donde el coeficiente de correlación mínimo obtenido fue de 92% para el modelo de decaimiento de reactivos en el reactor. Esta predicción, se muestra a continuación:

Figura 24: Grafica del modelo cinético corregido prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de BOPP a escala laboratorio



Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna® y los datos experimentales generados en el centro de procesos Industriales de UVG.

En el eje Y izquierdo se muestra la masa de productos acumulada que sale del reactor con la reacción de pirólisis en g, en el eje Y izquierdo se muestra la masa de reactivos remanentes en el reactor, y en el eje X el tiempo en horas de la reacción de pirólisis. El modelo azul presenta los datos y modelo de la disminución de concentración de reactivos, mientras que el verde, café y rojo, el progreso de la producción de biocombustible líquido, gaseoso y sólido respectivamente. Orden de reacción de 0.54, energía de activación de 241KJ/mol y factor de frecuencia de $5.8 \cdot 10^{17} \text{ min}^{-1}$.

De este comportamiento puede evidenciarse la necesidad del adecuado modelaje de la rampa de temperatura para contar con un mejor poder predictivo de los modelos.

Partiendo de un caso en el que el modelaje cinético se realizó para una rampa de temperatura simple, que es el caso anteriormente mostrado para el BOPP, se desarrollaron simulaciones de casos más complejos, en donde se llevó a cabo la reacción en condiciones de rampas de temperatura complejas. Estos casos confirmaron la necesidad de un seguimiento intensivo de la temperatura del sistema para generar predicciones con coeficiente de correlación adecuado para el escalamiento. Los casos desarrollados se muestran a continuación:

Caso de modelaje cinético de residuos de Aguacate

En el caso del modelaje de residuos de aguacate, se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, donde se obtuvo los datos experimentales del laboratorio del centro de procesos industriales de la Universidad del Valle de Guatemala y se modificaron las ecuaciones 4 y 5 para poder contar con un mejor ajuste. Específicamente la temperatura en este caso se simuló con la siguiente ecuación:

Ecuación 15: Modelo de simulación de la rampa de temperatura empleada para los residuos de aguacate

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{b + c * e^{\frac{d-t}{te}}} + \frac{f}{p + g * e^{\frac{T_3 - T_2}{q} \frac{t}{h}}} + \frac{\alpha}{p + \gamma * e^{\frac{T_4 - T_3}{\Omega} \frac{t}{h}}} + \frac{\beta}{p + \lambda * e^{\frac{T_5 - T_4}{\mu} \frac{t}{h}}}$$

Donde T es la temperatura dentro del reactor, t es el tiempo de reacción, T₁, T₂, T₃, T₄, y T₅ son las temperatura inicial y final de cada “grada” de temperatura empleada en el sistema de reacción y el resto son constantes con los siguientes valores:

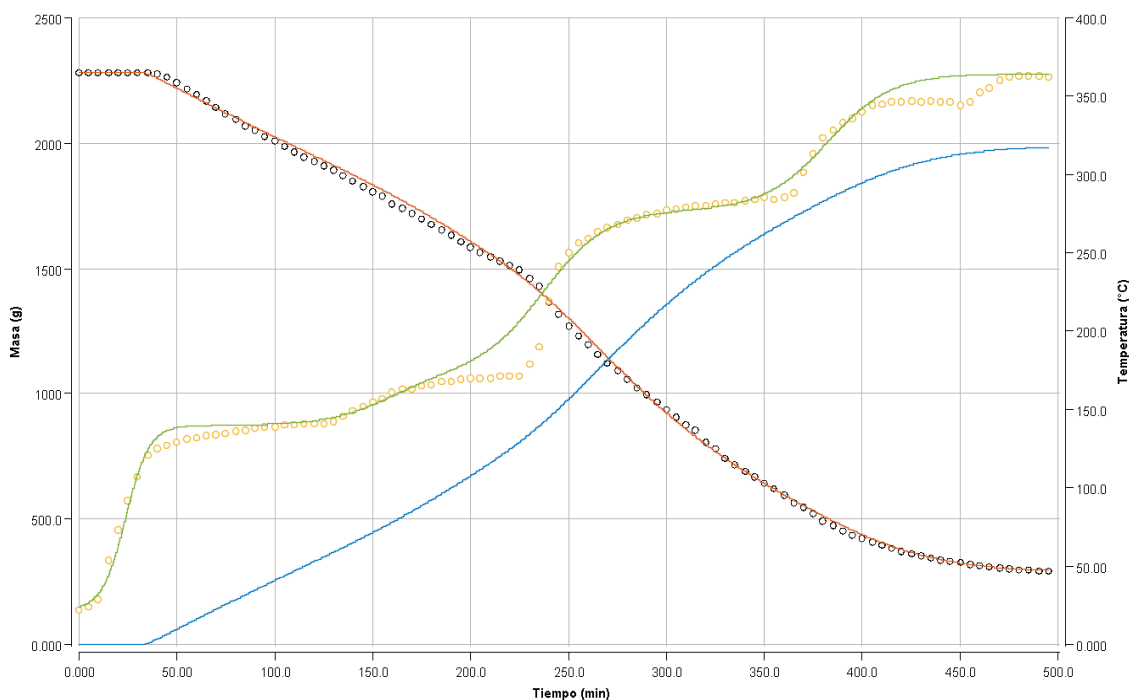
$$b = 1.018, c = 5.1, d = 0.667, te = 6.01, m = 0.1807, f = -0.01$$

$$g = 14.9, h = 16.211, j = -4.017, p = -3.10 * 10^{-4}, q = 72.0$$

$$\alpha = -0.032, \gamma = 3.826, \Omega = 17.24, \beta = -0.027, \lambda = 2.406, \mu = 4.806$$

De manera que, empleando las ecuaciones 4 y 5, pero con la rampa de temperatura simulada con la expresión de la ecuación 8, fue posible realizar la predicción del avance de la reacción con coeficientes de correlación superiores al 90% para la predicción de temperatura, masa de reactivos en el reactor y generación del biocombustible líquido. Esta simulación se realizó empleando un orden de reacción de 0.78, energía de activación de 19,150 kJ/kmol y factor de frecuencia de $2.93 * 10^{18} \text{ min}^{-1}$. El ajuste del modelo a los datos experimentales se muestra en la siguiente figura.

Figura 25: Grafica del modelo cinético corregido prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de Aguacate a escala laboratorio



Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna® y los datos experimentales generados en el centro de procesos Industriales de UVG.

En el eje Y izquierdo se muestra la masa de productos acumulada que sale del reactor con la reacción de pirólisis en g, en el eje Y derecho se muestra la temperatura en el reactor, y en el eje X el tiempo en minutos de la reacción de pirólisis. El modelo azul (línea continua) presenta la predicción de la generación de producto líquido, el modelo rojo (línea continua) muestra la predicción de los datos de la masa de reactivos en el reactor, ajustado a los datos experimentales presentados como puntos negros, y el modelo verde (línea continua) presenta la predicción de la temperatura ajustada a los datos experimentales, presentado como puntos amarillos.

Los coeficientes de correlación fueron de 90.8%, 97.4% y 98.2% para la temperatura, la masa de reactivos y la predicción de generación del biocombustible líquido.

Confirmando la posibilidad de emplear el modelo desarrollado con el ajuste de temperaturas para predecir el comportamiento de la reacción.

Caso de modelaje cinético de residuos de HDPE

En el caso del modelaje de residuos de HDPE, se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, donde se obtuvo los datos experimentales del laboratorio del centro de procesos industriales de la Universidad del Valle de Guatemala y se modificaron las ecuaciones 4 y 5 para poder contar con un mejor ajuste. Específicamente la temperatura en este caso se simuló con la siguiente ecuación:

Ecuación 16: Modelo de simulación de la rampa de temperatura empleada para los residuos de HDPE

$$T = T_1 + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} + R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}$$

Donde

$$R1 = \frac{(T_2 - T_1)e^{\frac{ta-t}{a}}}{a\left(1 + e^{\frac{ta-t}{a}}\right)} \quad R2 = \frac{(T_3 - T_2)e^{\frac{tb-t}{b}}}{b\left(1 + e^{\frac{tb-t}{b}}\right)} \quad R3 = \frac{(T_4 - T_3)e^{\frac{tc-t}{c}}}{c\left(1 + e^{\frac{tc-t}{c}}\right)} \quad R4 = \frac{(T_5 - T_4)e^{\frac{td-t}{d}}}{d\left(1 + e^{\frac{td-t}{d}}\right)}$$

$$R5 = \frac{(T_6 - T_5)e^{\frac{te-t}{e}}}{e\left(1 + e^{\frac{te-t}{e}}\right)} \quad R6 = \frac{(T_7 - T_6)e^{\frac{tf-t}{f}}}{f\left(1 + e^{\frac{tf-t}{f}}\right)} \quad R7 = \frac{(T_8 - T_7)e^{\frac{tg-t}{g}}}{g\left(1 + e^{\frac{tg-t}{g}}\right)} \quad R8 = \frac{(T_9 - T_8)e^{\frac{th-t}{h}}}{h\left(1 + e^{\frac{th-t}{h}}\right)}$$

$$R9 = \frac{(T_{10} - T_9)e^{\frac{ti-t}{i}}}{i\left(1 + e^{\frac{ti-t}{i}}\right)} \quad R10 = \frac{(T_{11} - T_{10})e^{\frac{tj-t}{j}}}{j\left(1 + e^{\frac{tj-t}{j}}\right)} \quad R11 = \frac{(T_{12} - T_{11})e^{\frac{tk-t}{k}}}{k\left(1 + e^{\frac{tk-t}{k}}\right)}$$

$$R12 = \frac{(T_{13} - T_{12})e^{\frac{tl-t}{l}}}{l\left(1 + e^{\frac{tl-t}{l}}\right)} \quad R13 = \frac{(T_{14} - T_{13})e^{\frac{tm-t}{m}}}{m\left(1 + e^{\frac{tm-t}{m}}\right)} \quad R14 = \frac{(T_{15} - T_{14})e^{\frac{tn-t}{n}}}{n\left(1 + e^{\frac{tn-t}{n}}\right)}$$

Y T es la temperatura dentro del reactor, t es el tiempo de reacción, y el resto son constantes que se ajustaron de acuerdo con la rampa de temperatura empleada. De manera que ajustando las constantes a los datos utilizados en la temperatura se tienen los siguientes valores:

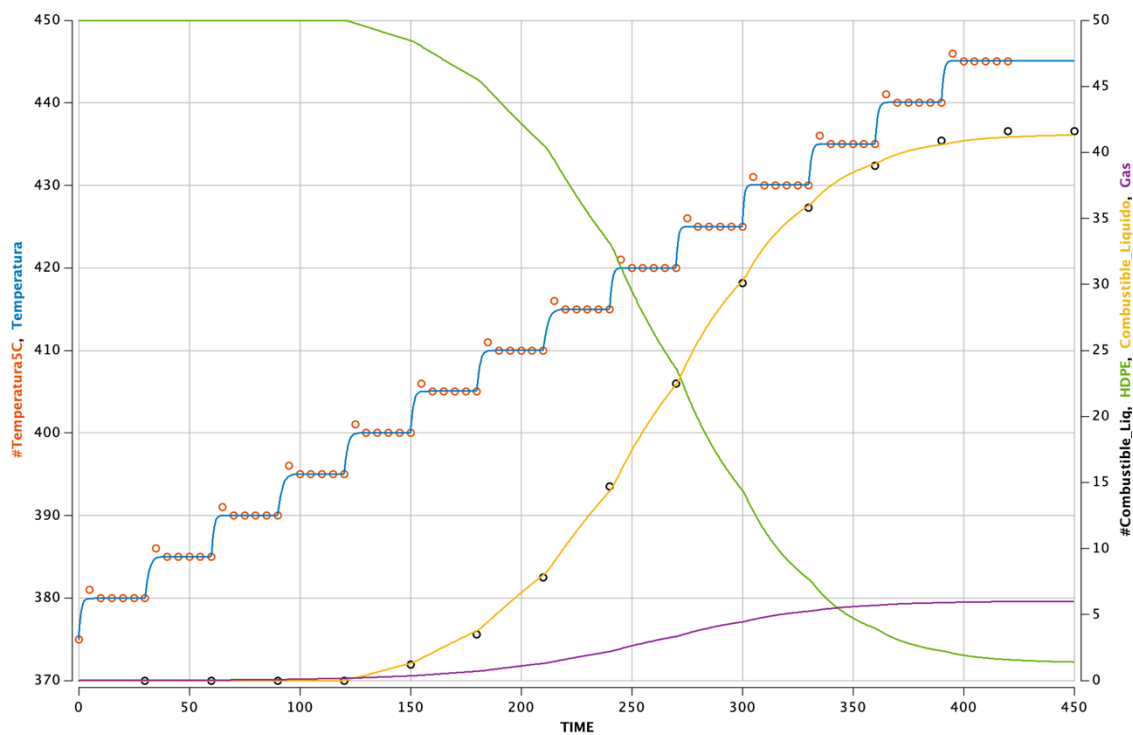
Cuadro 42: Valores experimentales de las constantes ajustadas para predecir la rampa de temperatura de incremento de 5°C cada 30min en la pirólisis de residuos de HDPE

Constante	Valor
z	1.52944
a	0.78
b	1.30
c	0.81
d	1.47
e	1.15
f	0.94
g	1.02
h	1.51
i	0.83
j	0.69
k	0.60
l	0.87
m	0.74
n	0.41
ta	0.41
tb	30.73
tc	60.44
td	90.8
te	120.62
tf	150.52
tg	180.53
th	210.81
ti	240.45
tj	270.37
tk	300.33
tl	330.47
tm	360.47

Fuente: Elaboración propia con los modelos cinéticos y la ecuación 16 simulada en Berkeley Madonna®.

De manera que, empleando las ecuaciones 4 y 5, pero con la rampa de temperatura simulada con la expresión de la ecuación 9, fue posible realizar la predicción del avance de la reacción con coeficientes de correlación superiores al 90% para la predicción de temperatura, masa de reactivos en el reactor y generación del biocombustible líquido. Esta simulación se realizó empleando un orden de reacción de 1.2, energía de activación de 189,007 kJ/kmol y factor de frecuencia de $6.78 \cdot 10^{20} \text{min}^{-1}$. El ajuste del modelo a los datos experimentales se muestra en la siguiente figura.

Figura 26: Grafica del modelo cinético corregido prediciendo el comportamiento de la masa de reactivos y productos de la reacción de pirólisis de residuos de HDPE a escala laboratorio



Fuente: Elaboración propia, utilizando el software Berkeley Madonna® y los datos experimentales generados en el centro de procesos Industriales de UVG.

En el eje Y derecho se muestra la masa de productos acumulada que sale del reactor con la reacción de pirólisis en g, en el eje Y izquierdo se muestra la temperatura en el reactor, y en el eje X el tiempo en minutos de la reacción de pirólisis. El modelo verde (línea continua) presenta la predicción del consumo de reactivos dentro del reactor, el modelo amarillo (línea continua) muestra la predicción de los datos de la generación de biocombustible líquido en el reactor, ajustado a los datos experimentales presentados como puntos negros, el modelo morado (línea continua) muestra el comportamiento de la generación de gas a lo largo de la reacción, y el modelo azul (línea continua) presenta la predicción de la temperatura ajustada a los datos experimentales, presentado como puntos naranja.

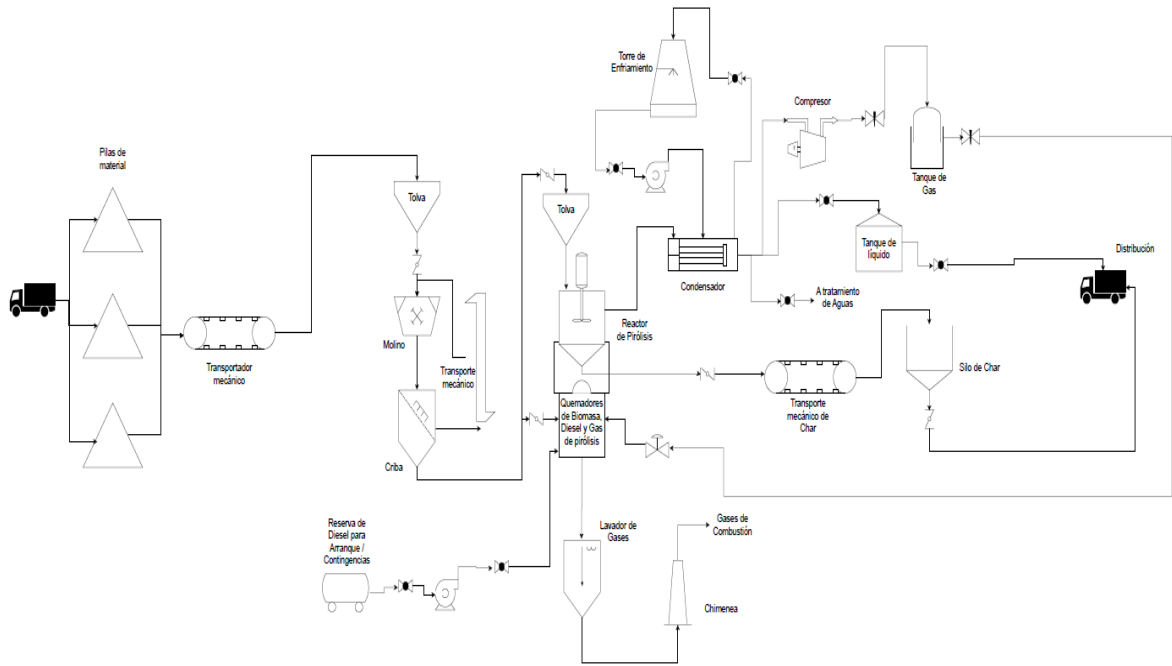
En este caso los coeficientes de correlación fueron de 97%, 98.2% y 98.4% para la predicción de la temperatura, del decaimiento de la concentración de reactivos en el reactor y de la generación de producto líquido respectivamente. Mostrando nuevamente la importancia de la precisión del seguimiento de los datos de temperatura en la capacidad predictiva del modelo.

Con estos resultados, se evidencia la posibilidad de utilizar los modelos cinéticos modificados para predecir el comportamiento de las diferentes reacciones de pirólisis, lo que genera una herramienta para predecir el tiempo de reacción necesario, que debe en todos los casos ser comparable. Si bien el tiempo no necesariamente es un parámetro que se prohibitivo, si se puede evidenciar que la inversión será prohibitiva para los casos donde los residuos demanden un tiempo de más de 10 veces comparada con los tiempos que se necesitan para los residuos comunes de origen orgánico.

3.4.11 Dimensionamiento y modelos de simulación de procesos para la predictibilidad del escalamiento de la reacción de pirólisis

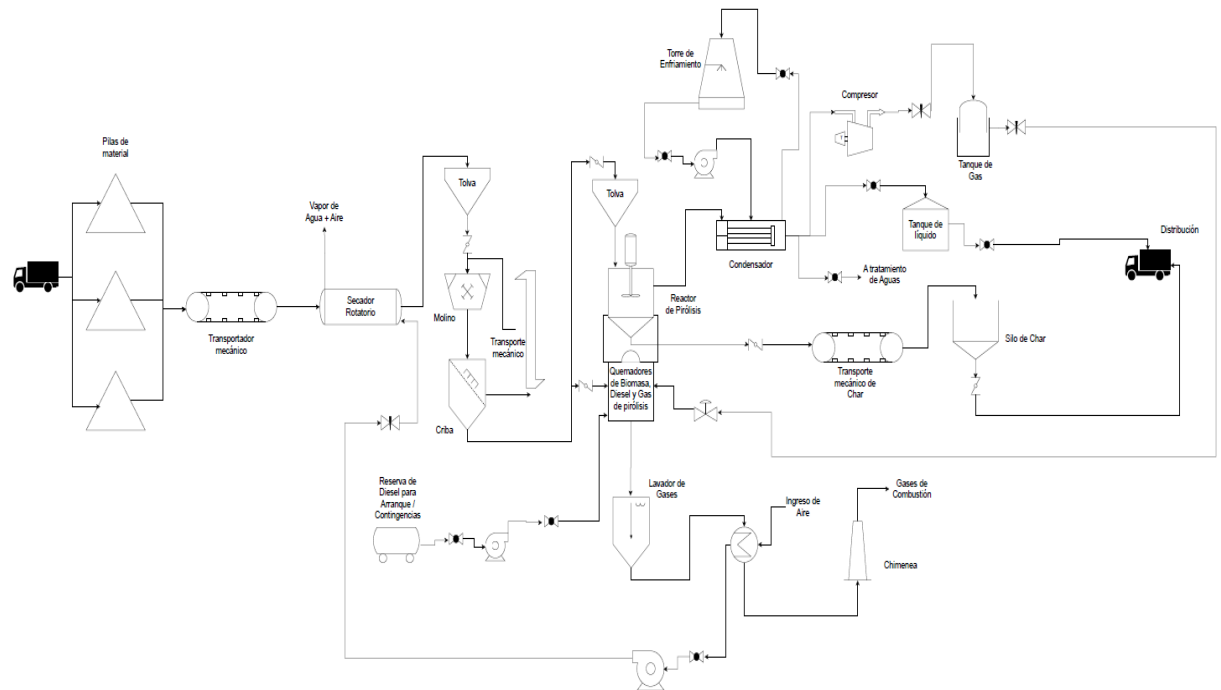
Para poder escalar los procesos necesarios a un nivel industrial es necesario emplear las técnicas básicas de diseño de plantas que parten de la definición de los equipos y los flujos necesarios a tratar de residuos sólidos, para determinar las dimensiones y características de los equipos principales y con ello estimar la capacidad de la planta. Para esto, se emplearon las definiciones y conceptos presentados por (Peters, 2003) y (Perry, 2008), proporcionando la lógica necesaria de las operaciones unitarias y posteriormente de los equipos del proceso. Con estas definiciones, se elaboró un diagrama general de equipos, que muestra el proceso en dos variantes diferentes y que se presenta a continuación:

Figura 27: Diagrama de Equipo del tratamiento para la pirólisis de residuos “secos”



Fuente: Elaboración propia.

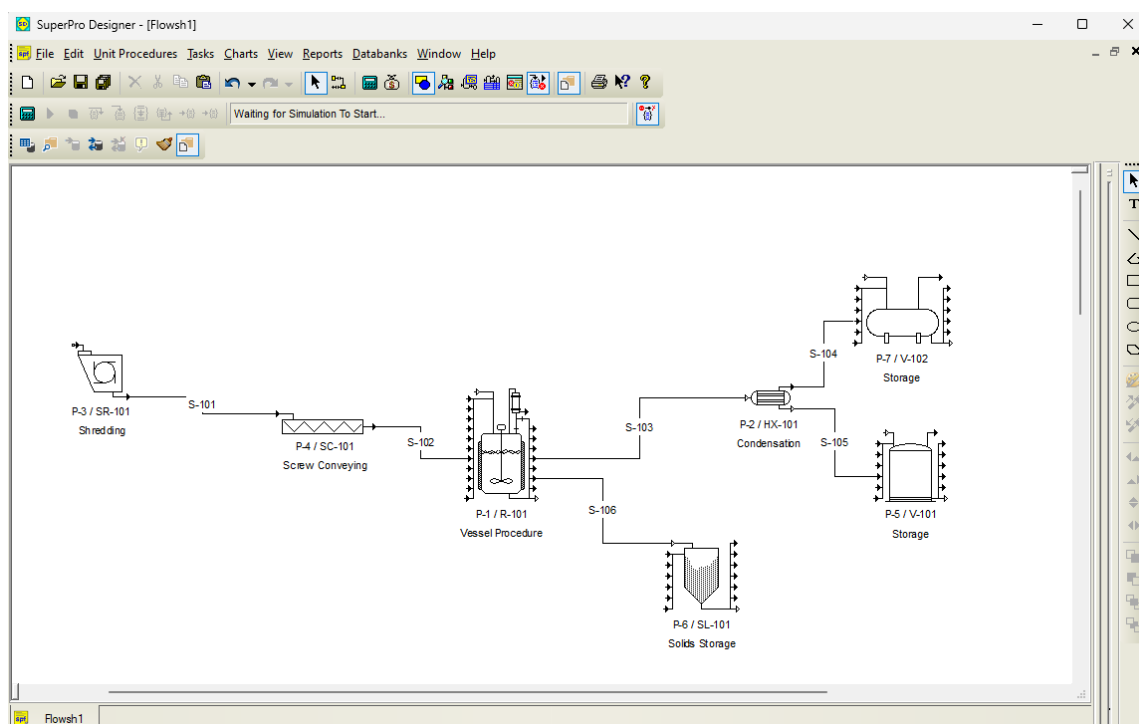
Figura 28: Diagrama de Equipo del tratamiento para la pirólisis de residuos Húmedos



Fuente: Elaboración propia.

Estas Figuras muestran el resumen diagramático del proceso de ingeniería, pero que conlleva criterios de diseño que son flexibles en dependencia de condiciones y contexto. Se muestra que de acuerdo con todo lo analizado hasta el momento, se debe contar con al menos dos alternativas de proceso, una para los residuos sólidos que se encuentran secos o con contenido de humedad menor al 10%, y otra para los residuos sólidos húmedos o con contenido de humedad mayor al 10%. Este criterio se basa en las observaciones sobre como el poder calorífico se puede influenciar con el porcentaje de humedad del residuo, por lo que, de no secarlo, todos los modelos anteriores generarían errores en su deducción y el biocombustible sólido y líquido producidos tendrán bajo potencial de aplicación.

Figura 29: Pantalla de simulación de proceso generada en el software SuperPro Designer® para el proceso de pirólisis planteado



Se muestra la entrada a la izquierda y parte de los equipos colocados en el orden del flujo del proceso de acuerdo con el diseño previamente elaborado. Fuente: Elaboración propia, utilizando el software SuperPro Designer® y el diseño de proceso elaborado en el centro de procesos Industriales de UVG.

Empleando esto, se generó un modelo en el simulador SuperPro Designer®, cuya pantalla principal se muestra en la figura anterior y que facilita el dimensionamiento del equipo necesario y brinda el listado de equipos e inversión necesarios a considerar para poder efectuar posteriormente las evaluaciones económicas. El modelo consiste en el ingreso y definición de los equipos anteriormente definidos en los diagramas y el establecer una base de cálculo que permita el dimensionamiento y posterior evaluación. Tomando entonces como referencia volúmenes reportados para este tipo de tratamientos (Perry, 2008), se utilizó una base de cálculo de 6t/d de residuos sólidos y se emplearon las características de material del HDPE como parámetros principales de diseño, aunque el simulador permite variar todos estos parámetros. Para la simulación se emplearon las variables de entrada que se muestran a continuación:

Cuadro 43: Parámetros base del diseño del proceso utilizados en las simulaciones con SuperPro Designer®

Parámetro Base para el diseño	Valor definido para simulación
Dimensiones de partícula Máximo de ingreso (m)	1.6
Humedad Máxima (%m/m)	10%
Capacidad de procesamiento del residuo (t/d)	6
Tipo de Operación	Por lotes

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 44: Características de los residuos de HDPE utilizados en la entrada del proceso durante las simulaciones con SuperPro Designer®

Composición	Base de cálculo utilizada
Carbono (C) [%]	85
Hidrógeno (H) [%]	13
Oxígeno (O) [%]	0.5
Nitrógeno (N) [%]	0.5
Azufre (S) [%]	0.5
Cloro (Cl) [%]	0.5
Metales [ppm]	30

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 45: Características de los productos obtenidos de la reacción de pirólisis de residuos de HDPE utilizados en la salida del proceso durante las simulaciones con SuperPro Designer®

Variable de salida	Valor utilizado con base de simulación
Producto Sólidos [%]	7.50%
Producto Líquido [%]	80%
Producto Gaseoso [%]	12.50%
Poder calorífico sólido [MJ/kg]	43
Poder calorífico líquido [MJ/kg]	44
Poder calorífico gaseoso [MJ/m ³]	27

Fuente: Elaboración propia.

Con esto, fue posible el establecer las principales variables de diseño del proceso a la escala propuesta, considerando que el reactor de pirólisis es el elemento más especializado y que conlleva la mayor demanda de detalle técnico y que el condensador y el molino son los equipos que mayor potencia demandan en toda la operación, lo que se traduce en costos de operación. Estas variables son determinantes para el potencial de escalar un proceso y para establecer una prefactibilidad técnica ante la generación de dimensiones coherentes con equipos existentes a nivel industrial. De manera que, aplicando la simulación anteriormente descrita y con las variables definidas, se obtuvo las siguientes dimensiones para los principales equipos del proceso:

Cuadro 46: Características clave de los equipos del proceso de pirólisis de residuos de HDPE obtenidos con las simulaciones con SuperPro Designer® y flujo de ingreso de 6t/d de residuos

Característica clave del equipo diseñada	Valor obtenido con base en la simulación
Diámetro del reactor (m)	2
Largo del Reactor (m)	6.0
Volumen de diseño del reactor (m ³)	22.62
Potencia del molino (kW)	6
Área de Condensador (m ²)	20
Consumo de energía térmica (kJ)	2,400,000

Fuente: Elaboración propia.

De manera que, tomando en cuenta que la simulación basada en la definición de equipos necesarios reflejó datos coherentes con dimensiones de equipos existentes en la realidad y que la simulación permite cambiar las definiciones de entrada y salida para proveer de los datos base de dimensionamiento, se considera que la tercera herramienta presentada (la simulación de procesos), es efectiva para determinar la prefactibilidad técnica desde la perspectiva del escalamiento a un nivel industrial.

Es importante mencionar que el modelo cinético antes presentado es un insumo vital que el software necesita para poder establecer el volumen y dimensiones del reactor de pirólisis y, por lo tanto, el resto de los parámetros principales de los equipos, que dependen del reactor por ser el equipo central del proceso de pirólisis.

3.4.12 Validación de modelos de simulación de procesos para la predictibilidad del escalamiento de la reacción de pirólisis empleando casos referenciales

La validación de modelos de simulación de procesos se realizó utilizando datos referenciales obtenidos de opciones industriales que se ofrecen para el tratamiento de residuos plásticos (Beston, 2025). Estos datos referenciales son de especial importancia para poder generar una certeza sobre el funcionamiento del modelo y la capacidad que el mismo tiene para predecir las principales características de los equipos necesarios para el proceso de pirólisis. A pesar de que estos datos son genéricos para el tratamiento de cualquier tipo de residuo plástico, se emplearon los datos de HDPE como forma de comparación de la capacidad del simulador con 4 flujos diferentes. Los resultados obtenidos de la simulación y las especificaciones referenciales se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 47: Comparativo de valores referenciales y simulados de las características clave de los equipos del proceso de pirólisis de residuos plásticos a diferentes flujos de entrada

Característica clave del equipo diseñada	Valor Referencial	Valor obtenido con simulación	Valor Referencial	Valor obtenido con simulación	Valor Referencial	Valor obtenido con simulación	Valor Referencial	Valor obtenido con simulación
Flujo de Entrada máximo (t/d)		3		6		16		35
Diámetro del reactor (m)	1.4	1.25	2.2	2	2.8	2	1.8	2
Largo del Reactor (m)	4.9	5.0	6.0	6.0	7.1	13.2	18.5	14.4
Volumen de diseño del reactor (m3)	7.54	6.80	22.81	22.62	43.72	41.47	47.08	45.24
Potencia del molino (kW)	4	3.5	5.5	6	7.5	7	15	12.5
Área de Condensador (m2)	7.58	8.5	17.8	20	35.6	36.2	74.4	82.5
Consumo de energía térmica (kJ)	1,673,600	1,400,000	2,510,400	2,400,000	3,347,200	3,400,000	10,460,000	10,200,000
Tipo de Operación	Por lotes	Por lotes	Por lotes	Por lotes	Por lotes	Por lotes	Continua	Continua

Fuente: Elaboración propia con el software SuperPro Designer® y datos referenciales de (Beston,2025).

De la comparación de los datos se observa que las dimensiones de los equipos referenciales, sus volúmenes, potencias y áreas tienden a estar en el mismo orden de magnitud que los equipos simulados. Evidenciando algunas diferencias atribuibles al uso de los datos de HDPE en el proceso de simulación. Para contrastar de mejor forma estas diferencias, se elaboró el comparativo que se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 48: Error porcentual de los valores simulados en comparación de los referenciales de las características clave de los equipos del proceso de pirólisis de residuos plásticos a diferentes flujos de entrada

Característica clave del equipo diseñada	Error porcentual de la simulación			
Flujo de Entrada máximo (t/d)	3	6	16	35
Diámetro del reactor (m)	-11%	-9%	-29%	11%

Largo del Reactor (m)	2%	0%	86%	-22%
Volumen de diseño del reactor (m3)	-10%	-1%	-5%	-4%
Potencia del molino (kW)	-13%	9%	-7%	-17%
Área de Condensador (m2)	12%	12%	2%	11%
Consumo de energía térmica (kJ)	-16%	-4%	2%	-2%

Fuente: Elaboración propia con el software SuperPro Designer® y datos referenciales de (Beston,2025).

Con esto, se evidencia que en todos los casos la simulación presentó la necesidad de un menor volumen de reactor necesario de pirólisis en comparación con lo ofrecido comercialmente, mientras que el área de condensación tiene el comportamiento inverso, donde la simulación genera la necesidad de mayores áreas de condensación. Esto es atribuible a la velocidad de conversión hacia biocombustibles empleada en la simulación, que tiene su base en el modelaje realizado para residuos de HDPE, pero que no contempla el procesamiento de otros polímeros. Mientras que el consumo energético y la potencia del molino tienen en casi todos los casos un menor valor simulado comparado con el valor referencial, lo que nuevamente se atribuye a la consideración de diferentes plásticos y a la oferta que se tiene en el mercado de equipos. A pesar de estos contrastes, se observa que las simulaciones producen características de equipo que no distan en más de 20% de los valores que el mercado ofrece, con lo que el modelo genera la certeza de poderse aplicar como una forma de dimensionar equipos industriales y al generar procesos con dimensiones coherentes, brindar la información necesaria sobre la prefactibilidad técnica.

3.4.13 Modelo de flujo de caja para la determinación de flujos de efectivo e indicadores financieros

El análisis de prefactibilidad del tratamiento de residuos sólidos tiene además de la parte técnica, una parte económica que debe evaluarse y que es vital en la toma de decisiones de la potencial aplicación de la técnica analizada en esta tesis doctoral. A pesar de la gama amplia de posibilidades que permiten la evaluación económica de proyectos, el punto de partida para evaluarlos es el planteamiento de un flujo de caja y de estados de

resultados del proyecto, de manera que, con los mismos puedan calcularse indicadores financieros proyectados, que evidencien la prefactibilidad económica del tratamiento con pirólisis. En esta sección se muestra las herramientas desarrolladas y aplicadas para la evaluación económica necesaria.

Como punto de partida de la evaluación económica, se obtuvo los valores de potenciales precios de venta de biocombustibles de forma referencial (Ministerio de Energía y Minas, 2020), costos de producción por tonelada con la simulación efectuada en SuperPro Designer®, gastos administrativos y costos de separación y clasificación de forma referencial (Peters, 2003). Los costos de producción dependen de la escala, por lo que se definió como punto de partida una escala de 6t/d, que puede cambiarse en las herramientas desarrolladas para poder evaluar otras escalas. Dicha escala se empleó también para evaluar tres diferentes escenarios: 1) El escenario donde el modelo de negocios contempla el cobro del tratamiento del 100% de los residuos que la planta procesa, además de la venta de biocombustibles, 2) el escenario donde el modelo de negocios contempla el cobro del tratamiento del 50% de los residuos que la planta procesa, además de la venta de biocombustibles, y 3) el escenario donde el modelo solamente vende biocombustibles. Es importante notar que, ante las necesidades energéticas, el proceso contempla solamente la venta de biocombustibles líquido y sólido, ya que se considera un aprovechamiento del 100% del biocombustible gaseoso para la energía térmica necesaria en el proceso.

Los datos utilizados para la evaluación económica de escenarios con base referencial y de las simulaciones de proceso, se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 49: Parámetros empleados en la simulación de flujos de efectivo con los escenarios especificados para la reacción de pirólisis de residuos sólidos

Código	Parámetro utilizado	Valor empleado
A	Precio de venta promedio combustibles líquidos en Guatemala (USD/gal)	\$ 3.75
B	Precio de venta de promedio de combustibles sólidos en Guatemala (USD/t)	\$ 100.00

C	Precio de venta promedio de combustibles líquidos para caldera en Guatemala (USD/gal)	\$	2.75
D	Precio de venta de incursión de biocombustibles líquidos de pirólisis (USD/gal)	\$	1.50
E	Precio de venta de incursión de biocombustibles sólidos de pirólisis (USD/t)	\$	50.00
F	Precio de tratamiento de residuos sólidos (USD/t)	\$	70.00
G	Costos de Operación simulados (USD/t)	\$	200.00
H	Costos de Separación y clasificación (USD/t)	\$	50.00
I	Gastos Administrativos en ciudad de Guatemala (USD/año)	\$	50,000.00
J	Impuesto sobre ganancias		5%
K	Crecimiento anual proyectado		8%
L	Inversión por cada línea de hasta 6t/d	\$	250,000.00
M	Inversión en terreno e infraestructura	\$	200,000.00

Fuente: Los parámetros A, B, C, J se obtuvieron de (Ministerio de Energía y Minas, 2020), G, L y M se obtuvieron con el software SuperPro Designer® y el resto de los parámetros fueron valores propuestos durante el desarrollo de la simulación con los flujos de efectivo.

A partir de esto, se desarrolló un simulador en Microsoft Excel® para el flujo de efectivo, donde fue posible el ingresar todos estos parámetros para generar el flujo de efectivo correspondiente a cada uno de los escenarios planteados. Esto se muestra a continuación:

Cuadro 50: Simulación de flujos de efectivo con los escenarios especificados para la reacción de pirólisis de residuos sólidos tomando como base la escala de 6t/d

	Año												Total proyectado	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
Toneladas procesadas con Cobro por tratamiento de residuos completo (t) - escenario 1	0	0	1680	1814	1960	2116	2286	2468	2666	2879	3110	3358	3627	27964
Toneladas procesadas con Cobro por tratamiento de residuos 50% (t) - escenario 2	0	0	840	907	980	1058	1143	1234	1333	1440	1555	1679	1813	13982
Toneladas procesadas (t) - escenario 3	0	0	1680	1814	1960	2116	2286	2468	2666	2879	3110	3358	3627	27964
Ingresos por tratamiento escenario de cobro de tratamiento completo	\$ -	\$ -	\$ 117,600.00	\$ 127,008.00	\$ 137,168.64	\$ 148,142.13	\$ 159,993.50	\$ 172,792.98	\$ 186,616.42	\$ 201,545.73	\$ 217,669.39	\$ 235,082.94	\$ 253,889.58	\$ 1,957,509.33
Ingresos por tratamiento escenario de cobro de tratamiento 50%	\$ -	\$ -	\$ 58,800.00	\$ 63,504.00	\$ 68,584.32	\$ 74,071.07	\$ 79,996.75	\$ 86,396.49	\$ 93,308.21	\$ 100,772.87	\$ 108,634.70	\$ 117,541.47	\$ 126,944.79	\$ 978,754.66
Ingresos por venta de biocombustibles	\$ -	\$ -	\$ 478,650.20	\$ 516,942.21	\$ 558,297.59	\$ 602,961.40	\$ 651,198.31	\$ 703,294.18	\$ 759,557.71	\$ 820,322.33	\$ 885,948.11	\$ 956,823.96	\$ 1,033,369.88	\$ 7,967,365.87
Costos de Operación	\$ -	\$ -	\$ -336,000.00	\$ -362,880.00	\$ -391,910.40	\$ -423,263.23	\$ -457,124.29	\$ -493,694.23	\$ -533,189.77	\$ -575,844.95	\$ -621,912.55	\$ -671,665.55	\$ -725,398.80	\$ -5,592,883.79
Costos de Separación y Clasificación	\$ -	\$ -	\$ -84,000.00	\$ -90,720.00	\$ -97,977.60	\$ -105,815.81	\$ -114,281.07	\$ -123,423.56	\$ -133,297.44	\$ -143,961.24	\$ -155,478.14	\$ -167,916.39	\$ -181,349.70	\$ -1,398,220.95
Gastos Administrativos	\$ -	\$ -	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -50,000.00	\$ -550,000.00
Impuestos - escenario 1	\$ -	\$ -	\$ -6,312.51	\$ -7,017.51	\$ -7,778.91	\$ -8,601.22	\$ -9,489.32	\$ -10,448.47	\$ -11,484.35	\$ -12,603.09	\$ -13,811.34	\$ -15,116.25	\$ -16,525.55	\$ -119,188.52
Impuestos - escenario 2	\$ -	\$ -	\$ -3,372.51	\$ -3,842.31	\$ -4,349.70	\$ -4,897.67	\$ -5,489.48	\$ -6,128.64	\$ -6,818.94	\$ -7,564.45	\$ -8,369.61	\$ -9,239.17	\$ -10,178.31	\$ -70,250.79
Impuestos - escenario 3	\$ -	\$ -	\$ -432.51	\$ -667.11	\$ -920.48	\$ -1,194.12	\$ -1,489.65	\$ -1,808.82	\$ -2,153.52	\$ -2,525.81	\$ -2,927.87	\$ -3,362.10	\$ -3,831.07	\$ -21,313.06
Total Flujo Operativo Anual escenario 1	\$ -	\$ -	\$ 119,937.69	\$ 133,332.70	\$ 147,799.32	\$ 163,423.27	\$ 180,297.13	\$ 198,520.90	\$ 218,202.57	\$ 239,458.77	\$ 262,415.48	\$ 287,208.71	\$ 313,985.41	\$ 2,264,581.94
Total Flujo Operativo Anual escenario 2	\$ -	\$ -	\$ 64,077.69	\$ 73,003.90	\$ 82,644.22	\$ 93,055.75	\$ 104,300.21	\$ 116,444.23	\$ 129,559.77	\$ 143,724.55	\$ 159,022.51	\$ 175,544.32	\$ 193,387.86	\$ 1,334,765.01
Total Flujo Operativo Anual escenario 3	\$ -	\$ -	\$ 5,277.69	\$ 9,499.90	\$ 14,059.90	\$ 18,984.69	\$ 24,303.46	\$ 30,047.74	\$ 36,251.56	\$ 42,951.68	\$ 50,187.82	\$ 58,002.84	\$ 66,443.07	\$ -
Inversión en equipos	\$ -200,000.00	\$ -250,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -250,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -500,000.00
Inversión en terrenos e infraestructura	\$ -200,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -200,000.00
Total Flujo de Inversión	\$ -200,000.00	\$ -250,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -250,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -700,000.00
	Año												Total proyectado	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		12
Flujo de efectivo total visto desde la empresa que adopta el proyecto (Escenario 1)	\$ -200,000.00	\$ -250,000.00	\$ 119,937.69	\$ 133,332.70	\$ 147,799.32	\$ 163,423.27	\$ -69,702.87	\$ 198,520.90	\$ 218,202.57	\$ 239,458.77	\$ 262,415.48	\$ 287,208.71	\$ 313,985.41	\$ 1,564,581.94
Flujo de efectivo total visto desde la empresa que adopta el proyecto (Escenario 2)	\$ -200,000.00	\$ -250,000.00	\$ 64,077.69	\$ 73,003.90	\$ 82,644.22	\$ 93,055.75	\$ -145,699.79	\$ 116,444.23	\$ 129,559.77	\$ 143,724.55	\$ 159,022.51	\$ 175,544.32	\$ 193,387.86	\$ 634,765.01
Flujo de efectivo total visto desde la empresa que adopta el proyecto (Escenario 3)	\$ -200,000.00	\$ -250,000.00	\$ 5,277.69	\$ 9,499.90	\$ 14,059.90	\$ 18,984.69	\$ -225,696.54	\$ 30,047.74	\$ 36,251.56	\$ 42,951.68	\$ 50,187.82	\$ 58,002.84	\$ 66,443.07	\$ -343,989.65

Fuente: Elaboración propia, considerando una inversión en maquinaria en el año 1 ante la necesidad de contar con investigación y desarrollo para elaborar modelos técnicos previo a la operación.

Del cuadro anterior puede observarse que, de los escenarios evaluados, el escenario 1 posee el panorama más favorable, derivado de los ingresos extra de cobrar por el tratamiento. Comparado con los otros escenarios, que se observan más limitados y sensibles a cualquier variación que el mercado de combustibles o de tratamiento de residuos pueda tener. Ahora bien, partiendo de este flujo de efectivo, se plantearon los indicadores económicos propios de la evaluación de prefactibilidad, que con el mismo simulador fue posible calcular. Los indicadores propuestos en este caso fueron: 1) el valor presente neto del proyecto evaluado, 2) La tasa Interna de Retorno, 3) El tiempo de recuperación de la inversión y 4) el indicador costo/beneficio. Estos indicadores se calcularon como se muestra en el marco teórico y son la base de la toma de decisiones en cuanto a prefactibilidad de proyectos, que, basado en el simulador, se pueden calcular. De manera que, efectuando el cálculo con los parámetros anteriormente establecidos y con una línea de producción de 6t/d, se obtienen los siguientes resultados de indicadores financieros:

Cuadro 51: Indicadores financieros obtenidos para la pirólisis de residuos sólidos a partir del flujo de efectivo a 10 años después de la inversión

Indicador	Escenario		
	1	2	3
WACC	12%	12%	12%
TIR	26.5%	12.8%	-10.1%
VPN	Q 430,578.13	Q19,471.59	-Q 413,272.13
Tiempo de Recuperación de la inversión (años)	3.5	8	N/A
VAI	Q 4,388,155.31	Q3,955,411.58	Q 3,522,667.85
VAC	-Q3,356,102.46	-Q3,356,102.46	-Q3,356,102.46
VA(inversión)	-Q490,957.20	-Q490,957.20	-Q490,957.20
VAC+ VAInv	-Q3,847,059.66	-Q3,847,059.66	-Q3,847,059.66
Beneficio/Costo	Q1.14	Q1.03	Q0.92

Fuente: Elaboración propia.

De estos indicadores puede observarse la misma tendencia favorable del escenario 1 frente a los otros escenarios y lo negativo que presenta el escenario 3 ante el limitado flujo de efectivo que la venta de biocombustibles genera.

Esto evidencia, además, que con la simulación de flujos de efectivo es posible calcular los indicadores financieros necesarios para la evaluación de prefactibilidad técnica de los proyectos de pirólisis de residuos sólidos en Guatemala.

3.4.14 Validación de Modelos de flujo de caja para la determinación de flujos de efectivo e indicadores financieros con datos referenciales de rentabilidad

Ante la necesidad de contar con una forma comparativa para poder evaluar los resultados obtenidos con casos prácticos que permitan consolidar la herramienta propuesta, se procedió a realizar un comparativo con casos presentados en la literatura para la escala de alrededor de 6t/d y de esa forma evaluar el uso de la simulación y generación de indicadores financieros. El comparativo se desarrolló a partir de los principales indicadores financieros reportados y se muestra a continuación:

Cuadro 52: Comparativo de casos referenciales y escenarios para el tratamiento de residuos sólidos con la técnica de pirólisis

Caso analizado	Volumen máximo de tratamiento (t/d)	Tasa Interna de Retorno	Tiempo de Recuperación de la Inversión (años)
Escenario 1	6	26.50%	3.5
Escenario 2	6	12.80%	8
Escenario 3	6	-10.10%	N/A
Caso 1 Referencial	5	27%	4
Caso 2 Referencial	8	32%	3
Caso 3 Referencial	6	31%	3
Caso 4 Referencial	6	22%	5

Fuente: Elaboración propia. El Caso 1 se obtuvo de (Miandad, 2019), no se especifica en el mismo si se cobra por el tratamiento o los parámetros de los cálculos. Mientras que

los casos 2 a 4 se obtuvieron de (Beston,2025), contemplan un cobro por tratamiento que no se especifica y son plantas instaladas en diferentes ubicaciones del mundo.

De este comparativo se muestra que los escenarios que se generan con la simulación se encuentran alineados con los órdenes de magnitud de las tasas internas de retorno y los tiempos de recuperación de los casos reportados en la literatura. A pesar de que estos resultados dependen de una serie compleja de factores que van desde los materiales y el tipo de tratamiento usado, hasta las ubicaciones y mercados donde se desarrollan los proyectos, la tendencia se muestra a tener tiempos comparables de recuperación de la inversión y tasas internas de retorno en el mismo rango, y eso genera certeza sobre los cálculos efectuados. Y sobre todo, esto evidencia que las herramientas desarrolladas son efectivas para la evaluación y comparación de los proyectos, aún y cuando puedan modificarse con diferentes consideraciones que puedan cambiar entre circunstancias de cada proyecto.

3.5 Redacción de resultados y discusión

En esta sección se presentan las principales tendencias encontradas con los resultados encontrados durante el desarrollo de la investigación. Esto genera la posibilidad de contraste con respecto a las teorías encontradas y los datos referenciales, que permiten llegar posteriormente a las conclusiones de la investigación realizada. Los resultados son discutidos y presentados en secciones correspondientes a la progresión de la investigación.

3.5.1 Fundamentos teóricos y avances científicos

Partiendo de los datos encontrados durante la investigación referencial, pudo determinarse que existen 3 posturas generales respecto a la aplicación de la técnica de pirólisis de residuos sólidos: 1) los autores que visualizan una viabilidad negativa de tratar residuos sólidos con esta técnica, 2) los que reportan una viabilidad parcial, es decir, que solamente estudiaron o visualizan el tratamiento aplicado a un tipo particular de residuos, y 3) los autores que reportan el potencial de la técnica, como una posible

Biorrefinería, que abarca varios posibles tipos de residuos. A pesar de esto, no encontraron publicaciones que provean de una ruta de evaluación de la aplicación de la técnica de pirólisis.

Por otro lado, se determinó que para determinar la viabilidad de un proyecto en la fase de prefactibilidad como menciona Kerzner (2017), existen principalmente dos tipos de evaluaciones necesarias, que son la técnica y la económica. Para realizar el primer tipo de evaluaciones, es necesario el poder conocer lo que se obtendrá al aplicar la pirólisis a cada uno de los tipos de residuos posibles como punto de partida, esto se obtiene a partir de simulaciones matemáticas que parten de la composición de los materiales. Como segundo paso, es necesario conocer el comportamiento de la reacción y su escalamiento a la industria, lo que se realiza con estudios cinéticos, diagramación y simulación de equipos y procesos industriales. Todos estos aspectos técnicos representan herramientas necesarias para este tipo de evaluaciones.

Mientras que de acuerdo con Kerzner (2017) y PMI (2017), la evaluación económica requiere de una proyección de los flujos de caja del proyectos, que generan indicadores financieros necesarios para la evaluación. Con estos indicadores es posible hacer escenarios y determinar las condiciones más atractivas para la aplicación de la técnica.

Finalmente, pudo observarse que a pesar de que en Guatemala existen los marcos legales propicios para investigar y poder aplicar la técnica, en realidad no se cuenta con un marco normativo sólido y basado en principios científicos, que generen la necesidad de aplicar la técnica y la incentiven, por lo que se valora necesaria esta mejora en el país. Además, el contexto social y la historia del país ha llevado en una línea donde el tratamiento de residuos no es culturalmente una preocupación y esto ocasiona limitantes de tipos social, que no se abarcan en este estudio, pero que son importantes a considerar en cualquier potencial proyecto.

3.5.2 Diagnóstico de categorías de Residuos de la ciudad de Guatemala

La ausencia de datos actualizados para la capital del país indica una brecha crítica en la planificación ambiental urbana, que puede derivar en políticas de manejo de residuos no contextualizadas. Sin embargo, los porcentajes de las categorías de residuos obtenidos con datos urbanos, contrasta con los datos mostrados por Kaza et al. (2018), mostrando que en ciudad de Guatemala se tiene una composición mayormente de residuos alimenticios u orgánicos con 56% de los residuos totales, mientras que Kaza et al. (2018) reportan porcentajes mundiales de 44% para este tipo de residuos. A pesar de esto, los autores mencionados publican que existe una correlación entre el PIB y dichos porcentajes y para Latinoamérica un valor promedio de 52%, con lo que ante la situación económica investigada para el país de Guatemala, el incremento sobre la media mundial hace sentido, así como la disminución de la media porcentual de otros tipos de residuos más abundantes, como los plásticos o papel y cartón.

Por otro lado, se determinó que, los residuos orgánicos (alimenticios y de jardinería), los plásticos (PET, HDPE, poliestireno), papel y cartón, y los residuos sanitarios generados en la ciudad de Guatemala, muestran composiciones ricas en carbono e hidrógeno, elementos esenciales para procesos termoquímicos como la pirólisis, siendo los residuos de plástico los que tienen la mejor combinación elemental. Los análisis mostraron que estos materiales alcanzan rendimientos importantes en la producción de biocombustibles, con poder calorífico útil en la fracción gaseosa y líquida. De manera que, como punto de partida puede establecerse que la viabilidad está directamente relacionada con la naturaleza de los residuos, su composición química y su grado de contaminación con otras sustancias.

Además, partiendo del instrumento de evaluación de fuentes referenciales, fue posible generar una base de datos con la composición elemental y propiedades de categorías de residuos definidas de acuerdo con MARN (2021a), así como sus cinéticas de reacción, y rendimientos y poderes caloríficos de los productos generados. Esto proporcionó los datos necesarios para la generación de las herramientas desarrolladas en la investigación y reveló referencialmente que las categorías anteriormente mencionadas son las que

generan los biocombustibles con los mayores rendimientos y mejores propiedades técnicas. Dentro de ellas, son los plásticos los que presentan los mayores rendimientos de biocombustible líquido (hasta 80% del residuo tratado) y poderes caloríficos iguales o superiores a los de combustibles derivados del petróleo (40-45MJ/kg).

3.5.3 Propuesta de herramientas técnicas de evaluación de la pirólisis

Partiendo de las definiciones teóricas de múltiples autores como Skoog (2017) y Levenspiel (1999), la investigación propone como primera herramienta un modelo multivariable constituido por 6 ecuaciones que permiten determinar los rendimientos y poderes caloríficos de los biocombustibles producidos con la reacción de pirólisis en función de la composición elemental del tipo de residuo. Este modelo fue validado utilizando una prueba F y la determinación de errores menores al 5% para la predicción de datos referenciales o experimentales, encontrando que en todos los casos las ecuaciones cumplen con ambos requerimientos de predictibilidad, pero que los datos experimentales a escala laboratorio pueden presentar mayores porcentajes de error, por la variabilidad que algunos residuos celulósicos o alimenticios tienen.

Como segunda herramienta y para la predicción del comportamiento de la reacción, que permite a la vez la determinación de los tiempos de la reacción, se emplearon modelos cinéticos, que emplean la ecuación de Arrhenius como forma de incluir la rampa de temperatura empleada en la proyección. Estos modelos permiten modelar la transformación de masa dentro del reactor y la conversión en productos líquido, sólido y gaseoso con errores menores al 5% y coeficientes de correlación superiores a 0.9 utilizando datos experimentales de residuos plásticos y alimenticios generados en la ciudad de Guatemala. Con lo anterior, se genera la certeza sobre la predictibilidad de la herramienta en las condiciones específicas de la ubicación del estudio, además de permitir valorar positivamente la herramienta en el proceso de predicción del comportamiento de la reacción.

Las simulaciones efectuadas muestran diferencias importantes entre residuos orgánicos, celulósicos y plásticos. Por ejemplo, el polietileno de alta densidad (HDPE) presenta una

degradación rápida debido a su estructura molecular, lo cual genera mayores cantidades de productos en un tiempo reducido. Esta velocidad de conversión es útil para procesos de producción energética, pero puede generar desafíos de transferencia de calor por su capacidad aislante. Se observa también, una sensibilidad marcada a la progresión de temperaturas por parte de la predicción que se genera con los modelos, lo que evidencia que los procesos deben adaptarse a controlar de manera precisa la progresión de esta variable operativa, además de poder generar modelos específicos de esta variable dentro de cada reactor, para permitir llegar a las exactitudes de predicción con que se trabajó con los datos de laboratorio.

En complemento y como tercera herramienta, el uso de modelos de plantas de aplicación de la técnica de pirólisis con el software SuperPro Designer®, permitió el dimensionamiento de los equipos más importantes del proceso. De estas simulaciones se observó que en general el proceso consiste en los mismos pasos independientemente del tipo de residuo, con la única diferencia de tener que colocar un secador al inicio, en caso de que el tipo de residuo posea porcentajes de humedad superiores al 15%. Con estos modelos, fue posible comparar con datos referenciales de plantas comerciales, obteniendo diferencias menores al 20% en las dimensiones de los equipos principales, lo cual valida su aplicabilidad en el diseño preliminar de una planta industrial. El modelo evidenció además, que equipos como el reactor y el condensador representan los principales retos técnicos y económicos.

Es importante mencionar que a pesar de que todas las deducciones, modelos y parámetros utilizados emplearon información del contexto guatemalteco, se considera que los modelos pueden aplicarse a otros contextos, siempre que se ajusten los parámetros con dicho enfoque. Por otro lado, el poder realizar la evaluación de una potencial aplicación de la técnica de pirólisis de forma integral con los enfoques técnico y económico, es la manera indicada para concluir sobre dicho potencial, dado que es con este enfoque que un potencial proyecto de implementación de la técnica se desarrolla y evalúa de acuerdo con PMI(2017). Es por esto, que las herramientas desarrolladas brindan una opción de evaluación al contexto guatemalteco y mundial.

3.5.4 Herramienta de evaluación económica de la aplicación de pirólisis

Desde el punto de vista económico, se construyó una herramienta de simulación de flujos de efectivo que consideró tres escenarios de negocio, pero que permite el estudio de los escenarios que en cualquier evaluación pueda requerirse. Los resultados evidenciaron que los modelos que incluyen un cobro por el tratamiento son más rentables y atractivos para inversionistas, independientemente de la escala que se estudie. Esto es ocasionado por el flujo extra de ingresos que se genera con este cobro y evidencian la necesidad de tener una cultura y legislación de tratamiento, para inducir a los consumidores y generadores de residuos a emplear servicios de tratamiento.

Los indicadores financieros empleados en las simulaciones (el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), el tiempo de recuperación de la inversión y la relación costo-beneficio) se propusieron de acuerdo con lo sugerido por PMI(2017) y Kezner (2018), obteniendo valores que para la escala de 6t/d solamente generan rentabilidades atractivas para los inversionistas, si el cobro mencionado anteriormente se realiza. Estos indicadores también permitieron el comparativo con casos referenciales internacionales de plantas industriales funcionales y se encontraron alineados en la misma tendencia de rentabilidades, reforzando la confiabilidad de la herramienta en la evaluación de la aplicación de la pirólisis.

Capítulo 4 Propuesta de Transformación

En esta sección se presenta la propuesta de transformación según los resultados que se obtuvieron y presentaron en el capítulo anterior, partiendo de la fundamentación de la investigación, para posteriormente presentar la propuesta y valorarla.

4.1 Fundamentación de la Propuesta de transformación

La propuesta de transformación plantea un cambio estructural en la forma como se evalúan los proyectos de tratamiento de residuos sólidos con la técnica de pirólisis en la ciudad de Guatemala. En lugar de depender de datos parciales, donde se explora exclusivamente un tipo de residuo, donde se investigan propiedades o avances de la reacción, se introduce un proceso de evaluación, que utiliza 4 herramientas desarrolladas para generar conclusiones válidas sobre la viabilidad técnica y económica de la técnica.

De acuerdo con Boardman et al. (2017), la determinación de viabilidad de proyectos es una parte fundamental de la evaluación de proyectos. Para esto, aparte de evaluar sus principios constitutivos y aspectos contextuales, es fundamental el poder realizar evaluaciones técnicas y económicas del proyecto en cuestión. Sin embargo, para hacer este tipo de evaluaciones con la reacción de pirólisis, no se encontraron referencias sobre el proceso o las herramientas a utilizar para evaluar su potencial aplicación y bajo este contexto, se busca entonces con esta propuesta el poder desarrollar las herramientas técnicas y económicas que permitan la evaluación y presentar la secuencia necesaria con que se empleen en la determinación de viabilidad.

Para conseguir este objetivo general buscado en esta tesis doctoral, se partió de los principios teóricos y conceptuales, que dan sustento a los hallazgos y los desarrollos efectuados. Estos principios parten de las diferentes teorías o posturas reportados con respecto a la aplicación de la técnica, donde se encontraron 3 posturas principales: 1) los autores que visualizan una viabilidad negativa de tratar residuos sólidos con esta técnica, 2) los que reportan una viabilidad parcial, es decir, que solamente estudiaron o visualizan el tratamiento aplicado a un tipo particular de residuos, y 3) los autores que

reportan el potencial de la técnica, como una posible Biorrefinería, que abarca varios posibles tipos de residuos.

Además, se utilizó la teoría de reacción de pirólisis que de acuerdo con Rehan et al. (2017) definen la técnica como: “La pirólisis es una degradación térmica de residuos a diferentes temperaturas (300–900°C) y velocidades de calentamiento, que se tratan en reactores especializados en ausencia de oxígeno para generar valor con diferentes tipos de residuos sólidos”. Esta publicación y los datos muchos otros autores como Ratnasari et al. (2017), Serrano et al. (2012), Gandidi et al. (2018) y Miandad et al. (2019) aseguran que existe una alta dependencia de la naturaleza molecular y composición elemental del material residual a tratar con la técnica. Basado en esto, la primer herramienta desarrollada busca brindar claridad sobre esta dependencia detectada.

Por otro lado, considerando que la parte principal del proceso es una reacción termoquímica, Levenspiel (1999) publica la necesidad de contar con modelos cinéticos explicativos, que permitan la proyección de la reacción y el escalamiento del proceso. Por su lado, Peters et al. (2003) indican que el escalamiento a una planta industrial es un proceso que depende principalmente de la definición de las operaciones unitarias y los equipos clave necesarios para el proceso, la definición de las relaciones entre los mismos y su proyección operativa. Es con estas teorías que se construyen las otras dos herramientas técnicas, que emplean ecuaciones diferenciales del progreso de la reacción y principios de dimensionamiento de equipos para generar la información sobre como la reacción avanza y si los equipos necesarios para una escala determinada, son coherentes con la disponibilidad de equipos en la industria.

Por su parte, Kerzner (2017) indica que la evaluación económica debe partir de una proyección del flujo de caja que cualquier proyecto genera, para posteriormente calcular indicadores financieros que permitan la comparación del proyecto con otros similares o con los niveles de rentabilidad que los inversores desean para un nivel de riesgo establecido. Es por esto, que se presenta este modelado como la cuarta herramienta posible a aplicar para la evaluación de la técnica.

Los resultados de la propuesta por lo tanto presentan un claro aporte a la transformación de la metodología aplicada hasta el momento para evaluar posibles proyectos de transformación de residuos sólidos con la técnica de pirólisis, generando un resultado práctico para el propósito descrito, que puede impactar en la forma de considerar la técnica dentro del campo de tratamiento de residuos. De manera que, la propuesta también genera un enfoque renovado y diferentes sobre la forma de estudiar la aplicación de técnicas de tratamiento, empleando herramientas especializadas.

En conjunto, la evaluación de proyectos constituye una herramienta esencial en la gestión moderna de iniciativas complejas, ya que permite establecer prioridades, decidir e intervenir con conocimiento técnico, económico y con impacto social. De acuerdo con PMI (2017), su correcta aplicación contribuye a la mejora de la eficiencia en el uso de recursos, reduce riesgos e induce la consecución de resultados sostenibles y alineados con los objetivos estratégicos de programas, organizaciones o políticas pública.

Finalmente, la propuesta se alinea con los principios de la economía circular y la transición energética justa, al proponer sistemas que transforman residuos en recursos, que cierran ciclos de materiales, genera biocombustibles y reducen contaminantes en tierra, aire y agua. También contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular los ODS 7, 11, 12 y 13, que han sido plenamente abarcados en estudios específicos del centro donde se llevó a cabo la experimentación (CPI-UVG). En conjunto, esta transformación no solo implica un cambio tecnológico, sino también una nueva forma de entender la evaluación de tratamiento de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, siendo más resiliente, y enfocado e impulsado por evidencia técnica y científica sólida.

4.1.1 Contribución comunitaria

La propuesta desarrollada tiene un enfoque considerable orientado a las comunidades, en específico a la latinoamericana y la guatemalteca, ya que plantea soluciones que responden directamente a problemáticas locales relacionadas con el manejo inadecuado de residuos sólidos. Muchas comunidades guatemaltecas, tanto

rurales como urbanas, enfrentan deficiencias en los sistemas de recolección, separación y disposición final de desechos, lo que contribuye a problemas de salud pública, contaminación de cuerpos de agua y emisiones a la atmósfera. Al introducir tecnologías innovadoras y que permiten una aplicación descentralizada como la pirólisis, se genera la oportunidad de transformar un pasivo ambiental en un material que representa un activo energético, permitiendo a las comunidades generar valor a partir de sus propios residuos y disminuir su dependencia de servicios municipales colapsados o inexistentes, pero esto no se puede hacer sin las herramientas propicias para evaluar la técnica.

Además, el modelo propuesto posibilita una participación activa de las comunidades en el proceso, desde la etapa de diseño hasta la operación y el monitoreo de las plantas de tratamiento. Esto incluye procesos de sensibilización ambiental, capacitación técnica para operadores comunitarios, y estrategias de apropiación cultural de la tecnología. La pirólisis puede integrarse en asociaciones de base, cooperativas, alcaldías auxiliares o proyectos de economía social, generando oportunidades de empleo digno, empoderamiento local y nuevas capacidades técnicas en territorios históricamente marginados. La vinculación de actores locales se espera que fortalezca la resiliencia comunitaria y permita proponer soluciones contextualizadas, sostenibles y con mayor aceptación social. Esto último es especialmente importante derivado del contexto del país de Guatemala y su riesgo social.

Por otro lado, la gestión descentralizada de residuos mediante pirólisis que pueda propiciarse con el proyecto, contribuye a mejorar la calidad de vida de las personas más expuestas a sus efectos, especialmente mujeres, niños y trabajadores informales del reciclaje. La reducción del volumen de desechos, la generación de energía limpia y la mejora en las condiciones de salubridad se traducen en beneficios sociales tangibles. En conjunto, esta contribución comunitaria representa una vía efectiva para vincular la innovación tecnológica con el desarrollo territorial, y promueve una transición ecológica justa que reconoce el papel protagónico de las comunidades en la solución de problemas ambientales locales.

4.1.2 Contribución científica

La propuesta representa una contribución significativa al campo científico por su enfoque integral en el análisis, modelación, simulación y análisis de tecnologías de conversión térmica de residuos sólidos. Se desarrollaron modelos cinéticos aplicados a residuos específicos de Guatemala, incorporando parámetros locales, lo cual constituye una novedad frente a estudios más generalistas de otras regiones. Estos modelos, contruidos a partir de ecuaciones diferenciales y principios de termodinámica y transferencia de calor, permiten predecir con precisión la conversión de masa, la generación de productos y el comportamiento térmico de residuos como HDPE, PET, bagazo de caña y residuos orgánicos. Esto abre nuevas líneas de investigación local en ingeniería ambiental, energía y ciencia de materiales.

Además, la investigación incluye el uso de herramientas avanzadas de simulación con software como Microsoft Excel®, Berkeley Madonna® y SuperPro Designer®, que fortalecen las capacidades de diseño y validación de procesos en contextos de baja disponibilidad tecnológica. Estas herramientas no solo se utilizaron para describir fenómenos de reacción, sino también para modelar escenarios industriales, estimar requerimientos energéticos y definir configuraciones operativas viables. La posibilidad de vincular la simulación teórica con datos reales de residuos guatemaltecos permite el desarrollo de modelos aplicables y reproducibles, que pueden ser utilizados en instituciones académicas para la enseñanza, o como insumos técnicos para tomadores de decisiones en el sector industrial y ambiental.

Finalmente, el proyecto aporta al conocimiento científico sobre el escalamiento de tecnologías apropiadas para el tratamiento de residuos en países en desarrollo, un área poco documentada en la literatura internacional. La validación cruzada entre modelos multivariable, modelos cinéticos, predicciones económicas y simulaciones de procesos industriales proporciona un marco metodológico robusto para futuras investigaciones. Asimismo, genera evidencia desde un punto de vista holístico sobre la viabilidad técnica, económica y ambiental de la pirólisis, contribuyendo al desarrollo de políticas públicas basadas en ciencia.

En conjunto, la propuesta no solo responde a una problemática práctica, sino que también amplía los límites del conocimiento científico aplicado en el contexto latinoamericano y tiene el potencial de poderse llevar a otras localidades, siempre que los parámetros de los modelos generados se modifiquen a las condiciones de cada ubicación.

4.2 Estructura de la propuesta de transformación

Con esta propuesta de transformación se busca proponer herramientas técnicas y económicas que permitan la evaluación de la potencial aplicación de la técnica de pirólisis y presentar la secuencia necesaria con que se empleen en la determinación de viabilidad, proporcionando una lógica de modelaje y de análisis tras la aplicación de las técnicas. Los objetivos específicos de la propuestas son:

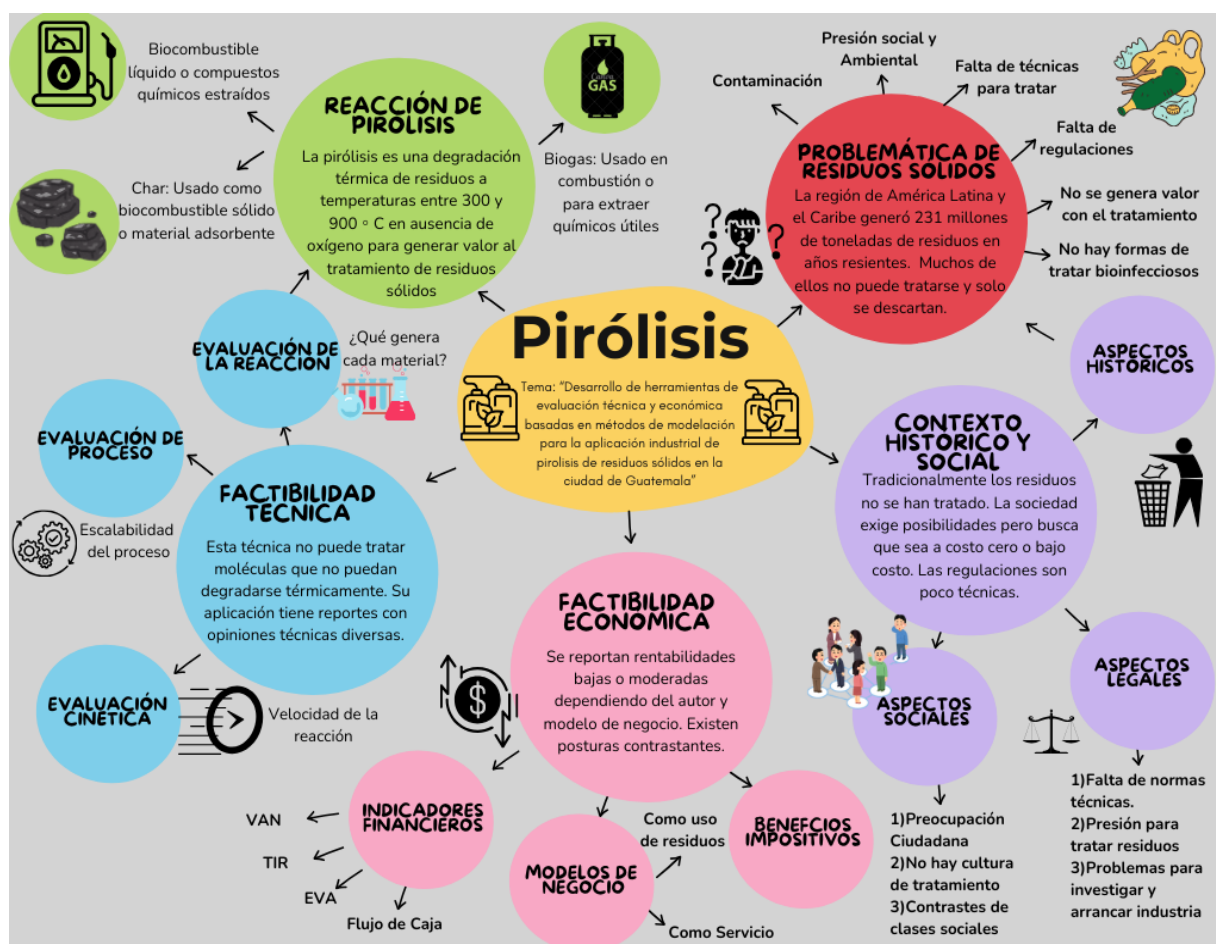
- Introducir el contexto y terminología base sobre la que se desarrolla la evaluación de la aplicación de la técnica de pirólisis con cualquier tipo de residuo sólido disponible en la ciudad de Guatemala.
- Mostrar la secuencia de herramientas necesarias a aplicar para la evaluación técnica y económica de la técnica de pirólisis con diferentes tipos de residuos sólidos.
- Proporcionar claridad sobre las actividades necesarias a aplicar para utilizar las herramientas, para potenciar el adecuado uso de las herramientas desarrolladas.

Terminología básica para el desarrollo de una evaluación de pirólisis

En el campo de estudio existen diferentes términos en los que se basa la propuesta, dentro de ellos, el entendimiento del concepto de la reacción de pirólisis es la base de toda la propuesta. De acuerdo con Santos (2011), la pirólisis es un proceso termoquímico de descomposición térmica de materia orgánica. Dicho proceso puede realizarse con residuos, tanto plásticos como orgánicos en ausencia de oxígeno para la obtención de productos en tres fases, sólido, líquido y gaseoso. De los productos previamente mencionados, los compuestos con base de carbono se descomponen

formando gases, donde hay tanto hidrocarburos condensables como no condensables y un residuo carbonoso sólido o char (es el coque remanente del proceso). La aportación del calor al proceso se divide en dos grupos, los cuales son sistemas alotérmicos y sistemas autotérmicos; en el caso de los sistemas alotérmicos se tiene una transmisión de calor que se lleva a cabo por medio de conducción y radiación de las paredes, no hay convección dado que es en ausencia de oxígeno, es una transmisión indirecta de energía.

Figura 30: Representación gráfica del tema propuesto, la fundamentación teórica conceptual de la tesis doctoral



Fuente: Elaboración propia, con base en Ratnasari et al. (2017), Serrano et al. (2012), Gandidi et al. (2018) y Miandad et al. (2019).

Ahora bien, otros términos necesarios de tener en cuenta son: 1) la determinación de factibilidad técnica de un tratamiento de residuos y las partes que la constituyen, 2) la evaluación de factibilidad económica del mismo tratamiento y las partes que la integran, 3) el problema que se tiene sobre los residuos sólidos en ciudad de Guatemala y en la región, y 4) la condiciones generales del contexto histórico y social en donde se estudia la técnica. Para resumir estos aspectos importantes, se elaboró la Figura 30.

Secuencia de herramientas necesarias a aplicar para la evaluación técnica y económica de la técnica de pirólisis

Partiendo de la definición base de la forma como se evalúan los proyectos ilustrada anteriormente, se presenta el orden lógico como dicha evaluación se debe realizar para el caso particular de la tesis presentada, aplicando las herramientas desarrolladas. Esta secuencia de pasos se basa en las técnicas de dimensionamiento y desarrollo de plantas industriales publicado por Levenspiel (1999) y Peters et al. (2003) y se resume de manera gráfica en la Figura 31.

Los pasos que se desarrollaron de manera específica para la evaluación de la técnica de pirólisis, se describen brevemente a continuación:

- Recopilación de datos: El proceso empieza por reunir la información necesaria a cerca del residuo que se desea plantear, si existen necesidades específicas de escala, de tipo de residuos, de propiedades y composiciones. En esta etapa idealmente se debe disponer de los recursos necesarios para efectuar una caracterización del residuo en estudio, que permita generar las propiedades de forma precisa y con ello se tenga los datos necesarios para la aplicación de las herramientas de simulación basadas en modelos.

Importante es mencionar que la caracterización e información técnicas del residuos sólido puede ser experimental o referencial, siempre que estos datos tengan la exactitud y precisión adecuados, la información posterior que se genere con el modelaje, será predictiva dentro de los márgenes de error que se establecieron durante la parametrización de los modelos.

Figura 31: Representación gráfica de las etapas teórico/prácticas de la propuesta



Fuente: Elaboración propia.

- Aplicación de la herramienta para modelaje de reacción: Basado en las ecuaciones mostradas en la sección 3.4.7 (ecuaciones 7 a la 12), se debe emplear la información de composición elemental de la caracterización del material, para introducir los datos en el modelo multivariable y de esa forma predecir el valor de los rendimientos de productos líquido, sólido y gaseoso, así como sus poderes caloríficos. Si la composición elemental muestra porcentajes constitutivos de carbono menores al 10%, las ecuaciones proporcionarán rendimientos bajos, considerándose inviable el tratamiento con pirólisis. De la misma forma, si se obtienen rendimientos para el líquido y sólido debajo del 15%, y poderes caloríficos debajo de 15MJ/kg, se considera que el tratamiento no será técnicamente lo más aconsejable. De lo contrario, se puede proceder al siguiente modelo.

Es importante aclarar que la estructura de la herramienta propuesta en este caso está compuesta por ecuaciones matemáticas, que se desarrollaron para predecir los productos que se obtendrán y sus características principales en función de las propiedades del residuo a tratar. Estas ecuaciones en general poseen una estructura como la que sigue:

$$\text{Propiedad estudiada} = a + b * X_1 + c * X_2 + \dots + n * X_n$$

Donde X_1 a X_n representan la concentración porcentual de elementos químicos que contiene la muestra en promedio y a , b , c ... y n son los coeficientes que ajustan los datos a las variables X_1 a X_n respectivamente.

Para emplear estos modelos, se puede hacer en diferentes tipos de software, incluyendo hojas de cálculo estándar como se puede realizar en Microsoft Excel® o emplear software que permita la aplicación de modelos matemáticos, como Matlab®.

- Aplicación de la herramienta para modelaje cinético: En este caso debe de contarse también con datos experimentales del progreso de la reacción con el tiempo y de la rampa de temperatura empleada para la reacción a escala laboratorio y en la ubicación donde se evalúe la técnica. Con los mismos, proceder a utilizar los modelos mostrados en la sección 3.4.10 y ajustar inicialmente los parámetros para seguir la rampa de temperatura, determinando posteriormente la energía de activación, factor de frecuencia y exponente que permiten el mejor ajuste. Con estos parámetros, simular comparativamente el progreso de la reacción con otros residuos referenciales, como los mostrados en esta tesis doctoral y si el valor del tiempo necesario para la reacción excede 3 días por sobre los residuos referenciales, considerar como no viable la técnica para el tratamiento del residuo. Se recomienda realizar este ajuste y análisis en Berkeley Madonna® u otro software relacionado a métodos numéricos de solución de sistemas de ecuaciones.

Los modelos desarrollados tienen en todos los casos una estructura basada en el consumo del residuo sólido con base en la masa colocada en el reactor, que se combina con una forma de representación de la progresión de temperaturas usadas. Ambas ecuaciones deben aplicarse para llegar a la predictibilidad necesaria para escalar la reacción o para la determinación de tiempos de reacción necesarios. Las ecuaciones de los modelos son expresiones diferenciales, que permiten la simulación numérica con ecuaciones del tipo:

$$-\frac{dW}{dt} = A \exp \left[-\frac{E_a}{R * \left(T_1 + \frac{T_2 - T_1}{1 + e^{\frac{t_{1/2} - t}{m}}} \right)} \right] (W - W_f)^n$$

Donde A es el denominado factor de frecuencia, E_a es la energía de activación de la reacción, R es la constante de los gases ideales que se emplea con el valor de 8.314 J/mol*K en los cálculos, T_1 es la temperatura inicial del sistema de reacción, T_2 es la temperatura final del sistema de reacción, $t_{1/2}$ y m son las constantes del modelo de Boltzmann, t es el tiempo de reacción, n es el orden de la reacción, y W y W_f son la masa instantánea y final presentes en el reactor respectivamente.

Las variantes de estas expresiones se emplean para predecir la presencia o generación de compuestos a lo largo de la reacción, con lo que puede predecirse la generación del biochar o el biocombustible líquido.

- Aplicación de la herramienta para modelaje de plantas: Partiendo de los diagramas desarrollados en la sección 3.4.11, examinar críticamente los equipos detallados y sus relaciones, cambiando lo que sea necesario en función de toda la información generada hasta este punto. Luego, emplear un software (como SuperPro Designer®) para introducir y simular las operaciones unitarias. Dimensionar con base en una escala de operación base, la que puede definirse en función de las necesidades del proyecto a evaluar o las bases de diseño que se definan para el residuo a tratar.

La simulación requerirá de información paramétrica que en este punto ya debe haberse recopilado, incluyendo el modelo cinético, con lo que se obtendrán las dimensiones principales de los equipos necesarios en el proceso.

Comparativamente se debe entonces verificar la existencia de equipos industriales de las dimensiones requeridas, para lo que se pueden utilizar catálogos de equipos o libros referenciales. Si los equipos exceden las capacidades mostradas, se puede pensar en colocar múltiples líneas y dividir el flujo. Sin embargo, si la diferencia se encuentra en varios ordenes de magnitud, considerar revisar el flujo del proceso y de encontrarse bien, evidenciar una viabilidad negativa de aplicación de la técnica.

Los modelos en este caso, se basan en el flujo de equipos del proceso necesarios para efectuar la reacción de pirólisis de un residuo en específico, que de acuerdo con lo analizado coinciden en una de las opciones presentadas en las Figuras 27 y 28, con lo que estos modelos pueden simularse con los datos base de composiciones, flujos y modelos de escalamiento, los tamaños y capacidades de los equipos necesarios. Ejemplo de esta simulación puede visualizarse en la Figura 29.

- Aplicación de la herramienta para modelaje económico: Partiendo de las necesidades del proyecto y con la información técnica recopilada hasta este punto, se procede a indicar los flujos necesarios de ingresos, egresos e inversión de forma anual, los cuales se ingresan en el simulador de flujo de caja para obtener los datos de VAN, TIR, tiempo de recuperación y relación costo-beneficio, con lo que el proyecto se debe comparar con los indicadores buscados y con otros proyectos y con los mismo considerar dos opciones: 1) revisar las consideraciones y suposiciones para generar escenarios o 2) decretar un veredicto sobre la viabilidad económica con base en la comparación de los indicadores.

La herramienta de simulación en este caso está elaborada sobre la base definida por PMI (2017), Brealey et al. (2017) y otros autores en el campo, donde establecen la técnica para determinación de flujos de caja con base en supuestos

que permitan el cálculo de ingresos y egresos del proyecto evaluado. Los egresos pueden calcularse a partir de los costos de producción simulados en SuperPro Designer® o simplemente con relaciones porcentuales referenciales, mientras que los ingresos se determinan con estimaciones del mercado potencial y precios de venta referenciales, como se muestra en los cuadros de la sección 3.4.13.

A partir de los flujos de caja, se establecen los indicadores financieros basados en el valor que se genera para el capital invertido y de tasas de descuento. Esto se establece por autores consultados y sirve como comparativo para establecer la factibilidad económica del proyecto. Las ecuaciones son variadas, pero en general tienen una forma que proviene de:

$$\text{Indicador} = f(\text{Flujo de caja}, \text{Inversión}, \text{tasa de descuento}, \text{tiempo})$$

Como indican Brealey et al. (2017), estos indicadores proveen por lo tanto una forma comparativa que depende del tiempo proyectado, la inversión, flujo de caja y tasa de descuento para evidenciar comparativamente los beneficios del proyecto estudiado o evaluado.

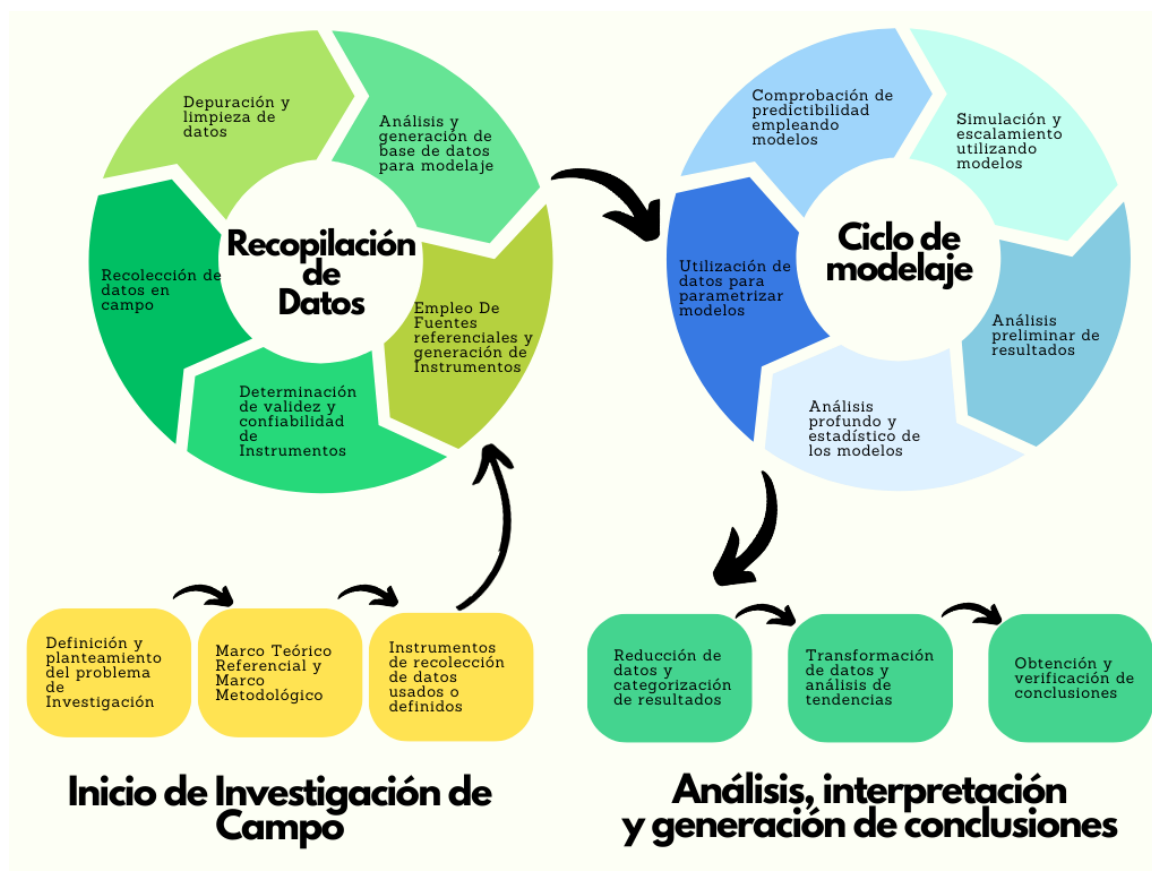
Actividades necesarias que aplicar para utilizar las herramientas

El detalle de las acciones o actividades necesarias para la aplicación de los modelos desarrollados como herramientas de la tesis doctoral, parten siempre de un proceso de recopilación de información, que genera la base de datos adecuada, no solamente para parametrizar los modelos, sino también para estudiar casos específicos. En general las acciones y actividades pueden variar ligeramente en dependencia del tipo de modelo, pero la recopilación de información, modelaje, análisis e interpretación, se mantienen como patrones del ciclo evaluativo de cada una de las etapas mostradas en la Figura 32.

A pesar de la complejidad del tema, en la propuesta se busca abarcar la evaluación necesaria para definir la prefactibilidad de aplicación de la pirólisis en dependencia del tipo de residuo, razón por la que se cuenta con múltiples variables empleadas, que pasan desde la composición química y propiedades de reactivos y productos, la velocidad con la que reaccionan y el dimensionamiento de los equipos requeridos, hasta llegar al

impacto que tienen en indicadores económicos de prefactibilidad, con lo que se pueden inferir formas necesarias para maximizar el valor obtenido con la técnica.

Figura 32: Representación gráfica de las fases, acciones y actividades necesarias en la evaluación de la reacción de pirólisis



Fuente: Elaboración propia.

Propuesta de transformación teórica

Ante la falta de datos anteriores y en medio de las simulaciones, aplicando específicamente los pasos a los residuos de HDPE, aguacate, bagazo de caña y BOPP, se visualizó de forma simplificada dos formas contrastantes de poder generar ingresos a partir del tratamiento de residuos sólidos, que principalmente contrastan en la forma como el residuo se obtiene. Estas dos opciones se describen brevemente a continuación:

1. Asociarse con recolectores y acopiadores: En esta forma de obtención de residuos, el tratamiento parte de brindarle una solución a los recolectores y acopiadores que no pueden tratar el residuo y buscan una forma de no descartarlo indiscriminadamente o colocarlo en un relleno sanitario. La asociación se hace fuerte ante la presión ambiental creciente del contexto de Guatemala, y las pocas opciones de tratamiento con que se cuenta.
2. Vender el servicio de tratamiento de residuos sólidos: En esta forma, la obtención de residuos pasa a ser predominantemente una recolección que se cobra al usuario que genera el residuo y que paga por el servicio de tratamiento. Esto conlleva una necesidad logística y de selección y clasificación especializada, o bien, una legislación fuerte que incentive la necesidad de que empresas y personas busquen este servicio.

Figura 33: Modelo de negocio de la venta de Biocombustibles a partir de la aplicación de la técnica de pirólisis en el tratamiento de residuos sólidos



Fuente: Elaboración propia.

En el contexto de Guatemala, derivado de los actores y la legislación presentada y analizada en el capítulo 2, ambas opciones son factibles y no son mutuamente excluyentes, razón por la que se consideraron dentro de los escenarios elaborados en el apartado 3.4.13, que reflejan resultados diferentes en indicadores financieros. Para ilustrar de mejor forma estos modelos de negocio y su flujo desde la perspectiva del residuo, se elaboraron los esquemas que se muestran en las Figuras 33 y 34, y en donde se muestra el flujo lógico del modelos de negocio considerando solamente la venta de biocombustibles e incluyendo el servicio de tratamiento de los residuos sólidos.

Figura 34: Modelo de negocio de la venta de Biocombustibles y servicio de recolección y tratamiento, a partir de la aplicación de la técnica de pirólisis en el tratamiento de residuos sólidos



Fuente: Elaboración propia.

De estas definiciones y el comparativo de escenarios generados con la herramienta de simulación, se observa que la venta del tratamiento del residuo siempre generará

escenarios que incrementan la rentabilidad de los proyectos haciéndolos más atractivos. Y aunque se hace evidente que esto depende de la escala y los factores exógenos al proceso, se deduce que en todos los casos la venta del tratamiento de residuos sólidos con la técnica debe estimularse, para propiciar la inversión en esta técnica. La forma más directa de hacerlo es con una legislación que estimule la aplicación de este tipo de tratamientos, pero también el componente cultural juega un papel importante.

Para poder contrastar y mostrar este efecto, se realizó una comparación simple empleando el simulador con dos escalas de producción diferentes, que fueron de 6t/d y 16t/d. De donde se evidencia la tendencia positiva ante el cobro por tratar el residuo, además del efecto de la economía de escala que mejora el escenario conforme se tratan más residuos. A pesar de esto, debe tomarse en cuenta que el obtener los volúmenes necesarios de residuos puede llegar a ser complejo si no se acompaña de los factores externos e infraestructura necesarias. El comparativo se muestra en el cuadro 52.

De manera que, con esto se observa que cualquier proyecto que plantee la aplicación de la técnica debe ser altamente flexible para adaptarse a los cobros y condiciones del mercado, buscando siempre rentabilizar a través del cobro del tratamiento, teniendo como base la venta de biocombustibles. Esto lleva a pensar que la técnica tiene un alto potencial en el tratamiento de residuos contaminados o peligrosos, por lo que los consumidores estarán dispuestos a pagar mayores sumas para poderlos tratar de forma adecuada y amigable al ambiente.

4.3 Valoración y validación de la propuesta de transformación

Con las necesidades detectadas y objetivos de la propuesta de transformación, se puede realizar su validación con los datos anteriormente mostrados en las secciones 3.4. La validación pasa por poner a prueba cada una de las herramientas de modelado desarrollados con los datos referenciales o experimentales disponibles. El resumen de la validación de las herramientas se muestra en la siguiente lista:

- La herramienta de predicción de la reacción, compuesta de los modelos multivariable se validó con las diferentes categorías de residuos sólidos, mostrando predictibilidades con error menor al 5% para todos los datos referenciales, y con datos experimentales de residuos específicos como aguacate, bagazo de caña, PET, HDPE y BOPP metalizado, mostrando una predictibilidad con errores menores al 5% para la mayoría de los residuos.
- La herramienta de modelos cinéticos se valida con la predicción de datos experimentales realizados en la ciudad de Guatemala con errores inferiores al 2.5% y coeficientes de correlación superiores a 0.9. Estos son valores que brindan certeza a un modelo cinético, asegurando su capacidad para aplicarlo a proyecciones o técnicas de escalamiento.
- La herramienta de modelo de proceso o planta simulado en el software SuperPro Designer®, se validó con la comparación realizada de diferentes escalas de producción referenciales, que presentó porcentajes de error menores al 20% para todas las determinaciones de dimensiones necesarias de los equipos críticos del proceso. Se valora como positiva la diferencia, tomando en cuenta que los casos empleados como referencia presentan sistemas de amplio espectro de aplicación.
- La herramienta de modelado con base en flujos de caja, se validó con porcentajes de error de los indicadores de casos reales de implementaciones de plantas de pirólisis en otras ubicaciones, que tuvieron en todos los casos errores menores al 20%, con lo que también se valora como positiva la aplicación de la herramienta.

Cada una de las herramientas pudo evaluarse de manera independiente y empleando los indicadores pertinentes para asegurar el desempeño en el proceso de aplicación de la evaluación de la reacción de pirólisis con resultados positivos. Sin embargo, debe notarse que la aplicación de dichas herramientas debe tener como complemento análisis contextuales, sociales y ambientales, que permitan tomar en cuenta estas áreas. También es importante la relación con partes interesadas, que brinden puntos de vista sobre otros aspectos necesarios para cualquier proyecto evaluado de pirólisis de residuos sólidos.

Analizando a profundidad los procesos de validación, se observa que las pruebas de validación de los modelos multivariable aplicados a las diferentes categorías de residuos sólidos, mostraron predictibilidades con error menor al 5% para todos los datos referenciales, mientras que, las pruebas aplicadas con datos experimentales de residuos específicos como aguacate, bagazo de caña, PET, HDPE y BOPP metalizado, demostraron una predictibilidad confiable, con errores menores al 5% para la mayoría de los residuos. Las excepciones con errores levemente superiores al 5% se asociaron a la alta variabilidad composicional y humedad de los residuos orgánicos. Esto subraya la necesidad de técnicas de laboratorio para caracterización local precisa para garantizar la eficacia de modelos predictivos y para poder generar resultados repetitivos al utilizar esta técnica de tratamiento.

En la evaluación de los modelos cinéticos propuestos, se evidenció la necesidad de generar modelos de alta predictibilidad inicialmente para las rampas de temperatura, para luego obtener alta predictibilidad del progreso de la reacción. Con base en esto, fue posible obtener modelos de predicción de datos experimentales realizados en la ciudad de Guatemala con errores inferiores al 2.5% y coeficientes de correlación superiores a 0.9. Estos son valores que brindan certeza a un modelo cinético, como lo menciona Levenspiel (1999), pudiendo aplicarlo a proyecciones o técnicas de escalamiento.

La evaluación de la tercer herramienta, que es el modelo de proceso simulado en el software SuperPro Designer®, se obtuvo también resultados positivos, puesto que la comparación realizada de diferentes escalas de producción presentó porcentajes de error menores al 20% para todas las determinaciones de dimensiones necesarias de los equipos críticos del proceso. Esto se obtuvo comparando datos de casos reales disponibles en la industria y los datos de las dimensiones simuladas, por lo que, se valora como positiva la diferencia, tomando en cuenta que los casos empleados como referencia presentan sistemas multipropósito (que pueden tratar una gama amplia de residuos) y no específicos como los simulados, de donde la variación tiene sentido. Además, estando en el mismo rango de ordenes de magnitud de acuerdo con Peters et al.

(2013), se podrá obtener flujos similares de una planta de producción ajustando propiedades y variables operativas.

Finalmente, los porcentajes de error de los modelos de flujo de caja con respecto a indicadores de casos reales de implementaciones de plantas de pirólisis en otras ubicaciones muestran errores menores al 20%, con lo que también se valora como positiva la aplicación de la herramienta, tomando en cuenta que todos los factores del contexto son determinantes en los resultados que esta simulación proporciona. Con esto, se proporciona 4 herramientas que pueden ser aplicadas para evaluar técnica y económicamente cualquier proyecto que aplique la técnica de pirólisis y para cualquier residuo que pretenda tratarse, y que secuencialmente brindan la información suficiente para la determinación de viabilidad y que presentan un orden lógico de etapas a seguir para poder evaluar el tratamiento de cualquier residuo con la técnica estudiada.

Con todas estas validaciones, se puede de forma general valorar como positiva la propuesta de transformación, puesto que provee no solamente de herramientas aplicables, sino de una lógica y orden de aplicación de estas, que lleve de manera secuencial a un análisis sobre el potencial que la técnica de pirólisis tiene para poder aplicarse en el tratamiento de un residuo específico. Este proceso se valora como de aporte sustancial al campo de estudio y busca ser un primer paso, que genere mayores avances en la línea de propuesta de proyectos de pirólisis en el país y la región de Guatemala.

Por otro lado, la transformación práctica también se valora como de alto potencial, puesto que induce a contar con herramientas que incrementan la eficiencia y especificidad con que puede evaluarse la aplicación de la pirólisis en la ciudad de Guatemala, aunque se valor igual de positiva para el traslado a otras ubicaciones. Además, esto reduce la discrecionalidad que se ha mostrado en muchas de las fuentes respecto a emitir opiniones parciales sobre el potencial de la técnica, pero contando únicamente con información parcial que evita el enfoque holístico necesario en este tipo de evaluaciones o emisión de veredictos.

Con esto se muestra que con todo lo investigado en esta tesis doctoral se ha propiciado el cambio sustancial a través de las herramientas desarrolladas y la propuesta de transformación, que lleva a contribuir al análisis de la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos. Todo esto, de manera objetiva y con la base técnica adecuada, con lo que se potencia el promover la aplicación de este tratamiento con información certera y verás, y se espera esto contribuya en el aporte al problema ambiental que representa el tratamiento de residuos sólidos.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos y en la discusión de los mismos, se establecen las siguientes conclusiones como principales aprendizajes de la investigación realizada:

1. Se cumplió con el objetivo general con la investigación realizada y aplicada en la propuesta de herramientas técnicas y económicas utilizando técnicas de modelaje, que permitan analizar la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos. Esto se comprobó con las 4 herramientas desarrolladas, que son: modelos de predicción multivariable, modelos cinéticos de la reacción, modelos de escalamiento a través de balances de masa y energía y simulación digital, y la evaluación económica con flujos de caja e indicadores financieros, los cuales comparativamente pudieron validarse con datos referenciales y sets de datos experimentales.
2. Se establece que pudo cumplirse con el primer objetivo específico, de determinar los fundamentos teóricos avances científicos y enfoques metodológicos existentes sobre la pirólisis de residuos sólidos, ya que pudieron establecerse las tres posturas teóricas sobre la aplicación de la técnica: 1) los autores que visualizan una viabilidad negativa de tratar residuos sólidos con esta técnica, 2) los que reportan una viabilidad parcial, es decir, que solamente estudiaron o visualizan el tratamiento aplicado a un tipo particular de residuos, y 3) los autores que reportan el potencial de la técnica, como una posible Biorrefinería, que abarca varios posibles tipos de residuos. Además, se evidenció la problemática de los residuos en la región, las técnicas de evaluación de proyectos y los conceptos necesarios para el desarrollo de modelos predictivos.
3. Se cumplió con el segundo objetivo específico, ya que a partir de los datos de la clasificación de residuos sólidos de la ciudad de Guatemala proporcionados por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, y de los datos de composición de los residuos de cada categoría, pudo establecerse que los residuos orgánicos, los residuos sanitarios, los plásticos no reciclables y el papel y cartón no

reciclables, son las categorías con alto potencial para tratarse con la técnica de pirólisis debido a sus propiedades físicas y químicas. Estos residuos abarcan alrededor del 89% de los residuos del país, por lo que la aplicación de la técnica tiene alto potencial, aún y cuando las características químicas influyen sobre los rendimientos y características de los productos obtenidos.

4. Como parte del cumplimiento del tercer objetivo, y empleando los datos típicos de rendimiento de los productos de la reacción de pirólisis y su poder calorífico para diferentes residuos sólidos analizados, se determinó que la composición del residuo impacta sobre ambos parámetros, por lo que fue posible generar modelos predictivos multivariable que relacionan dichas variables y que conservan un error menor al 5% en la predicción, por lo que desde la perspectiva de evaluación de prefactibilidad se consideran válidos para aplicación predictiva.
5. También como parte del tercer objetivo y en función de los datos del progreso de la reacción con el tiempo, se generaron modelos cinéticos predictivos y modelos de escalamiento a nivel industrial, que permiten dimensionar los equipos necesarios en un proceso industrial. Los primeros con coeficientes de correlación superiores a 0.9 y porcentajes de error menores a 2.5%, y los segundos con dimensiones con porcentaje de error menor al 20% en comparación con equipos disponibles a nivel industrial. Con ellos puede establecerse que técnicamente los 4 tipos de residuos con potencial presentan una prefactibilidad técnica positiva de tratamiento, diferenciada por los tiempos de reacción necesarios, los equipos necesarios en el proceso y las características de los productos que se obtienen.
6. Se consiguió completar el cuarto objetivo específico, estableciendo que los modelos de evaluación económica con flujos de efectivo e indicadores financieros, comprobaron ser útiles para la evaluación de la reacción de pirólisis, siendo validados con datos de operación reportados en referencias especializadas. Con estas herramientas, es posible determinar que, para todos los tipos de residuos, existe la necesidad de aplicar un modelo de tratamiento que integre un cobro por el tratamiento del residuo, ya que los ingresos generados no son suficientes para mantener o generar una rentabilidad atractiva a los inversores. Dicho monto es

influenciado directamente por el tipo de residuo que se trate con la técnica y la escala en la que el tratamiento se efectúe.

7. Finalmente, a partir de todos los resultados obtenidos y de la propuesta de valor presenta, se valida la hipótesis que si se propone herramientas técnicas y económicas basadas en modelos de reacción y evaluación de procesos, entonces se podrá analizar la viabilidad industrial de la pirólisis de residuos sólidos en la ciudad de Guatemala, considerando la variabilidad en la composición de los residuos y el escalamiento del proceso.

RECOMENDACIONES

En función de lo estudiado durante el desarrollo de este tema de investigación, puede recomendarse las siguientes líneas para ampliar el conocimiento del campo y enriquecer lo realizado:

1. Mejorar predictibilidades con datos experimentales: Considerar incluir un mayor número de casos experimentales en los modelo y parametrizarlos nuevamente, para generar una mejor exactitud en las predicciones, derivado de la influencia que el ambiente en el que se desarrolla la reacción.
2. Evaluar de emisiones atmosféricas derivadas de la pirólisis de residuos mixtos en condiciones locales: Se propone desarrollar un estudio exhaustivo de las emisiones gaseosas generadas por la pirólisis de mezclas de residuos típicamente generados en la ciudad de Guatemala. Esta investigación evaluaría compuestos como hidrocarburos aromáticos, partículas finas, dioxinas y furanos bajo distintos rangos de temperatura y tiempos de residencia. Los resultados permitirían establecer lineamientos técnicos y ambientales que garanticen la viabilidad de estas tecnologías en contextos urbanos, además de servir como base para futuras normativas sobre emisiones industriales a pequeña y mediana escala.
3. Desarrollar de catalizadores para mejorar la eficiencia del proceso térmico de la reacción de pirólisis: Esta línea de investigación plantea la síntesis y caracterización de catalizadores biobasados (por ejemplo, a partir de minerales naturales o residuos agrícolas) que puedan ser utilizados en procesos de pirólisis catalítica. El objetivo es reducir las temperaturas de reacción, mejorar la calidad de los productos obtenidos (líquido, gas y biochar) y disminuir los tiempos de residencia. Esta investigación permitiría avanzar hacia una pirólisis más eficiente, económica y adaptada a recursos locales disponibles en Guatemala.
4. Evaluar la aplicación agrícola del biochar producido y su impacto en la fertilidad del suelo y retención de carbono: Se sugiere llevar a cabo ensayos de aplicación de biochar obtenido de residuos locales en suelos agrícolas guatemaltecos. La investigación evaluaría parámetros como capacidad de retención de humedad,

incremento de materia orgánica, fijación de nutrientes y de carbono. Se buscaría cuantificar los beneficios en términos de productividad agrícola y resiliencia de cultivos ante el cambio climático, posicionando al biochar como una solución agroecológica viable y alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

5. Comparar el desempeño económico y ambiental entre pirólisis, gasificación, digestión anaerobia y otras técnicas de tratamiento de residuos sólidos: Esta propuesta busca comparar las tecnologías de valorización de residuos en cuanto a costos de implementación, producción de energía, impacto ambiental y generación de subproductos útiles. Utilizando análisis de ciclo de vida (LCA) y evaluación de costo-beneficio, se obtendrían criterios técnicos para orientar inversiones y políticas públicas hacia la tecnología más adecuada según el tipo de residuo y el contexto territorial específico. Esto se recomienda hacerlo con un enfoque integral que permita tomar en cuenta la evaluación de proyectos contextualizada, evitando sesgar la aplicabilidad de cada técnica con resultados parciales.
6. Estudiar la Integración de pirólisis con sistemas de recolección selectiva y modelos de economía circular comunitaria: Este estudio se enfocaría en diseñar e implementar esquemas piloto de recolección diferenciada de residuos secos y húmedos, vinculados directamente con unidades locales de pirólisis. A través del diseño participativo y la articulación con redes comunitarias, se buscaría establecer modelos funcionales de economía circular en barrios, municipios o cooperativas rurales. Esta investigación también analizaría la inclusión de recicladores informales y la viabilidad organizativa de los modelos de gestión descentralizada.
7. Diseño participativo de plantas piloto con enfoque de tecnología apropiada y bajo costo: La investigación consistiría en el desarrollo de diseños modulares de plantas de pirólisis construidas con materiales accesibles y operables por técnicos locales, integrando principios de ergonomía, eficiencia energética y seguridad. Mediante metodologías participativas con comunidades y universidades, se validaría la funcionalidad de los prototipos, generando manuales de operación y

guías de escalamiento para contextos rurales o periurbanos con limitados recursos técnicos y financieros.

8. Estudio del potencial de residuos agrícolas específicos (como cascarilla de café o maíz) en procesos de conversión térmica: Este proyecto se enfocaría en la caracterización fisicoquímica de residuos agroindustriales poco valorizados, como la cascarilla de café, el olote de maíz o residuos de palma africana, para evaluar su comportamiento en pirólisis. Se analizaría su poder calorífico, composición elemental y rendimiento de productos, con el fin de determinar su viabilidad como materia prima energética. Los resultados aportarían información valiosa para generar soluciones energéticas sostenibles en zonas productoras que carecen de acceso a redes convencionales de energía.
9. Ampliación de parámetros y residuos sólidos estudiados en los modelos cinéticos y de escalamiento: En este caso, se propone plantear estudios experimentales extendidos a múltiples tipos de residuos, que permitan abarcar casos específicos y generar conclusiones por cada uno de aquellos materiales que puedan definirse de alto potencial. Esto contribuirá a generar la información necesaria sobre la potencial aplicación a cada tipo de residuo y las implicaciones que el uso de uno u otro material tienen sobre el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilera, R.; Ciravegna, L.; Cuervo-Cazurra, A. and M. A. Gonzalez-Perez (2017) Multilatinas and the internationalization of Latin American firms. *Journal of World Business*, 52(4). pp.447–460.
2. Alexandra, L. C. (2012). *Municipal Solid Waste: Turning a Problem into Resource*. World Bank. pp. 1–4.
3. 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.
4. Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste management*, 29(10), 2625-2643.
5. Alvarado Flores, J. J., Alcaraz Vera, J. V., Ávalos Rodríguez, M. L., López Sosa, L. B., Rutiaga Quiñones, J. G., Pintor Ibarra, L. F. & Aguado Zarraga, R. (2022). Analysis of pyrolysis kinetic parameters based on various mathematical models for more than twenty different biomasses: a review. *Energies*, 15(18), 6524.
6. Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Artetxe, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Kinetic study of lignocellulosic biomass oxidative pyrolysis. *Fuel*, 95, 305-311.
7. Andrady, A. L. (Ed.). (2003). *Plastics and the Environment*. John Wiley & Sons.
8. Antal MJ, Croiset E, Dai X, DeAlmeida C, Mok WSL, & Norberg N, (1996). High-yield biomass charcoal. *Energy & Fuels*. 1996;10(3). pp. 652-658. DOI: 10.1021/ef9501859
9. Arena, U., Ardolino, F., & Di Gregorio, F. (2019). Waste to energy in the circular economy: A review. *Sustainability*, 11(20), 5676.
10. Ashby, M. F., Shercliff, H., & Cebon, D. (2018). *Materials: engineering, science, processing and design*. Butterworth-Heinemann.

11. Asociación de Azucareros de Guatemala (AZAGUA). (2022). Bagazo de caña: subproducto clave para la sostenibilidad del sector. Recuperado de: <https://www.azucar.com.gt/tag/bagazo-de-cana/>
12. ASTM International. (2019a). ASTM D240 - 19 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter.
13. ASTM International. (2019b). ASTM D4052 - 19 Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter.
14. ASTM International. (2019c). ASTM D445 - 19e1 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).
15. ASTM International. (2019d). ASTM D93 / D93M - 19 Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester.
16. ASTM International. (2020). ASTM D4294 - 20 Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry.
17. Averkamp, H. (2023). Cash Flow Statement. Accountingcoach.com; AccountingCoach. Recuperado de: <https://www.accountingcoach.com/cash-flow-statement/explanation>
18. Bajpai, P. (2024). Recycling and deinking of recovered paper. Elsevier.
19. Baldé, K., D'Angelo, E., Forti, V., Kuehr, R., & van den Brink, S. (2018). Waste mercury perspective: 2010-2035 from global to regional.
20. Banco Mundial. (2015). Latinoamérica Indígena en el Siglo XXI. Washington, D.C.: Banco Mundial. Licencia: Creative Commons de Reconocimiento CC BY 3.0 IGO. pp. 24-88.
21. Banco Mundial. (2019). Guatemala: Towards a Sustainable and Inclusive Waste Management System. Recuperado de: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2019/06/07/guatemala-towards-a-sustainable-and-inclusive-waste-management-system>
Banco Mundial. (2023). Guatemala Panorama general. Recuperado de: <https://www.bancomundial.org/es/country/guatemala/overview>

22. Bangash, M. A., Hussain, A., Khan, N., & Qiu, Y. (2024). Optimizing Waste Management and Enhancing Asphalt Performance: A Sustainable Approach using Discarded Baby Diapers and Face Masks. *International Journal of Transportation Science and Technology*.
23. Bañón, E., Marcilla, A., García, A. N., Martínez, P., & León, M. (2016). Kinetic model of the thermal pyrolysis of chrome tanned leather treated with NaOH under different conditions using thermogravimetric analysis. *Waste management*, 48, 285-299.
24. Baranski, A. (2021). Plastic pyrolysis pros and cons: Converting plastics into energy. *Profolus*. <https://www.profolus.com/topics/plastic-pyrolysis-pros-and-cons-converting-plastics-into-energy/>
25. Batle, F. & González, J. (2010). *Compendio de Legislación Ambiental*. Gobierno de Guatemala con apoyo de USAID. Guatemala. pp. 214-434.
26. Bauce G., Córdova M. y Avila A. (2018). Operacionalización de variables. *Revista del Instituto Nacional de Higiene "Rafael Rangel"*, 42-49 pp.
27. Beston. (2025). Especificaciones de plantas de tratamiento de residuos con Pirólisis. *Bestongroup.net*. Recuperado de: <https://www.bestongroup.net/case/>
28. Boardman, A. E., Greenberg, D. H., Vining, A. R., & Weimer, D. L. (2017). *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice* (4th ed.). Cambridge University Press. pp. 1-223.
29. Boateng, A. A., Anderson, W. F., & Phillips, J. G. (2007). Bermudagrass for biofuels: effect of two genotypes on pyrolysis product yield. *Energy & fuels*, 21(2), 1183-1187.
30. Bovee, J. M. (2014). *A study of switchgrass pyrolysis: Product variability and reaction kinetics*. Michigan State University.
31. Brandes, E. A., & Brook, G. B. (Eds.). (2013). *Smithells metals reference book*. Elsevier.
32. Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2017). *Principles of Corporate Finance* (12th ed.). McGraw-Hill Education. pp. 1-976.

33. Bridgewater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and bioenergy*, 38, 68-94.
34. Brigham, E. F., & Houston, J. F. (2011). *Fundamentals of Financial Management* (12th ed.). Cengage Learning. pp. 1-832.
35. Brown, L. J., Collard, F. X., & Görgens, J. (2017). Pyrolysis of fibre residues with plastic contamination from a paper recycling mill: Energy recoveries. *Energy Conversion and Management*, 133, 110-117.
36. Bungay, V. C. (2017). Kinetic study on the pyrolysis and gasification of plastic waste. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 193-198.
37. Callegari, A., Hlavinek, P., & Capodaglio, A. G. (2018). Production of energy (biodiesel) and recovery of materials (biochar) from pyrolysis of urban waste sludge. *Revista Ambiente & Água*, 13, e2128.
38. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley. pp. 1-992.
39. Charitopoulou, M. A., Lappas, A. A., & Achilias, D. S. (2023). Thermo-chemical recycling of plastics retrieved from waste electric and electronic equipment (WEEE) by pyrolysis: Identification of the polymer type, removal of bromine compounds from plastics based on an environmentally-friendly process and characterization of the pyrolysates. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 35, 101210.
40. Castells, X., & García, E. (2012). *La pirólisis, Tratamiento y valorización energética de residuos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos. pp. 1-28.
41. CEPAL. (2019). *Latin American Economic Outlook 2019. Development in Transition*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe: Santiago.
42. Chen, P. Y., Lin, A. Y. M., Lin, Y. S., Seki, Y., Stokes, A. G., Peyras, J. & McKittrick, J. (2008). Structure and mechanical properties of selected biological materials. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 1(3), 208-226.
43. Chesbrough, H. (2010). *Business Model Innovation: Opportunities and Barriers*. *Long Range Planning*, 43(2-3), pp. 354-363.

44. Cho, E. J., Lee, Y. G., Song, Y., Kim, H. Y., Nguyen, D. T., & Bae, H. J. (2023). Converting textile waste into value-added chemicals: An integrated bio-refinery process. *Environmental Science and Ecotechnology*, 15, 100238.
45. Choi, M. K., Park, H. C., & Choi, H. S. (2018). Comprehensive evaluation of various pyrolysis reaction mechanisms for pyrolysis process simulation. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 130, 19-35.
46. Conesa, J. A., Font, R., Fullana, A., Martin-Gullon, I., Aracil, I., Gálvez, A. & Gómez-Rico, M. F. (2009). Comparison between emissions from the pyrolysis and combustion of different wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(1), 95-102.
47. CONRED. (2020). Evaluaciones en viviendas, Fenómenos tropicales. Guatemala. Recuperado de:
<https://conred.gob.gt/category/emergencia/emergencia-iota/>
48. Daniel, C., & Besenhard, J. O. (Eds.). (2012). *Handbook of battery materials*. John Wiley & Sons.
49. Demirbas, A. (2009). Pyrolysis mechanisms of biomass materials. *Energy Sources, Part A*, 31(13), 1186-1193.
50. Demirbas, A. (2007). Effect of temperature on pyrolysis products from biomass. *Energy Sources, Part A*, 29(4), 329-336.
51. Demirbas A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004;72(2). pp. 243-248. DOI: 10.1016/J.JAAP.2004.07.003
52. Dimitris, S., & Achilias, L. A. (2014). Recent advances in the chemical recycling of polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). *Mater. Recycl. Trends Perspect*, 3, 64.
53. Dutrénit, G.; Aguirre-Bastos, C.; Puchet, M. and M. Salazar (2021) Latin America. In *UNESCO Science Report: The Race Against Time for Smarter Development*. Schneegans, S.; Straza, T. and J. Lewis (eds). UNESCO Publishing: Paris. pp 1-38.

54. Encinar, J. M., & González, J. F. (2008). Pyrolysis of synthetic polymers and plastic wastes. Kinetic study. *Fuel processing technology*, 89(7), 678-686.
55. Environmental Protection Agency (EPA). (2021). Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures Report. Recuperado de: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>
56. Fernández, A. (2020). Análisis preliminar de modelos de pirólisis de biomasa para generación de combustibles a partir de residuos. Sevilla, España: Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética. pp.1-128.
57. Fernández, J. (2008). Poder calorífico. Argentina: Universidad tecnológica nacional. pp. 1-334.
58. Ferreira, M. J., Almeida, M. F., & Freitas, F. (2011). Formulation and characterization of leather and rubber wastes composites. *Polymer Engineering & Science*, 51(7), 1418-1427.
59. Furrer, D. U., & Semiatin, S. L. (2010). *ASM Handbook W. Properties and selection: irons, steels and high performance alloys*, 1.
60. Gai, C., Dong, Y., & Zhang, T. (2013). The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions. *Bioresource technology*, 127, 298-305.
61. Gandidi, I. M., Susila, M. D., Mustofa, A., and Pambudi, N. A. (2018). Thermal–Catalytic cracking of real MSW into Bio-Crude Oil. *J. Energy Inst.* 91, pp. 304–310. doi: 10.1016/j.joei.2016.11.005
62. Gani, A., & Naruse, I. (2007). Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. *Renewable energy*, 32(4), 649-661.
63. Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7), e1700782.
64. Gholizadeh, M., Li, C., Zhang, S., Wang, Y., Niu, S., Li, Y., & Hu, X. (2020). Progress of the development of reactors for pyrolysis of municipal waste. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(12), 5885-5915.

65. González, M., & Castillo, A. (2018). Solid Waste Management and Recycling in Latin America and the Caribbean. In *Recycling*. Springer. pp. 43-54.
66. Gupta, S., Kang, D. H., & Ranaivoson, A. (2009). Hydraulic and mechanical properties of recycled materials.
67. Guerrero, R., Marrero, G., Martínez, J., & Puch, L. (2010). Biocombustibles líquidos: Situación actual y oportunidades de futuro para España. Madrid, España: Fundación IDEAS. pp. 1-289.
68. Hart, A., Ebiundu, K., Peretomode, E., Onyeaka, H., Nwabor, O. F., & Obileke, K. (2022). Value-added materials recovered from waste bone biomass: technologies and applications. *RSC advances*, 12(34), 22302-22330.
69. Hoorweg, D., Bhada-Tata, P., & Kennedy, C. (2013). Environment: Waste production must peak this century. *Nature*, 502(7473), 615-617.
70. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126.
71. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA). (2024). Manual técnico para el cultivo de aguacate en Guatemala. ICTA. Recuperado de: <https://www.icta.gob.gt/publicaciones/Aguacate/Manual%20aguacate%202024.pdf>
72. Intelligen. (2020). Intelligen Inc., SuperPro Designer, SchedulePro, EnviroPro. Recuperado de: <https://www.intelligen.com/industries/wastewater-treatment/>
73. Ionescu, G., & Bulmău, C. (2019). Estimation of energy potential for solid pyrolysis by-products using analytical methods. *Revista Analytical Pyrolysis*. Londres, Reino Unido. IntechOpen©. pp. 71-84. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80861>
74. ISM. (s.f.). What is the waste hierarchy? ISM Waste & Recycling. Recuperado de: <https://ismwaste.co.uk/help/what-is-the-waste-hierarchy>
75. Johnson, M. W., Christensen, C. M., & Kagermann, H. (2008). Reinventing Your Business Model. *Harvard Business Review*, 86(12), 50-59.

76. Kaminsky, W. (2010). Fluidized bed pyrolysis of waste polymer composites for oil and gas recovery. In *Management, recycling and reuse of waste composites* (pp. 192-213). Woodhead Publishing.
77. Kanoo, B., & Garg, A. (2023). Effect of diaper waste on composting of household wet biodegradable waste in a decentralized system. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(44), 98966-98976.
78. Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development, Washington, DC. World Bank©. pp. 18-58. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
79. Kerzner, H. (2017). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling* (12th ed.). Wiley. pp. 1-848.
80. Khan, S., & Iqbal, A. (2023). Organic polymers revolution: Applications and formation strategies, and future perspectives. *Journal of Polymer Science and Engineering*, 6(1), 3125.
81. Khanyile, A., Caws, G. C., Nkomo, S. P. L., & Mkhize, N. M. (2020). Characterisation study of various disposable diaper brands. *Sustainability*, 12(24), 10437.
82. Kluska, J., Ochnio, M., Kardaś, D., & Heda, Ł. (2019). The influence of temperature on the physicochemical properties of products of pyrolysis of leather-tannery waste. *Waste Management*, 88, 248-256.
83. Kumar, A., Singh, E., Mishra, R., Lo, S. L., & Kumar, S. (2023). Global trends in municipal solid waste treatment technologies through the lens of sustainable energy development opportunity. *Energy*, 275, 127471.
84. Kweon, S. W., Ko, Y. C., Lee, Y. J., Cha, J. E., Moon, B. G., & Kim, H. J. (2024). Determination of In-use Properties of Paper Towels. *BioResources*, 19(4).1-22.
85. Lambert, S., Sinclair, C., & Boxall, A. (2013). Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Volume 227, 1-53.

86. Lefebvre, J., Mamleev, V., Le Bras, M., & Bourbigot, S. (2005). Kinetic analysis of pyrolysis of cross-linked polymers. *Polymer degradation and stability*, 88(1), 85-91.
87. Levenspiel, O. (1999). *Chemical reaction engineering: An introduction to the design of chemical reactors*. John Wiley and Sons (WIE). pp. 1-688.
88. Liu, W., Zhong, X., Han, J., Qin, W., Liu, T., Zhao, C., & Chang, Z. (2018). Kinetic study and pyrolysis behaviors of spent LiFePO₄ batteries. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 1289-1299.
89. Lu, J. W., Chang, N. B., & Liao, L. (2013). Environmental informatics for solid and hazardous waste management: advances, challenges, and perspectives. *Critical reviews in environmental science and technology*, 43(15), 1557-1656.
90. Luchese, C. L., Engel, J. B., & Tessaro, I. C. (2021). Disposable, reusable and biodegradable hygiene products. In *Antimicrobial Textiles from Natural Resources* (pp. 421-454). Woodhead Publishing.
91. Lujan, J. (2012). *Breve Historia Contemporánea de Guatemala*. Fondo de Cultura Económica. Cuarta edición. Guatemala. pp.1-582.
92. Lundie, S., & Petersen, A. (2019). The role of waste-to-energy in the circular economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. pp. 1-26.
93. Lyon, R. E. (1998). Pyrolysis kinetics of char forming polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 61(2), 201-210.
94. MARN. (2011). *Compendio de Convenios y Tratados Internacionales Ambientales Ratificados por Guatemala*. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. COPREDEH. Guatemala. ISBN: 978-9929-587-26-7. pp. 1-545.
95. MARN. (2015). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos*. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de Guatemala. pp. 1-45.
96. MARN. (2021a). *Acuerdo Gubernativo Número 164-2021, Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes*. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de Guatemala. pp. 1-40.

97. MARN. (2021b). Convenios y Tratados Ambientales Ratificados por Guatemala. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Guatemala. Recuperado de: https://www.marn.gob.gt/wpfd_file/convenios-y-tratados-ambientales-ratificados-por-guatemala/
98. MARN. (2021c). Guía para elaborar Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos Comunes. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Guatemala, recuperado de: https://www.marn.gob.gt/wpfd_file/guia-para-elaborar-estudios-de-caracterizacion-de-residuos-solidos-comunes/
99. Márquez, A., Patlaka, E., Sfakiotakis, S., Ortiz, I., & Sánchez-Hervás, J. M. (2023). Pyrolysis of municipal solid waste: A kinetic study through multi-step reaction models. *Waste Management*, 172, 171-181.
100. Martínez, J. (1996). La Situación de la Basura en la ciudad de Guatemala. Centro de Estudios Urbanos y Regionales. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. pp. 1-58.
101. McLellan, G. W., & Shand, E. B. (1984). *Glass engineering handbook*. McGraw-Hill.
102. Miandad, R., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Rehan, M., and Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: a review. *Process Safety Environ. Protect.* 102, pp. 822–838. DOI: 10.1016/j.psep.2016.06.022
103. Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M. A., Aburiazaiza, A. S., Khan, H., Ismail, I. M. I., Dhavamani, J., Gardy, J., Hassanpour, A., & Nizami, A.-S. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste: Moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in energy research*, 7. pp. 1-17. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00027>
104. Ministerio de Energía y Minas. (2020). Precios Combustible Nacionales - Ministerio de Energía y Minas; Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de: https://mem.gob.gt/que-hacemos/hidrocarburos/comercializacion-downstream/precios-combustible-nacionales/?utm_source=chatgpt.com
105. Miranda, M., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2013). Pyrolysis of rubber tyre wastes: A kinetic study. *Fuel*, 103, 542-552.

106. Mishra, G., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2015). Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood. *Bioresource Technology*, 182, 282-288.
107. Miskolczi, N. (2004). Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. *Polymer Degradation and Stability*, 20-34.
108. Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & fuels*, 20(3), 848-889.
109. Moosbrugger, C., Sanders, B. R., Anton, G. J., Hrivnak, N., Kinson, J., Polakowski, C., ... & Scott Jr, W. W. (2003). *ASM handbook* (Vol. 13). S. D. Cramer, & B. S. Covino Jr (Eds.). Materials Park, Ohio: ASM international.
110. Morales, M. (2016). Guatemala: autoritarismo e interculturalidad. Centro de documentación y estudios para la paz. Guatemala. pp. 1-13.
111. Mortezaeikia, V., Tavakoli, O., & Khodaparasti, M. S. (2021). A review on kinetic study approach for pyrolysis of plastic wastes using thermogravimetric analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 160, 105340.
112. Municipalidad de Guatemala. (2021). Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Recuperado de:
http://www.muniguate.com/transparencia/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=246:plan-de-residuos-solidos&id=3424:plan-de-residuos-solidos&Itemid=554
113. Naciones Unidas. (1999). Manual de Legislación Ambiental de Guatemala. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Guatemala. pp. 1-114.
114. Nanthini, J., & Sudesh, K. (2017). Biodegradation of natural rubber and natural rubber products by *Streptomyces* sp. strain CFMR 7. *Journal of Polymers and the Environment*, 25, 606-616.
115. Núñez, L., Zambrano, G., & Rossi, C. (2019). Plásticos Biodegradables: terminología y normativa como referencia en el ámbito científico y legislativo. Centro de Procesos Industriales, Universidad del Valle de Guatemala. *Revista* 38. pp. 13-21.

116. Oasmaa, A., van de Beld, B., Saari, P., Elliott, D. C., & Solantausta, Y. (2015). Norms, standards, and legislation for fast pyrolysis bio-oils from lignocellulosic biomass. *Energy & Fuels: An American Chemical Society Journal*, 29(4), 2471-2484. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00026>
117. Ounas, A., Aboulkas, A., Bacaoui, A., & Yaacoubi, A. (2011). Pyrolysis of olive residue and sugar cane bagasse: non-isothermal thermogravimetric kinetic analysis. *Bioresource technology*, 102(24), 11234-11238.
118. Ozola, Z. U., Vesere, R., Kalnins, S. N., & Blumberga, D. (2019). Paper waste recycling. circular economy aspects. *Environmental and Climate Technologies*, 23(3), 260-273.
119. Park, J. W., Oh, S. C., Lee, H. P., Kim, H. T., & Yoo, K. O. (2000). A kinetic analysis of thermal degradation of polymers using a dynamic method. *Polymer Degradation and Stability*, 67(3), 535-540.
120. Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 233-248.
121. Panshin, A. J., & Zeeuw, C. D. (1981). *Textbook of wood technology*. McGraw-Hill. pp. 772-783.
122. Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th ed.). McGraw-Hill. pp. 1-179.
123. Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (5th ed.). McGraw-Hill. pp. 1-267.
124. Pielichowski, K., Njuguna, J., & Majka, T. M. (2022). *Thermal degradation of polymeric materials*. Elsevier.
125. Pivnenko, K., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2015). Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances. *Waste management*, 45, 134-142.
126. Project Management Institute (PMI). (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)* (6th ed.). PMI Publications.

127. Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating Shared Value. Harvard business review. Recuperado de: <https://hbr.org/2011/01/the-big-idea-creating-shared-value>
128. Procurador de los Derechos Humanos de Guatemala. (S. f.). Ley de la Comisión de Derechos Humanos del Congreso de la República de Guatemala y del Procurador de los Derechos Humanos. Publicados por el Congreso de la República de Guatemala. pp.17-36. Recuperado de: https://www.pdh.org.gt/files/Ley_Procurador_Derechos%20Humanos.pdf
129. Radhakrishnan, K., Senthil Kumar, P., Rangasamy, G., Praveen Perumal, L., Sanaulla, S., Nilavendhan, S., Manivasagan, V., & Saranya, K. (2023). A critical review on pyrolysis method as sustainable conversion of waste plastics into fuels. Fuel (London, England), 337(126890), 126890. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126890>
130. Raja, P., & Barron, A. (2021). Introduction to Elemental Analysis. Texas, Estados Unidos: Rice University. pp. 1-358.
131. Ranzi, E., Cuoci, A., Faravelli, T., Frassoldati, A., Migliavacca, G., Pierucci, S., & Sommariva, S. (2008). Chemical kinetics of biomass pyrolysis. Energy & Fuels, 22(6), 4292-4300.
132. Ratnasari, D. K., Nahil, M. A., and Williams, P. T. (2017). Catalytic pyrolysis of waste plastics using staged catalysis for production of gasoline range hydrocarbon oils. J. Anal. Appl. Pyrolysis 124, pp. 631–637. doi: 10.1016/j.jaap.2016.12.027
133. Raw, P. (2012). Composition of foods raw, processed, prepared usda national nutrient database for standard reference, release 25. United States Department of Agriculture (USDA).
134. Rehan, M., Nizami, A. S., Shahzad, K., Ouda, O. K. M., Ismail, I. M. I., Almeelbi, T., et al. (2016). Pyrolytic liquid fuel: a source of renewable energy in Makkah. Energy Sources A 38, pp. 2598–2603. doi: 10.1080/15567036.2016.1153753

135. Reina, J., Velo, E., & Puigjaner, L. (1998). Kinetic study of the pyrolysis of waste wood. *Industrial & engineering chemistry research*, 37(11), 4290-4295.
136. Rosenfeld, P. E., & Feng, L. (2011). *Risks of hazardous wastes*. William Andrew.
137. Santos, V. (2021). Advances in the Pyrolysis Process and the Generation of Bioenergy. M. Bartoli, & M. Giorcelli (Eds.), *Recent perspectives in Pyrolysis Research*. Recuperado de: <https://www.intechopen.com/chapters/78772>
138. Santos, R. J., Agostini, D. L., Cabrera, F. C., Budenberg, E. R., & Job, A. E. (2015). Recycling leather waste: Preparing and studying on the microstructure, mechanical, and rheological properties of leather waste/rubber composite. *Polymer Composites*, 36(12), 2275-2281.
139. Schaffer, S., Pröll, T., Al Afif, R., & Pfeifer, C. (2019). A mass and energy balance based process modelling study for the pyrolysis of cotton stalks with char utilization for sustainable soil enhancement and carbon sotrage. Vienna, Austria: Elsevier. pp. 281-290.
140. Serrano, D. P., Aguado, J., and Escola, J. M. (2012). Developing advanced catalysts for the conversion of polyolefinic waste plastics into fuels and chemicals. *ACS Catal.* 2, pp. 1924–1941. doi: 10.1021/cs3003403
141. Shea, J. J. (2006). *Handbook of Plastics Technologies* [Book Review]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 22(6), 53-53.
142. Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Cengage Learning. pp. 1-992.
143. Smith, J. M., van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (7th ed.). McGraw-Hill Education. pp. 1-816.
144. Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5th ed.). CRC Press. pp. 1-482.
145. Sun Y, Gao B, Yao Y, Fang J, Zhang M, & Zhou Y. (2014). Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical Engineering Journal*. 2014;240. pp. 574-578. DOI: 10.1016/J.CEJ.2013.10.081

146. Tanimu, M. I., Ghazi, T. I. M., Harun, R. M., & Idris, A. (2014). Effect of carbon to nitrogen ratio of food waste on biogas methane production in a batch mesophilic anaerobic digester. *International journal of innovation, management and technology*, 5(2), 116.
147. Tchobanoglous, G. (2009). *Solid waste management. Environmental engineering: environmental health and safety for municipal infrastructure, land use and planning, and industry*. Wiley, New Jersey, 177-307.
148. Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.
149. Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* (2nd ed.). Elsevier. pp. 1-156.
150. Treybal, R. (1988). *Operaciones de transferencia de masa*. México: McGraw-Hill. pp. 1-800.
151. 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.
152. USAID (2020). *Country Development Cooperation Strategy (CDCS) for Guatemala*. C.A. pp 1-13.
153. UVG. (2018). UVG, nosotros; Universidad del Valle de Guatemala. Recuperado de: <https://www.uvg.edu.gt/nosotros/inicio/>
154. Velasco Perez, M., Sotelo Navarro, P. X., Vazquez Morillas, A., Espinosa Valdemar, R. M., & Hermoso Lopez Araiza, J. P. (2021). Waste management and environmental impact of absorbent hygiene products: A review. *Waste Management & Research*, 39(6), 767-783.
155. Viktorová, N., Szarka, A., & Hrouzková, S. (2022). Recent developments and emerging trends in paint industry wastewater treatment methods. *Applied Sciences*, 12(20), 10678.

156. Viltres, R., & Alarcón, A. (2022). Caracterización química del bio-aceite de pirólisis rápida de biomasa. *Rev. Cubana de Química*. e-ISSN: 2224-5421. Vol. 34, no.1.
157. Wang, S., Ru, B., Lin, H., Dai, G., Wang, Y., & Luo, Z. (2016). Kinetic study on pyrolysis of biomass components: a critical review. *Current Organic Chemistry*, 20(23), 2489-2513.
158. Weiss, K. D. (1997). Paint and coatings: A mature industry in transition. *Progress in polymer science*, 22(2), 203-245.
159. Weißenbach, T., Pomberger, R., & Sarc, R. (2019). Composition of mixed commercial waste with focus on recyclable fractions. In *7th International Conference on Sustainable Solid Waste Management* (pp. 1-8).
160. Westerhout, R. W. J., Waanders, J., Kuipers, J. A. M., & van Swaaij, W. P. M. (1997). Kinetics of the low-temperature pyrolysis of polyethene, polypropene, and polystyrene modeling, experimental determination, and comparison with literature models and data. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(6), 1955-1964.
161. White, J. E., Catallo, W. J., & Legendre, B. L. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: a comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 91(1), 1-33.
162. Williams, P. T., & Slaney, E. (2007). Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 754-769.
163. Xie, H., Yu, Q., Qin, Q., Zhang, H., & Li, P. (2013). Study on pyrolysis characteristics and kinetics of biomass and its components. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(1).
164. Yalcin-Enis, I., Kucukali-Ozturk, M., & Sezgin, H. (2019). Risks and management of textile waste. *Nanoscience and biotechnology for environmental applications*, 29-53.

165. Yang, Y. B., Phan, A. N., Ryu, C., Sharifi, V., & Swithenbank, J. (2007). Mathematical modelling of slow pyrolysis of segregated solid wastes in a packed-bed pyrolyser. *Fuel*, 86(1-2), 169-180.
166. Zhao, D., Wang, X., Miller, J. B., & Huber, G. W. (2020). The chemistry and kinetics of polyethylene pyrolysis: a process to produce fuels and chemicals. *ChemSusChem*, 13(7), 1764-1774.
167. Zhou, C., Yang, W., & Blasiak, W. (2013). Characteristics of waste printing paper and cardboard in a reactor pyrolyzed by preheated agents. *Fuel processing technology*, 116, 63-71.

ANEXOS

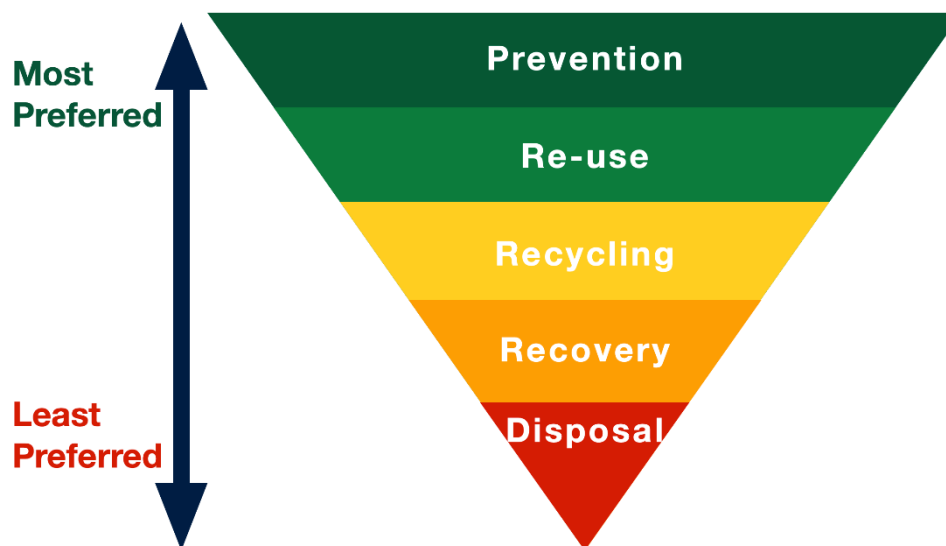
Anexo 1 Elementos teóricos complementarios

1. Manejo de Residuos Sólidos

1.1 Técnicas de manejo de residuos sólidos

La gestión de residuos sólidos implica una jerarquía de enfoques de tratamiento comúnmente representados por la pirámide de tratamiento de residuos sólidos. Esta pirámide ilustra una preferencia por la prevención y reducción de residuos en la cima, seguida de varios métodos alternativos de tratamiento y eliminación de residuos. En esta sección se presenta un breve análisis descriptivo de las técnicas destacadas de tratamiento de residuos sólidos alineadas con la pirámide de tratamiento de residuos sólidos, considerando la reducción, la reutilización, el reciclaje, la recuperación de energía y la eliminación de residuos.

Figura 35: Pirámide de tratamiento de residuos sólidos



Fuente: ISM (s.f.)

1.1.1 Reducción de Residuos y Separación en Fuentes:

La base de la pirámide de tratamiento de residuos sólidos es la reducción de residuos en la fuente. Estrategias como la minimización de residuos, el rediseño de productos y las campañas de sensibilización pública tienen como objetivo reducir la generación general de residuos (Hoorweg et al., 2013). Además, la separación en origen estimula a los hogares y las industrias a separar los materiales reciclables y no reciclables en el punto de origen, facilitando los procesos de tratamiento posteriores. Muchos esfuerzos gubernamentales se han orientado en esta línea en países con altos ingresos per cápita.

1.1.2. Reutilizar:

El segundo nivel de la pirámide enfatiza la importancia de la reutilización. Los elementos que aún funcionan se pueden redirigir para un uso secundario, evitando que entren en el flujo de residuos. Las iniciativas comunitarias, como tiendas de segunda mano, centros de donación y talleres de reparación, contribuyen a extender la vida útil de los productos y reducir la demanda de nuevos recursos (EPA, 2021). Además, existen esfuerzos de varias instituciones para utilizar diferentes piezas para funciones radicalmente diferentes a las que originalmente se destinaron en su fabricación, por ejemplo, convertir botellas en ladrillo, floreros o láminas para jardín.

1.1.3. Reciclaje:

El reciclaje ocupa una posición central en la pirámide de tratamiento de residuos sólidos. Materiales como papel, vidrio, metales y plásticos pueden someterse a procesos para fabricar nuevos productos. El reciclaje conserva recursos, reduce el consumo de energía y minimiza los impactos ambientales asociados con la extracción y el procesamiento de materias primas. Su principal característica es que el material se procesa con alguna técnica específica, para convertirlo en una pieza diferente que tiene una aplicación específica (EPA, 2021). Esta técnica tiene una amplia gama de aplicaciones, por representar una fuente de ingresos para muchas industrias, que al emplear materiales reciclados reducen sus costos directos de operación.

1.1.4. Recuperación de Energía:

Las tecnologías de conversión de residuos en energía (WTE) forman el siguiente nivel de la pirámide. Mediante incineración, digestión anaeróbica o gasificación, los residuos sólidos se convierten en energía en forma de calor o electricidad. WTE ayuda a reducir el volumen de residuos enviados a los vertederos, mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye a la producción de energía sostenible (Arena et al., 2019). Dentro de estas técnicas es donde la pirólisis puede clasificarse, siendo parte de los métodos que se prefieren antes del descarte de los residuos. Muchos países tienen esta línea de tratamientos desarrollada, para evitar llegar a acumular grandes cantidades de materiales sólidos en vertederos.

1.1.5. Vertedero:

En la base de la pirámide se encuentra el vertedero, considerado la opción menos deseable (fuera del descarte indiscriminado) debido a sus potenciales impactos ambientales. Los vertederos son sitios diseñados para la eliminación de desechos y, si bien los vertederos modernos incorporan medidas para minimizar el daño ambiental, generalmente son el último recurso en la jerarquía del tratamiento de desechos (Tchobanoglous et al., 1993).

Considerando esto, la pirámide de tratamiento de residuos sólidos proporciona un marco estructurado para gestionar los residuos de manera ambientalmente sostenible. Hacer hincapié en la reducción, la reutilización y el reciclaje de residuos antes de considerar estrategias de recuperación o eliminación de energía es clave para lograr un enfoque más circular y eficiente en el uso de recursos para la gestión de residuos sólidos. Aunque existirán siempre casos donde la recuperación energética es la última opción antes del descarte del residuo y es donde cobra su vital importancia.

Las prácticas integradas de gestión de residuos sólidos que combinan múltiples técnicas de tratamiento siguen siendo cruciales para abordar los diversos desafíos que plantean los residuos sólidos. La investigación en curso y los avances tecnológicos seguirán

dando forma a la evolución de los métodos de tratamiento de residuos sólidos en consonancia con los principios sostenibles.

1.2 Manejo de Residuos sólidos en Guatemala

La información específica sobre el tratamiento de residuos sólidos en Guatemala es limitada, no solo por la baja visibilidad que proporcionan las estadísticas nacionales, sino también por un manejo donde se cuenta con limitada capacidad de tratamiento y muchos residuos se manejan sin las técnicas adecuadas.

Dentro de los principales desafíos de la gestión de residuos sólidos en Guatemala, se pueden mencionar una gama amplia de problemas, que van desde una infraestructura inadecuada de recolección de residuos hasta instalaciones de reciclaje limitadas. El país ha luchado contra basureros o vertederos ilegales, la quema de residuos a cielo abierto y la falta de instalaciones adecuadas para tratamiento. Estos desafíos contribuyen a la contaminación ambiental, los riesgos a la salud y la degradación de los recursos naturales (Banco Mundial, 2019).

1.2.1 Recolección y Transporte de Residuos

En muchas regiones de Guatemala, particularmente en las zonas rurales, existe una falta generalizada de servicios formales de recolección de residuos. Esto conduce a la eliminación inadecuada de los materiales, incluidos el vertido a cielo abierto (o descarte indiscriminado) y la quema. Los municipios a menudo se enfrentan a recursos y capacidad limitados para implementar sistemas eficaces de recogida y transporte de residuos (Banco Mundial, 2019).

1.2.2 Gestión de vertederos

Los vertederos en Guatemala a menudo enfrentan desafíos operativos y ambientales. Algunos vertederos pueden carecer de revestimientos y sistemas de recolección de lixiviados adecuados, lo que provoca la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, además de presentar problemas de salubridad. La gestión de los vertederos

requiere prácticas mejoradas para minimizar los impactos ambientales y mejorar la eficiencia general de la eliminación de residuos (Municipalidad de Guatemala, 2021).

1.2.3 Iniciativas de reciclaje

Están surgiendo esfuerzos para promover el reciclaje en Guatemala, con iniciativas destinadas a desviar materiales reciclables de los vertederos. Sin embargo, la infraestructura de reciclaje aún se está desarrollando y es necesario aumentar la conciencia y la participación del público. Fomentar la separación de los materiales reciclables en origen y establecer instalaciones de reciclaje son pasos esenciales hacia prácticas sostenibles de gestión de residuos (Municipalidad de Guatemala, 2021).

1.2.4 Sector Informal de Residuos

El sector informal de residuos, incluidos los recicladores o recolectores de residuos, desempeña un papel importante en la gestión de residuos en Guatemala. Estas personas a menudo recolectan materiales reciclables de flujos de desechos para obtener ingresos. Integrar el sector informal en las estrategias formales de gestión de residuos es crucial para mejorar la eficiencia y la inclusión de las prácticas de gestión de residuos (Banco Mundial, 2019). Sin embargo, esto es algo difícil de realizar por el nivel educativo de los recolectores informales y los problemas políticos que el país enfrenta.

1.2.5 Políticas y estrategias gubernamentales

El gobierno guatemalteco ha reconocido la importancia de mejorar la gestión de residuos sólidos y ha implementado políticas para abordar estos problemas. Las iniciativas incluyen el desarrollo de regulaciones y directrices para la gestión de residuos, así como esfuerzos para promover la conciencia pública y la participación de la comunidad en la reducción y el reciclaje de residuos (Banco Mundial, 2019). La más reciente acción es la aprobación y publicación del Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes: Acuerdo Gubernativo Número 164-2021 (MARN, 2021a). A pesar de esto, el problema de infraestructura es crítico y limitante seria para poder

cumplir con estas políticas o normas implementadas, al punto que su ejecución ha sufrido ya varias demoras consecutivas ante la imposibilidad de la ejecución.

1.3 Actores clave del manejo de residuos sólidos en Guatemala

Las partes interesadas comunes involucradas en la gestión de residuos a nivel mundial, incluye agencias gubernamentales, autoridades locales, organizaciones no gubernamentales (ONG) y el sector privado. Guatemala presenta una situación similar, dentro de estos actores se presentan a continuación los principales:

1.3.1. Municipalidades

Los municipios de Guatemala juegan un papel central en la gestión de residuos sólidos, siendo responsables de organizar e implementar los servicios de recolección, transporte y disposición de residuos. El gobierno municipal es un actor clave en la formulación e implementación de políticas relacionadas con las prácticas de gestión de residuos a nivel local. Los municipios también participan en campañas de concientización pública para promover la eliminación y el reciclaje adecuados de residuos, además de contar con la autoridad para poder implementar reglamentos de aplicación municipal para el manejo en cada región (González y Castillo, 2018).

1.3.2. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de Guatemala es un actor gubernamental clave responsable de las políticas y regulaciones ambientales, incluidas aquellas relacionadas con el manejo de residuos sólidos. El MARN proporciona directrices y supervisión para garantizar que las prácticas de gestión de residuos se alineen con las normas y regulaciones ambientales, y tiene el principal interés de velar por la preservación de los recursos naturales (González y Castillo, 2018).

1.3.3. Organizaciones No Gubernamentales (ONG) y organizaciones comunitarias

Las organizaciones no gubernamentales y las organizaciones comunitarias desempeñan un papel fundamental en la promoción de prácticas sostenibles de gestión de residuos y

la sensibilización de las comunidades locales. Estas organizaciones suelen colaborar con los gobiernos municipales para implementar iniciativas impulsadas por la comunidad, como programas de reciclaje y campañas de reducción de residuos (González y Castillo, 2018).

1.3.4. Recicladores y sector informal

El sector informal de residuos, incluidos los recicladores o recolectores de residuos, es un actor importante en el panorama de la gestión de residuos sólidos en Guatemala. Estas personas a menudo contribuyen a la recolección y el reciclaje de desechos recuperando materiales reciclables de los flujos de desechos, representando la principal forma de manejo en la actualidad. Pero por el otro lado, al depender por completo económicamente de esta actividad y derivado de la situación política, representan un actor que puede tener posturas en contra de la tecnificación y avance del campo. De manera que, integrar el sector informal en las estrategias formales de gestión de residuos es crucial para optimizar la recuperación de recursos y mejorar los tratamientos (Banco Mundial, 2019).

1.3.5. Sector Privado y Empresas de Gestión de Residuos

Las empresas privadas de gestión de residuos y los proveedores de servicios desempeñan un papel decisivo en la recogida, el transporte y la eliminación de residuos. Estas empresas pueden ser contratadas por los municipios para prestar servicios de gestión de residuos, incluida la operación de vertederos e instalaciones de reciclaje. La colaboración entre los sectores público y privado es esencial para desarrollar sistemas de gestión de residuos eficientes y sostenibles (Banco Mundial, 2019).

1.3.6. Academia y Organismos Internacionales de Desarrollo

Las organizaciones internacionales de desarrollo, como el Banco Mundial, pueden proporcionar apoyo financiero y técnico para mejorar la infraestructura y las prácticas de gestión de residuos sólidos en Guatemala. Por otro lado, los centros de investigación y universidades locales, representan la forma principal de generar y transferir

conocimiento, además de desarrollar proyectos de investigación que promuevan la optimización de los tratamientos de residuos sólidos (González y Castillo, 2018).

De manera que, abordar los desafíos de la gestión de residuos sólidos en Guatemala requiere esfuerzos coordinados de múltiples actores clave, incluidos gobiernos municipales, autoridades ambientales nacionales, ONG, el sector privado, la academia y el sector informal de residuos. Los enfoques colaborativos que involucran la participación comunitaria e integran la experiencia de varias partes interesadas son cruciales para desarrollar sistemas de gestión de residuos eficaces y sostenibles en el país.

1.4 Normativa de manejo de residuos sólidos en Guatemala

En Guatemala, se cuenta en la actualidad principalmente con el Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes: Acuerdo Gubernativo Número 164-2021 como guía central, que establece lo mínimo que debe cumplirse para el tratamiento de residuos sólidos. Este reglamento establece requerimientos principalmente de tipo sanitario y ambiental a aplicarse en el país. La función del mismo, según se especifica en el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, es la de asegurar la protección de la salud humana y evitar la contaminación del ambiente (MARN, 2021a).

El reglamento establece también la necesidad de elaboración de Planes municipales para la gestión integral de residuos y desechos sólidos, la forma de clasificación de los materiales residuales, normas para los espacios o sitios destinados al almacenamiento temporal, normas para los recipientes o contenedores destinados al almacenamiento temporal, normas sobre el procedimiento de recolección y transporte, responsabilidades generales de los entes recolectores, normas para la construcción e instalación de estaciones de transferencia, normas para la recuperación de materiales, normas para la construcción e instalación de plantas de reciclaje de materiales recuperados, normas para la construcción e instalación de plantas de tratamiento, normas para la construcción e instalación de plantas de tratamiento por incineración, normas para la construcción e

instalación de plantas de tratamiento por reducción mecánica del volumen o tamaño, entre otros (MARN, 2021a). A pesar de este detalle general de tratamiento, no cuenta con ningún detalle sobre los tratamientos térmicos de residuos para generar combustibles, como es el caso de la pirólisis, por lo que dicha técnica no se ha regulado.

2. Procesos Químicos Industriales

Los procesos industriales químicos se refieren a los métodos y procedimientos empleados en la fabricación y producción de productos químicos a escala industrial. Estos procesos implican la transformación de materias primas en productos químicos deseados mediante diversas transformaciones químicas y físicas. Los procesos industriales químicos son diversos y abarcan una amplia gama de sectores, incluidos petroquímicos, farmacéuticos, agroquímicos y productos químicos especializados (Towler y Sinnott, 2013).

Los procesos industriales químicos implican la conversión sistemática y a gran escala de materias primas en productos químicos valiosos mediante reacciones químicas, separaciones y otras transformaciones. Estos procesos están diseñados para brindar eficiencia, seguridad y escalabilidad para satisfacer las demandas de la producción industrial (Towler y Sinnott, 2013).

2.1 Tipos de procesos químicos Industriales

Los procesos químicos industriales se pueden clasificar en función del tipo de proceso que se utiliza en la transformación, así como de la naturaleza de las operaciones unitarias que se tienen en ella. Los principales tipos de procesos químicos industriales son:

2.1.1 Clasificación en función de los flujos de materiales

Procesos por lotes (Batch)

Los procesos por lotes son un aspecto fundamental de la industria, ya que implican la producción de productos químicos en cantidades discretas o por lotes. Se caracterizan por un enfoque paso a paso, donde las materias primas se cargan en un equipo, se

producen reacciones químicas o procesos físicos, y luego el producto se separa y procesa. Esta naturaleza cíclica permite flexibilidad, lo que hace que los procesos por lotes sean adecuados para la producción de una amplia gama de productos, particularmente en las industrias farmacéutica, química especializada y alimentaria (Towler y Sinnott, 2013).

Algunas de las características clave de los procesos por lotes son:

- **Flexibilidad:** Los procesos por lotes ofrecen flexibilidad en la producción, lo que permite una fácil adaptación de recetas y formulaciones. Esto es particularmente ventajoso en industrias donde se producen múltiples productos o formulaciones con diferentes requisitos de materia prima (Towler y Sinnott, 2013).
- **Producción a pequeña escala:** Los procesos por lotes son adecuados para la producción a pequeña escala o especializada, donde la demanda de un producto en particular puede no justificar la instalación y operación de una línea de producción continua (Towler y Sinnott, 2013).
- **Personalización del producto:** La capacidad de modificar los parámetros para cada lote permite la personalización de productos, atendiendo a los requisitos específicos del cliente o a las diferentes demandas del mercado (Towler y Sinnott, 2013).
- **Investigación y desarrollo:** Los procesos por lotes se utilizan comúnmente en actividades de investigación y desarrollo (I+D), lo que permite a los científicos e ingenieros experimentar con nuevas formulaciones y procesos a menor escala antes de pasar a la producción continua a mayor escala (Towler y Sinnott, 2013).

El ciclo de operación en un proceso por lotes puede cambiar radicalmente, pero en general los procesos por lotes tienen pasos característicos, que pueden resumirse en:

- **Carga del equipo:** Las materias primas, incluidos reactivos y catalizadores, se cargan en el equipo. Este paso prepara el escenario para que se produzcan las reacciones químicas o procesos necesarios para la transformación (Levenspiel, 1999).

- **Reacción o modificación física:** Las reacciones químicas o procesos físicos tienen lugar en el reactor. Las condiciones de reacción, como la temperatura, la presión y la mezcla, se supervisan y controlan estrechamente para garantizar la calidad del producto (Levenspiel, 1999).
- **Separación de productos:** Una vez completada la reacción o transformación, el producto se separa de la mezcla de reacción. Esto puede implicar operaciones unitarias como la destilación, la filtración o la cristalización (Levenspiel, 1999).
- **Procesamiento del producto:** El producto separado puede someterse a pasos de procesamiento adicionales, como purificación, secado o formulación, según los requisitos específicos del producto final y así llevar el producto necesario al mercado (Levenspiel, 1999).
- **Limpieza y preparación para el siguiente lote:** Se limpia el equipo y se prepara para el siguiente lote. Este paso es crucial para evitar la contaminación cruzada entre lotes (Levenspiel, 1999).

Procesos Continuos

Los procesos continuos en la industria implican el flujo ininterrumpido de materiales a través de un sistema de producción, lo que permite una producción constante y consistente de productos. A diferencia de los procesos por lotes, donde la producción se produce en cantidades discretas, los procesos continuos se caracterizan por un flujo continuo de materias primas que ingresan al sistema y la eliminación constante de productos. Estos procesos se emplean a menudo en instalaciones de producción a gran escala de productos básicos como petroquímicos, polímeros y productos químicos a granel (Towler y Sinnott, 2013).

Algunas de las características clave de los procesos continuos:

- **Operación en estado estacionario:** Los procesos continuos operan en condiciones de estado estacionario, con un flujo continuo de materiales a través del sistema. Esto permite una tasa de producción constante y minimiza las fluctuaciones (Towler y Sinnott, 2013).

- Altos volúmenes de producción: Los procesos continuos son muy adecuados para la producción de grandes volúmenes, lo que los hace económicamente ventajosos para la fabricación de grandes cantidades de productos (Towler y Sinnott, 2013).
- Sistemas de control automatizados: Los procesos continuos suelen emplear sistemas de control sofisticados para monitorear y ajustar los parámetros operativos en tiempo real. Esto garantiza una calidad constante del producto y una eficiencia óptima (Towler y Sinnott, 2013).
- Eficiencia y Optimización Energética: La naturaleza continua de estos procesos permite la optimización del uso de la energía y la eficiencia de los recursos. A menudo se emplean intercambiadores de calor integrados y sistemas de reciclaje para mejorar la eficiencia energética (Towler y Sinnott, 2013).

Las operaciones unitarias empleadas en este tipo de procesos son muy diversas, pero los pasos generales de esta clasificación son:

- Introducción de materias primas: Las materias primas se introducen continuamente en el sistema. Esto puede incluir líquidos, gases o sólidos según la naturaleza del proceso químico (Levenspiel, 1999).
- Reacción y Conversión: Las reacciones químicas tienen lugar dentro de reactores o recipientes de reacción a medida que los materiales fluyen a través del sistema. Las condiciones se controlan cuidadosamente para lograr las velocidades de reacción y los rendimientos del producto deseados (Levenspiel, 1999).
- Separación y Purificación: Se emplean procesos de separación continuos, tales como columnas de destilación, centrífugas y filtración por membrana, para separar y purificar el producto deseado de la mezcla de reacción (Levenspiel, 1999).
- Procesamiento y refinamiento del producto: El producto separado se somete a pasos de procesamiento adicionales, que incluyen purificación, secado y refinación, para cumplir con las especificaciones requeridas (Levenspiel, 1999).

- Control y seguimiento automatizados: Los procesos continuos utilizan sistemas de control automatizados para monitorear y ajustar los parámetros operativos en tiempo real. Los sensores y la instrumentación desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de condiciones óptimas (Levenspiel, 1999).

Procesos Semi-Continuos

Los procesos semicontinuos representan un enfoque híbrido en la industria, incorporando elementos de operaciones tanto por lotes como continuas. Este enfoque flexible y versátil permite que ciertos aspectos de la producción sean continuos, mientras que otras etapas conservan las características de los procesos por lotes. Los procesos semicontinuos se emplean en situaciones en las que se desean las ventajas del procesamiento continuo y por lotes, ofreciendo beneficios como flexibilidad, reducción del tiempo de inactividad y utilización optimizada de los recursos (Towler y Sinnott, 2013).

Características clave de los procesos semicontinuos:

- Automatización parcial: Los procesos semicontinuos a menudo implican un nivel de automatización, lo que permite que ciertas etapas de la producción funcionen de forma continua. Esta automatización contribuye a la eficiencia y la coherencia (Towler y Sinnott, 2013).
- Diseño modular: El diseño de procesos semicontinuos puede ser modular, permitiendo la separación de determinadas etapas para una optimización individual. Esto facilita el escalado y modificación del sistema de producción (Towler y Sinnott, 2013).
- Producción flexible: Los procesos semicontinuos ofrecen flexibilidad, lo que permite realizar ajustes en respuesta a las diferentes demandas de producción. Esta adaptabilidad es particularmente valiosa cuando se trata de composiciones cambiantes de materias primas o especificaciones de productos (Towler y Sinnott, 2013).

2.1.2 Clasificación en función del Tipo de Operaciones Unitarias empleadas:

Procesos Reactivos

Los procesos reactivos hacen uso de una transformación de compuestos para generar productos deseados bajo condiciones controladas. Esto implica normalmente el uso de equipos y modelos específicos, que permiten colocar las especies en contacto y conservar la reacción bajo control. Requieren comúnmente de etapas previas y/o posteriores de purificación (Levenspiel, 1999).

Procesos Catalíticos

Los procesos catalíticos implican el uso de catalizadores para acelerar reacciones químicas. Los catalizadores permiten que se produzcan reacciones en condiciones más suaves, lo que reduce los requisitos de energía y mejora la selectividad. Muchos procesos industriales, incluidas las refinerías y las plantas petroquímicas, dependen de procesos catalíticos para mejorar la eficiencia (Levenspiel, 1999).

Procesos de polimerización

Los procesos de polimerización implican la síntesis de polímeros a partir de monómeros. Este es un proceso clave en la producción de plásticos, fibras y caucho. Se utilizan varios métodos, incluida la polimerización por adición y la polimerización por condensación, dependiendo del tipo de polímero deseado (Levenspiel, 1999).

Procesos de Oxidación y Reducción

Los procesos de oxidación y reducción implican la adición o eliminación de oxígeno o electrones de productos químicos. Estos procesos son fundamentales en la producción de productos químicos como ácidos, bases y agentes oxidantes o reductores especiales (Levenspiel, 1999).

Hidrogenación y Deshidrogenación

La hidrogenación implica la adición de hidrógeno a un compuesto, mientras que la deshidrogenación implica la eliminación de hidrógeno. Estos procesos se utilizan

comúnmente en la producción de grasas y aceites, así como en la síntesis de diversas sustancias químicas (Levenspiel, 1999).

Procesos Físicos

Los procesos físicos comúnmente incluyen operaciones unitarias como la destilación y la separación, que son cruciales para aislar y purificar productos químicos. La destilación se usa comúnmente para separar componentes según sus puntos de ebullición, mientras que otras técnicas de separación, como la cromatografía y la cristalización, se emplean para lograr la pureza deseada de los productos (Levenspiel, 1999).

2.2 Operaciones unitarias

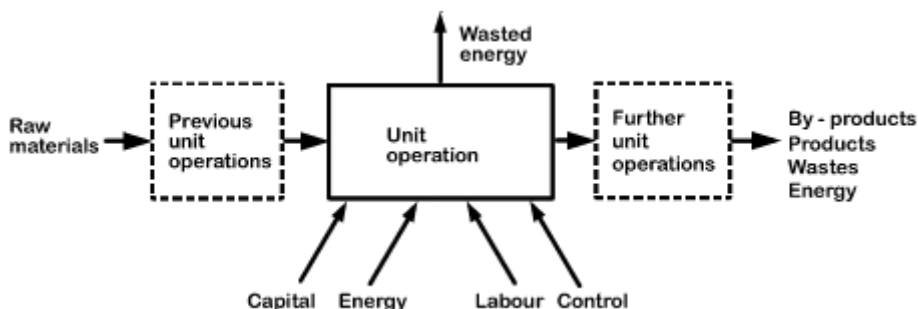
El término "operación unitaria" puede ser amplio y abarcar varias unidades o sistemas dentro de diferentes campos, incluida la ingeniería química, los procesos industriales y la fabricación. En general, se refieren a los componentes o sistemas individuales dentro de un proceso o planta más grande que realizan funciones específicas de transformación o conversión. Estas unidades están diseñadas para manejar operaciones específicas como mezcla, separación, reacción e intercambio de calor, contribuyendo a la eficiencia general y al éxito del proceso industrial, al descomponerlo en sus unidades constituyentes. De manera que estudiar cada operación, garantiza que las transformaciones se llevarán a cabo con el enfoque técnico necesario como para garantizar el resultado del proceso (Perry et al., 2008).

Dentro de los equipos que comúnmente se asocian a operaciones unitarias, se pueden mencionar:

Reactores: Los reactores son unidades operativas donde tienen lugar reacciones químicas. Se pueden clasificar en varios tipos, como reactores discontinuos, reactores de flujo continuo y reactores catalíticos, según la naturaleza del proceso químico (Perry et al., 2008).

Unidades de Separación: Las unidades de separación implican procesos como destilación, extracción y filtración para separar los componentes de una mezcla. Las columnas de destilación, las centrífugas y los sistemas de membranas son unidades de separación comunes (Perry et al., 2008).

Figura 36: Descripción gráfica de las Operaciones Unitarias en un proceso Industrial



Fuente: (Perry et al., 2008).

- Unidades de mezcla: Las unidades de mezclado están diseñadas para homogeneizar diferentes componentes de un proceso. Estas unidades desempeñan un papel crucial para garantizar una distribución uniforme y consistencia en las reacciones químicas (Perry et al., 2008).
- Intercambiadores de calor: Los intercambiadores de calor transfieren calor entre diferentes corrientes de proceso. Son vitales para mantener condiciones de temperatura específicas dentro de un proceso y optimizar la eficiencia energética (Perry et al., 2008).
- Tanques y Silos de Almacenamiento: Las unidades de almacenamiento se utilizan para la contención temporal de materias primas, productos intermedios o productos finales. Los silos, por ejemplo, se utilizan a menudo para el almacenamiento de sólidos a granel (Perry et al., 2008).

2.3 Dimensionamiento de equipos básicos de un proceso industrial

El dimensionamiento de equipos en procesos industriales implica determinar las dimensiones y especificaciones de varias unidades, como reactores, columnas de

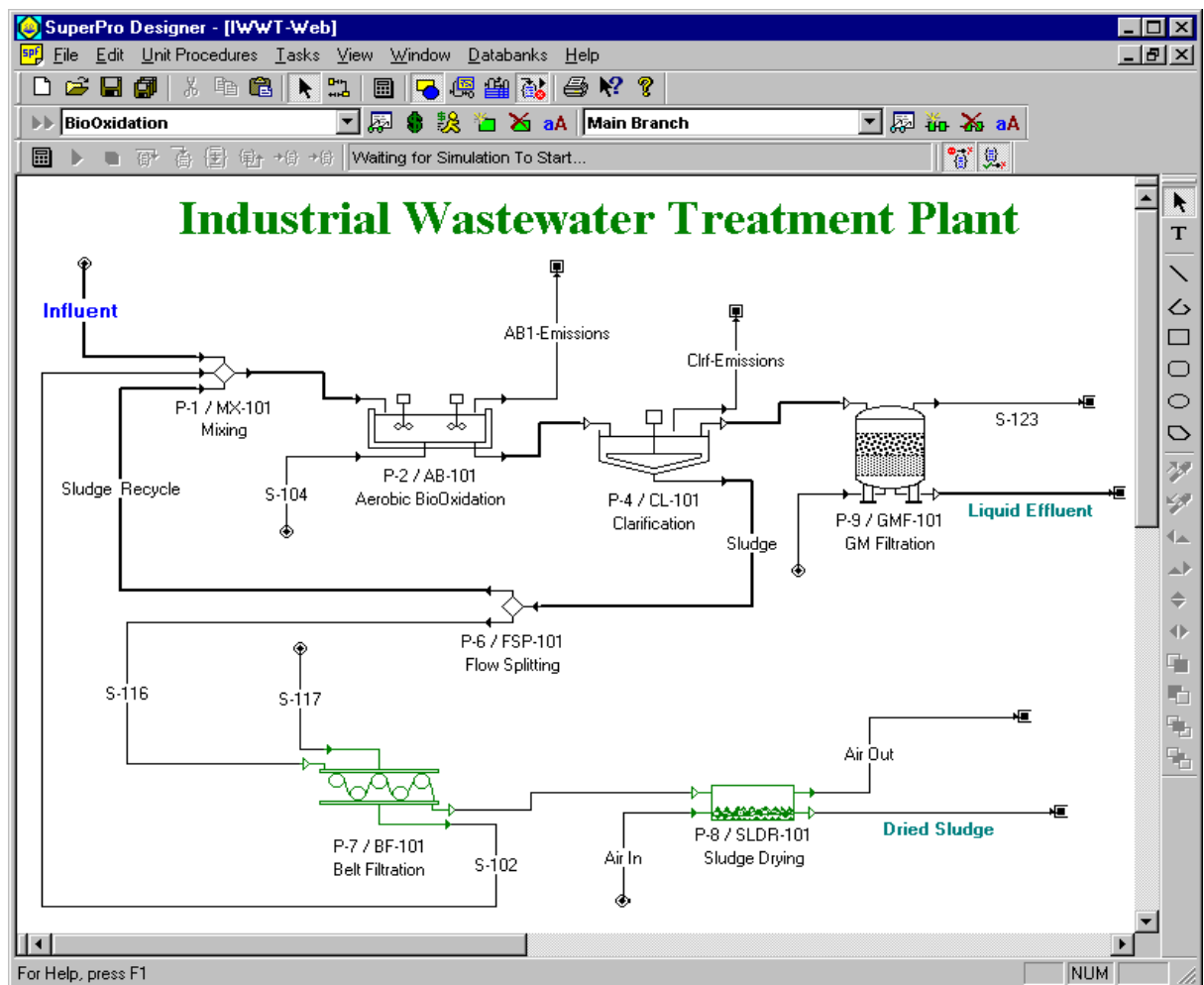
destilación, bombas e intercambiadores de calor, para cumplir con los requisitos del proceso. El tamaño adecuado es crucial para lograr un rendimiento, eficiencia y seguridad óptimos en la fabricación de productos químicos. Las consideraciones clave en el dimensionamiento del equipo son (Towler y Sinnott, 2013):

- Requisitos del proceso: Comprender los requisitos específicos del proceso, como la cinética de reacción, las tasas de transferencia de calor, los principios de funcionamiento de cada operación unitaria y la transferencia de masa, es esencial para dimensionar adecuadamente el equipo (Towler y Sinnott, 2013).
- Propiedades de los materiales: Las propiedades de los materiales involucrados, incluida la dinámica de fluidos, la termodinámica y las propiedades químicas, desempeñan un papel fundamental en el dimensionamiento de los equipos. Estas propiedades impactan la selección de materiales y el rendimiento del equipo (Towler y Sinnott, 2013).
- Seguridad y cumplimiento normativo: El cumplimiento de las normas de seguridad y los requisitos reglamentarios es una consideración fundamental en el dimensionamiento de los equipos. Esto incluye factores como códigos de diseño de recipientes a presión, regulaciones ambientales y estándares de seguridad en el lugar de trabajo (Towler y Sinnott, 2013).
- Consideraciones económicas: Los factores económicos, incluidos los costos de capital y operativos, influyen en las decisiones sobre el tamaño de los equipos. Equilibrar los requisitos de rendimiento con consideraciones económicas es crucial para el éxito general del proceso químico (Towler y Sinnott, 2013).
- Dentro de las principales técnicas empleadas para poder realizar este dimensionamiento de los equipos en un proceso químico se pueden mencionar:
- Simulación de Procesos: Implica el uso de software especializado para modelar el comportamiento de un proceso químico. Al ingresar parámetros y restricciones del proceso, el software puede ayudar a simular el rendimiento de diferentes tamaños y configuraciones de equipos (Towler y Sinnott, 2013).
- Correlaciones empíricas: Son relaciones establecidas derivadas de datos experimentales. Estas correlaciones se pueden utilizar para estimar el tamaño del

equipo en función de los parámetros del proceso, como caudales, temperaturas y presiones (Perry et al., 2008).

- **Modelado Matemático:** Implica el uso de ecuaciones matemáticas para representar el comportamiento de un proceso químico. Las ecuaciones relacionadas con los balances de masa, los balances de energía y la termodinámica se pueden utilizar para derivar ecuaciones para dimensionar diferentes equipos (Towler y Sinnott, 2013).

Figura 37: Simulación de procesos industriales empelando un software comercial



Fuente: (Intelligen, 2020)

- Reglas heurísticas: Son pautas prácticas basadas en la experiencia y las mejores prácticas de la industria. Proporcionan estimaciones rápidas para el dimensionamiento preliminar de equipos basándose en factores y relaciones conocidos (Peter y Timmerhaus, 2003).
- Leyes y modelos de escalamiento: Implican el uso de principios de similitud y escala para extrapolar a partir de datos conocidos y estimar el tamaño de los equipos a diferentes escalas. Esto es particularmente relevante cuando se pasa de procesos a escala de laboratorio a procesos a escala industrial (Peter y Timmerhaus, 2003).

2.4 Rendimiento, eficiencia y eficacia de procesos

El rendimiento, la eficiencia y la eficacia de un proceso o de una operación unitaria son mediciones básicas de control que se llevan a cabo para poder comparar etapas o procesos, además de para poder encontrar factores que causan variaciones en estos indicadores e introducir proyectos de mejora sobre dichas causas.

Rendimiento

El rendimiento en los procesos industriales se refiere a la relación entre la producción real de un proceso y la producción teórica o máxima posible en condiciones ideales. Es una métrica crucial en las industrias química y manufacturera, que representa lo que puede obtenerse de una etapa o producción (producto final) en función de lo que ingresa a la misma (materias primas) (Peter y Timmerhaus, 2003).

Factores que influyen en el rendimiento:

- Eficiencia de reacción: La eficiencia de las reacciones químicas o los procesos de conversión impacta directamente en el rendimiento. Las reacciones completas y selectivas conducen a mayores rendimientos, mientras que las reacciones secundarias o las conversiones incompletas reducen el rendimiento general.
- Condiciones de proceso: Factores como la temperatura, la presión y el tiempo de reacción juegan un papel crucial en la determinación del rendimiento. Las

condiciones óptimas del proceso son esenciales para lograr las tasas de conversión más altas posibles (Perry et al., 2008).

- **Calidad de la Materia Prima:** La calidad y pureza de las materias primas influyen en el rendimiento. Las impurezas o variaciones en la composición de la materia prima pueden afectar negativamente la eficiencia del proceso de producción (Perry et al., 2008).
- **Cinética de reacción:** Comprender la cinética de las reacciones químicas ayuda a diseñar procesos con las velocidades de reacción deseadas. Las reacciones más rápidas pueden mejorar el rendimiento general, siempre que se optimicen otros factores (Perry et al., 2008).
- **Catalizadores y potenciadores de reacciones:** El uso de catalizadores o potenciadores de la reacción puede mejorar la eficiencia de la reacción, lo que conduce a mayores rendimientos. Los catalizadores facilitan las reacciones en condiciones más suaves, reduciendo los requisitos de energía (Perry et al., 2008).
- **Control y Monitoreo de Procesos:** La implementación de medidas sólidas de control de procesos y un monitoreo continuo ayudan a identificar desviaciones de las condiciones óptimas, lo que permite realizar ajustes en tiempo real para maximizar el rendimiento (Perry et al., 2008).
- **Diseño de equipos:** El diseño de reactores, unidades de separación y otros equipos de proceso influye en el rendimiento. El diseño eficiente del equipo garantiza que las reacciones deseadas ocurran dentro de los parámetros especificados (Perry et al., 2008).

Eficiencia de Proceso

La eficiencia en los procesos industriales se refiere a la capacidad de un sistema para utilizar los recursos de manera óptima, minimizando el desperdicio y maximizando la producción de productos valiosos. A menudo se expresa como la relación entre la producción útil y el insumo total (incluyendo energía, reactivos, suministros y tiempo) (Towler y Sinnott, 2013). Dentro de las consideraciones clave de la eficiencia se encuentran:

- Utilización de recursos: Los procesos eficientes utilizan materias primas, energía y otros recursos de manera efectiva, reduciendo los desechos y minimizando el impacto ambiental (Towler y Sinnott, 2013).
- Eficiencia energética: La optimización del uso de la energía es un aspecto crítico de la eficiencia. Los procesos que requieren menos energía por unidad de producción se consideran más eficientes (Towler y Sinnott, 2013).
- Rendimiento del proceso: El alto rendimiento del proceso, en el que una mayor proporción de materias primas se convierte en productos valiosos, contribuye a la eficiencia general (Towler y Sinnott, 2013).
- Gestión del tiempo: Los procesos eficientes se caracterizan por tiempos de ciclo reducidos y tasas de producción más rápidas, lo que mejora la productividad general (Towler y Sinnott, 2013).

Eficacia de Proceso

La eficacia en los procesos industriales se refiere al grado en que un sistema logra las metas y objetivos previstos. Se trata de producir los resultados correctos y cumplir con los estándares de calidad (Towler y Sinnott, 2013).

Entre las consideraciones clave de eficacia de un proceso reportadas en la literatura, se encuentran:

- Calidad del producto: Los procesos eficaces producen constantemente productos que cumplen o superan las especificaciones de calidad, garantizando la satisfacción del cliente (Towler y Sinnott, 2013).
- El logro de metas: La efectividad de un proceso se mide por su capacidad para cumplir objetivos específicos, ya sea que estén relacionados con volúmenes de producción, especificaciones de producto u otros indicadores clave de desempeño (Towler y Sinnott, 2013).
- Adaptabilidad: Los procesos eficaces pueden adaptarse a los cambios en las demandas del mercado, la disponibilidad de materias primas y otros factores externos sin interrupciones significativas (Towler y Sinnott, 2013).

3. Rentabilidad de Procesos Químicos Industriales y Modelos de negocio asociados

La rentabilidad de los procesos químicos industriales es un aspecto multifacético que implica no sólo un diseño de ingeniería eficiente sino también modelos comerciales sólidos. Esta integración es crucial para el éxito y la sostenibilidad de las operaciones de fabricación de productos de cualquier índole (Porter y Kramer, 2011). En este capítulo se exploran los factores clave que influyen en la rentabilidad de los proyectos y los modelos de negocio asociados en los procesos químicos industriales.

En este marco, se reportan en varias fuentes una gama amplia de factores que influyen en la rentabilidad de procesos químicos industriales, entre ellos se pueden mencionar:

- Optimización de costos:

El uso eficiente de materias primas, energía y mano de obra contribuye a la optimización de costos. Minimizar el desperdicio y maximizar el rendimiento son aspectos críticos para lograr la rentabilidad (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Demanda del mercado y precios:

Alinear la producción con la demanda del mercado y fijar precios competitivos son esenciales para la rentabilidad. La flexibilidad para adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado es crucial (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Innovación tecnológica:

Adoptar nuevas tecnologías e innovaciones en procesos puede mejorar la eficiencia, reducir costos y abrir vías para el desarrollo de nuevos productos (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Cumplimiento normativo:

Cumplir con las normas medioambientales y de seguridad no es sólo un requisito legal, sino que también contribuye a la reputación y la sostenibilidad del negocio (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Gestión de la cadena de suministro:

La gestión eficiente de la cadena de suministro garantiza un flujo constante de materias primas y minimiza las interrupciones, lo que afecta directamente los costos de producción y la rentabilidad (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Gestión de riesgos:

Identificar y mitigar riesgos, como las fluctuaciones del mercado, las incertidumbres geopolíticas y la volatilidad de los precios de las materias primas, es crucial para la rentabilidad a largo plazo (Peter y Timmerhaus, 2003).

3.1 Proyección de flujos de efectivo de plantas de producción

La creación de proyecciones de flujos de efectivo para las plantas de producción es un aspecto crítico de la planificación y gestión financiera. Implica estimar las entradas y salidas futuras de efectivo para evaluar la salud financiera de la planta y tomar decisiones comerciales informadas (Brigham y Houston, 2011). Los componentes clave en la proyección de flujos de efectivo son:

- Proyección de ventas e ingresos:

Estimar las ventas futuras en función de la demanda del mercado, la estrategia de precios y la capacidad de producción es el primer elemento necesario para proyectar los flujos de efectivo de una planta o proyecto (Brigham y Houston, 2011). Usualmente esta estimación se puede hacer utilizando datos históricos, análisis de mercado y tendencias de la industria para proyectar ventas futuras.

- Costo de bienes vendidos:

Determinar los costos directos asociados con la fabricación de productos, incluidas las materias primas, la mano de obra, los gastos generales y cualquier otro costo que se integre en esta categoría es el segundo componente fundamental (Brigham y Houston, 2011).

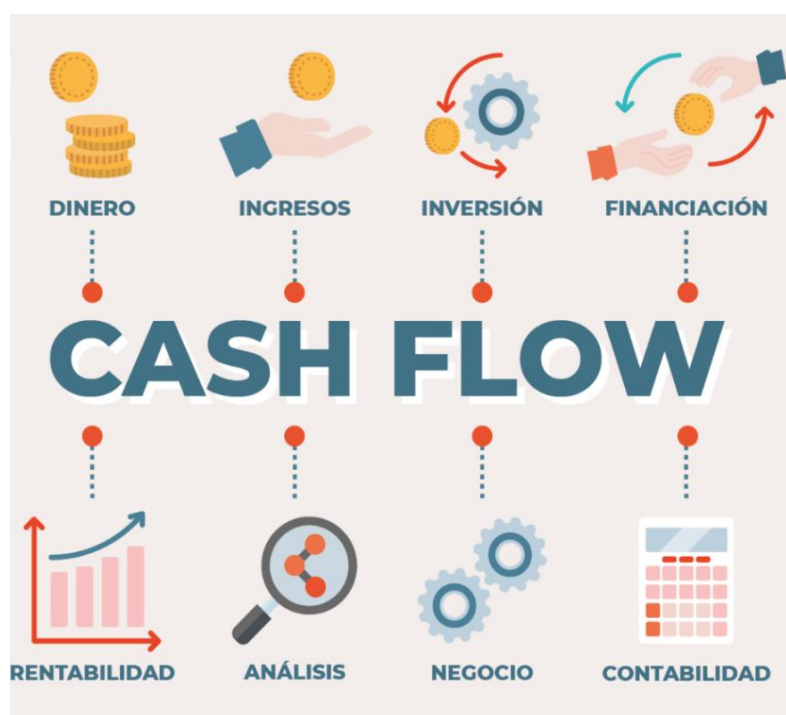
- Los gastos de administración o funcionamiento:

Incluir los costos generales como servicios públicos, mantenimiento, seguros y gastos administrativos de la planta proyectada es otro componente del flujo de efectivo (Brigham y Houston, 2011).

- Cambios en el capital de trabajo:

Deben considerarse también todos los cambios en las cuentas por cobrar, las cuentas por pagar y los niveles de inventario que afectan el flujo de efectivo (Brigham y Houston, 2011).

Figura 38: Principales elementos que componen un flujo de caja



Fuente: Elaborado con base en (Brigham y Houston, 2011).

- Inversión:

Deben tomarse en cuenta las inversiones en nuevos equipos, mejoras de instalaciones y otros proyectos de capital, así como el tiempo en el que se adquieren y la forma como se

paga por las mismas, es decir, se financian, se usa capital propio, se emplea una figura de leasing o cualquier otra forma de adquirirlas contablemente (Brigham y Houston, 2011).

- Depreciación:

La depreciación es un componente a tomar en cuenta en toda proyección de flujo de efectivo. A pesar de que no representa un egreso o ingreso netos, si influencia de manera considerable en los resultados netos de la organización, al poder brindar escudos fiscales por las inversiones realizadas (Brigham y Houston, 2011).

- Impuestos:

Debe tomarse en cuenta los impuestos necesarios de cada uno de los lugares donde se opere o comercialice, estos usualmente son un porcentaje de las rentas, por lo que la depreciación de bienes puede influenciar considerable el monto a pagar (Brigham y Houston, 2011).

- Flujos de Dinero:

Finalmente, debe tomarse en cuenta la fuente del capital que se emplea en la operación, ¿se cuenta con préstamos con pago de intereses? ¿Amortizaciones de préstamos? (Brigham y Houston, 2011)

La importancia de las proyecciones de flujo de efectivo en cualquier proyecto va ligada a una adecuada planificación Financiera, la posibilidad de gestionar la toma de decisiones, y la mejora en la gestión de riesgos (Brigham y Houston, 2011).

Figura 39: Ejemplo ilustrativo de la estructura de un flujo de efectivo de un proyecto

Example Corporation
Statement of Cash Flows
For the year ended December 31, 2022

Cash flows from operating activities	\$230,000
Net income	
<i>Adjustments to reconcile net income to net cash provided by operating activities:</i>	
Depreciation and amortization	63,000
Loss on sale of equipment	15,000
<i>Changes in current assets and liabilities:</i>	
Increase in accounts receivable	(21,000)
Decrease in prepaid expenses	3,000
Decrease in accounts payable	<u>(28,000)</u>
Net cash provided by operating activities	<u>262,000</u>
 Cash flows from investing activities	
Capital expenditures	(300,000)
Proceeds from sale of equipment	40,000
Net cash used for investing activities	<u>(260,000)</u>
 Cash flows from financing activities	
Proceeds from issuing debt	200,000
Dividends paid	<u>(110,000)</u>
Net cash provided by financing activities	<u>90,000</u>
 Net increase in cash during the year	92,000
Cash at the beginning of the year	101,000
Cash at the end of the year	<u>\$193,000</u>

Notes to the financial statements.

Fuente: (Averkamp, 2023)

3.2 Indicadores financieros de rentabilidad de procesos

Los indicadores financieros juegan un papel crucial en la evaluación de la rentabilidad de los procesos industriales. Estos indicadores brindan información sobre la salud financiera, la eficiencia y el desempeño de una operación de producción (Brealey et al., 2017). A continuación, se muestra una descripción general de los principales indicadores financieros utilizados para evaluar la rentabilidad de proyectos:

Retorno de la Inversión (ROI):

Este indicador mide la rentabilidad de una inversión en relación con su costo. Se calcula como la relación entre el beneficio neto y el coste de inversión inicial con la siguiente ecuación:

Ecuación 17: Retorno de la Inversión

$$ROI = \left(\frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Costo de Inversión}} \right) * 100$$

Donde el beneficio neto se obtiene directamente de restar a los ingresos todos los costos y gastos asociados a la operación, además de impuestos y depreciaciones, y el costo de inversión es todo el dinero que proviene del patrimonio y se ha empleado para invertir en las necesidades de la empresa. El ROI ayuda a evaluar la eficiencia de la utilización del capital y el retorno potencial de los recursos invertidos en el proceso (Brealey et al., 2017).

Valor actual neto (VAN):

El VAN representa el valor presente de las entradas de efectivo esperadas menos el valor presente de las salidas de efectivo esperadas. Ayuda a evaluar la rentabilidad de una inversión a lo largo del tiempo. Un VPN positivo indica una inversión potencialmente rentable, considerando el valor del dinero en el tiempo (Brealey et al., 2017). El cálculo de este indicador se realiza con:

Ecuación 18: Valor actual Neto

$$VAN = \sum \left(\frac{\text{Flujo de caja Neto del año } t}{(1 + WACC)^t} \right) - \text{Inversión Inicial}$$

Donde t es el año analizado del proyecto, que depende del número de años con los que se proyecta el mismo, y WACC representa el costo promedio de capital ponderado por peso, que es la tasa porcentual anual por pagar por el capital, tomando en cuenta el riesgo del proyecto que se están analizando (Brealey et al., 2017).

Tasa Interna de Retorno (TIR):

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VPN o VAN de un proyecto sea cero. Representa la tasa de rendimiento esperada del proyecto. La TIR ayuda a evaluar el atractivo de una inversión comparándola con la tasa de rendimiento requerida (Brealey et al., 2017). El cálculo de este indicador se realiza con:

Ecuación 19: Tasa Interna de Retorno

$$VAN = \sum \left(\frac{\text{Flujo de caja Neto del año } t}{(1 + TIR)^t} \right) - \text{Inversión Inicial} = 0$$

Donde t es nuevamente el año de cada flujo analizado y TIR representa la tasa en la que el valor del VAN se iguala a 0.

Margen operativo:

Representa el porcentaje de los ingresos por ventas que queda después de cubrir los costos operativos fijos y variables. Se utiliza para reflejar la eficiencia del proceso de producción en la generación de ganancias de las operaciones principales y así poderlo controlar (Brealey et al., 2017).

Ecuación 20: Margen Operativo

$$\text{Margen Operativo} = \left(\frac{\text{Flujo Operativo}}{\text{Ingresos por Ventas}} \right) * 100$$

El valor económico agregado (EVA):

Es una métrica de desempeño financiero que mide la capacidad de una empresa para generar valor para sus accionistas. Evalúa en qué medida los beneficios operativos de un proyecto o de una empresa superan el coste del capital empleado para generar esos beneficios. EVA proporciona una visión holística del desempeño financiero al considerar tanto la rentabilidad como la eficiencia del capital (Brealey et al., 2017).

El cálculo de este indicador se realiza con:

Ecuación 21: Valor Económico Agregado

$$EVA = NOPAT - (Capital\ Invertido * WACC)$$

Donde NOPAT son las ganancias netas operativa después de impuestos y WACC representa el costo promedio de capital ponderado por peso, que es la tasa porcentual anual por pagar por el capital.

3.3 Modelos económicos de escalamiento industrial

El escalamiento industrial se refiere al proceso de llevar el proceso a la capacidad de producción necesaria para satisfacer la creciente demanda o lograr economías de escala. Los modelos económicos desempeñan un papel fundamental a la hora de guiar el proceso de toma de decisiones asociado con el escalamiento de las operaciones industriales (Peter y Timmerhaus, 2003). A continuación, se ofrece una exploración de modelos económicos relevantes para el escalamiento industrial:

Economías de Escala:

Las economías de escala ocurren cuando el costo promedio por unidad de producción disminuye a medida que aumenta el volumen de producción. Esto a menudo se logra mediante la utilización eficiente de los recursos. Lograr economías de escala puede conducir a ahorros de costos, mayor competitividad y mejora de la rentabilidad (Peter y Timmerhaus, 2003).

Modelo de curva de aprendizaje:

El modelo de curva de aprendizaje sugiere que a medida que aumenta la producción acumulada, los costos unitarios disminuyen debido al aprendizaje y la experiencia adquirida por la fuerza laboral. Comprender las curvas de aprendizaje es crucial para estimar las posibles reducciones de costos asociadas con una mayor producción (Peter y Timmerhaus, 2003).

Análisis coste-beneficio:

El análisis de costo-beneficio implica comparar los costos y beneficios de un proyecto o decisión en particular para determinar su viabilidad económica. Es esencial para evaluar la viabilidad financiera de iniciativas de escala y tomar decisiones de inversión informadas (Peter y Timmerhaus, 2003).

Análisis de Procesos reales (Plantas Piloto):

El análisis de opciones reales extiende los principios de las opciones técnicas y financieras a la toma de decisiones estratégicas, permitiendo a las empresas evaluar el valor de la flexibilidad y la adaptabilidad, así como los principales indicadores financieros en un caso controlado, que se suele denominar planta piloto (Peter y Timmerhaus, 2003).

3.4 Análisis de modelos de negocio y sus características clave

Un modelo de negocio es el modelo que describe cómo una empresa crea, entrega y captura valor. Sirve como un marco que abarca los aspectos fundamentales de un negocio, proporcionando un enfoque estructurado para comprender y desarrollar una empresa sostenible y rentable (Chesbrough, 2010).

Un modelo de negocio define los aspectos centrales de cómo opera una organización, incluida su propuesta de valor, segmentos de clientes objetivo, canales de distribución, flujos de ingresos y estructura de costos (Johnson et al., 2008).

Para procesos químicos industriales existen varios tipos de modelos de negocio, que pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- Modelos centrados en el producto:

Este modelo, centrado en la producción y venta de productos químicos, se basa en economías de escala y una producción eficiente para impulsar la rentabilidad (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Modelos orientados a servicios:

Proporcionar servicios especializados, como fabricación por encargo, optimización de procesos o síntesis personalizada, puede diversificar los flujos de ingresos y mejorar la rentabilidad (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Modelos colaborativos:

Colaborar con socios en investigación, desarrollo o producción puede reducir costos, compartir riesgos y crear sinergias que contribuyan a la rentabilidad (Peter y Timmerhaus, 2003).

- Modelos de Economía Circular:

Adoptar los principios de la economía circular, como el reciclaje y la valorización de residuos, puede crear flujos de ingresos adicionales y al mismo tiempo minimizar el impacto ambiental (Peter y Timmerhaus, 2003).

4. Propiedades de materiales

Los materiales son los componentes básicos de todo lo que emplea la humanidad, desde la ropa hasta los dispositivos de uso diario. Las propiedades de los materiales dictan su comportamiento y rendimiento en diversas aplicaciones. Comprender estas propiedades es crucial para que ingenieros, científicos y diseñadores tomen decisiones informadas en la selección de materiales, procesos de fabricación y el desarrollo de nuevas tecnologías (Callister & Rethwisch, 2018).

4.1 Composición elemental y molecular

Comprender la composición elemental y molecular de los materiales es esencial para desentrañar sus propiedades y comportamientos a nivel atómico (Tro, 2017). Estas propiedades son relevantes en cualquier tipo de reacción, puesto que los elementos químicos serán los que participen y generen los productos de interés. Por esta razón, muchos autores sugieren partir de la composición en cualquier estudio de reacción.

4.1.1 Composición elemental:

Se refiere a los elementos químicos que integran una sustancia, y a través de su estructura atómica define la composición de un material. Dicha estructura está dictada por los tipos de elementos, número de protones, neutrones y electrones dispuestos en los átomos en un material (Tro, 2017).

4.1.2 Composición molecular:

Se refiere a la forma como los átomos de la composición elemental están unidos e integrados para formar una molécula. Usualmente se caracteriza con una fórmula molecular, que proporciona información sobre los tipos y números de átomos en una molécula; y una fórmula empírica, que indica la proporción de números enteros más simple de diferentes átomos en un compuesto dado (Tro, 2017).

4.1.3 Estructuras moleculares:

Para definir desde el punto de vista tridimensional la forma y características de las moléculas, las mismas se representan a través de las denominadas estructuras, dentro de las cuales, las estructuras de Lewis son las que presentan la disposición de los átomos y los electrones de valencia en una molécula (Tro, 2017).

4.1.4 Métodos de análisis elemental y molecular:

- Fluorescencia de rayos X (XRF):

XRF es una técnica no destructiva que analiza la composición elemental de los materiales midiendo los rayos X característicos emitidos cuando una muestra es irradiada con rayos X. Es ampliamente utilizado para análisis elementales cualitativos y cuantitativos (Skoog et al., 2017).

- Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS):

ICP-OES e ICP-MS utilizan plasma acoplado inductivamente para ionizar y excitar átomos, lo que permite realizar análisis elementales altamente sensibles. Estas técnicas son particularmente efectivas para la detección de oligoelementos (Skoog et al., 2017).

- Espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS):

La EDS a menudo se combina con la microscopía electrónica de barrido (SEM) para proporcionar un análisis elemental a microescala. Detecta los rayos X emitidos por la muestra al exponerse a un haz de electrones (Skoog et al., 2017).

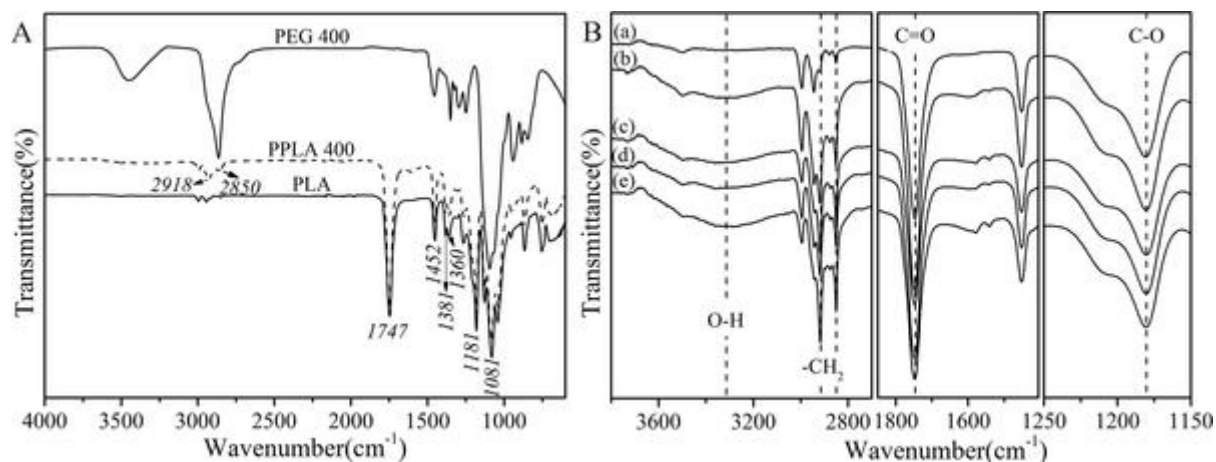
- Espectroscopia infrarroja (IR):

La espectroscopia IR analiza la absorción de radiación infrarroja por enlaces moleculares, proporcionando información sobre grupos funcionales en compuestos orgánicos e inorgánicos. Cada compuesto químico tiene un espectro característico que depende de su estructura química y enlaces (Skoog et al., 2017).

- Resonancia Magnética Nuclear (RMN):

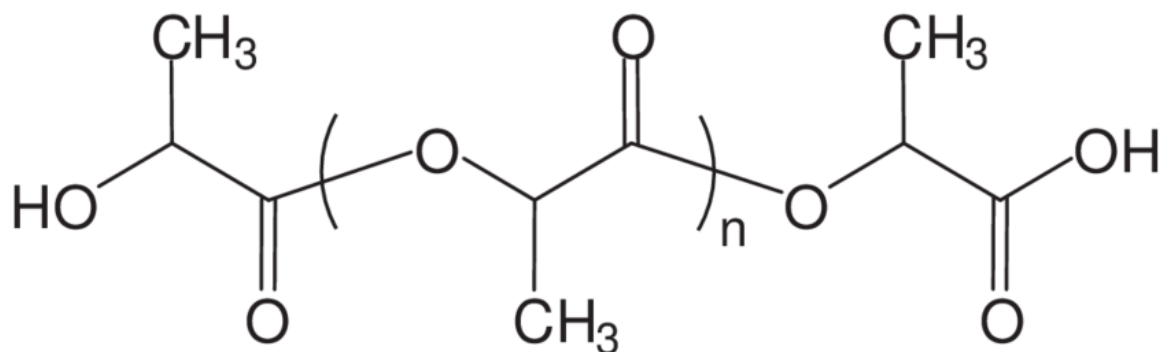
La espectroscopia de RMN se basa en la interacción de los núcleos atómicos con un campo magnético. Se utiliza para determinar la estructura y composición de compuestos orgánicos, dilucidando la conectividad de los átomos (Skoog et al., 2017).

Figura 40: Espectro Infrarrojo característico del poliácido láctico



Fuente: (Skoog et al., 2017).

Figura 41: Estructura química del poliácido láctico



Fuente: (Skoog et al., 2017).

- Espectrometría de masas (MS):

MS identifica y cuantifica moléculas en función de su relación masa-carga. Es una técnica versátil para analizar compuestos orgánicos y biológicos complejos (Skoog et al., 2017).

Imágenes elementales y moleculares:

- Microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDS):

SEM-EDS combina imágenes de alta resolución con análisis elemental, lo que permite la visualización y caracterización de materiales a micro y nanoescala (Skoog et al., 2017).

- Microscopía de fuerza atómica (AFM):

AFM proporciona información topográfica y de propiedades materiales a nanoescala. Se puede combinar con técnicas como la espectroscopia infrarroja y Raman para obtener imágenes correlacionadas y análisis químicos (Skoog et al., 2017).

Técnicas cromatográficas:

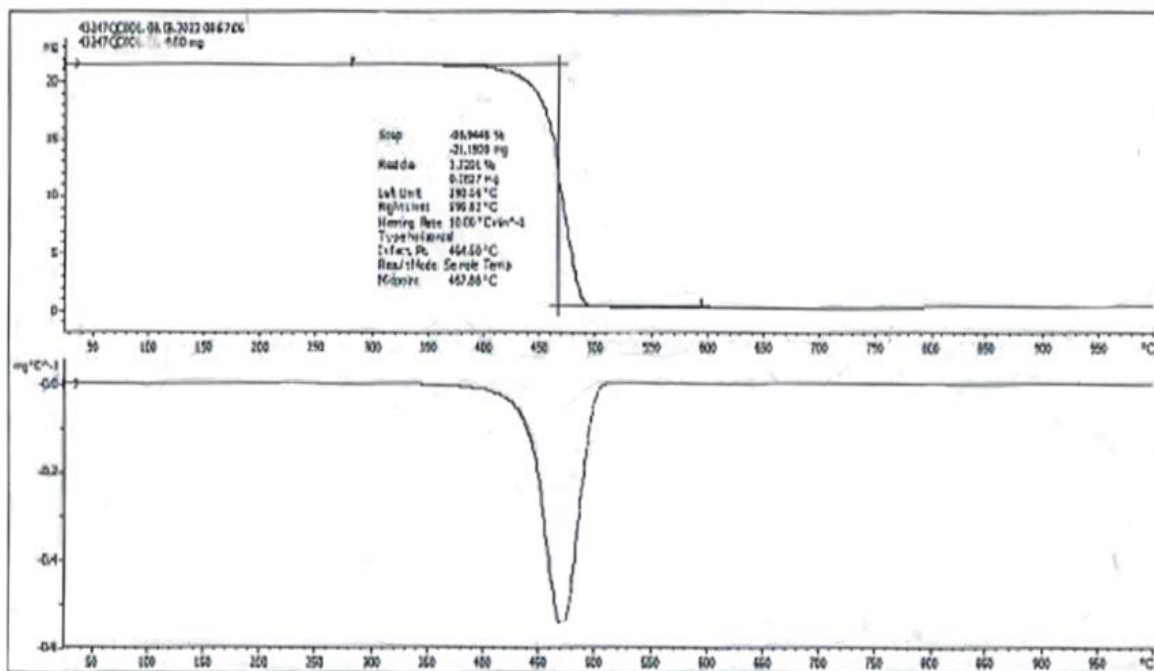
- Cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS):

GC-MS separa y analiza compuestos volátiles. Se utiliza ampliamente en análisis ambientales, farmacéuticos y forenses, aunque también para detectar varios tipos de moléculas líquidas que se vaporizan con agentes acarreadores, dentro de estos ejemplos, los productos pirólisis pueden analizarse con esta técnica (Skoog et al., 2017).

- Cromatografía líquida-Espectrometría de masas (LC-MS):

LC-MS es eficaz para la separación y análisis de una amplia gama de compuestos, incluidas sustancias polares y no polares, empleando columnas empacadas, donde diferentes compuestos tienen diferente tiempo de paso por la misma. La espectrometría de masas permite la detección de la salida de los compuestos (Skoog et al., 2017).

Figura 42: Análisis termogravimétrico característico del Polietileno de Alta Densidad (HDPE)



Fuente: Elaboración propia con el apoyo de CETEC.

Análisis térmico:

- Calorimetría diferencial de barrido (DSC):

DSC mide el flujo de calor en respuesta a los cambios de temperatura, proporcionando información sobre las transiciones de fase y la estabilidad térmica (Skoog et al., 2017).

- Análisis Termogravimétrico (TGA):

TGA mide los cambios de peso en función de la temperatura, lo que ayuda a identificar cambios de composición y descomposición térmica. Es una técnica muy empleada para determinar las temperaturas necesarias del proceso de pirólisis de diferentes materiales (Skoog et al., 2017).

4.2 Propiedades mecánicas de materiales

Las propiedades mecánicas de los materiales son características fundamentales que rigen su comportamiento bajo fuerzas aplicadas. Los ingenieros y científicos de materiales confían en estas propiedades para diseñar y seleccionar materiales para aplicaciones específicas, garantizando la confiabilidad y el rendimiento de estructuras y componentes (Callister & Rethwisch, 2018). Las principales propiedades mecánicas usadas técnicamente para los materiales son:

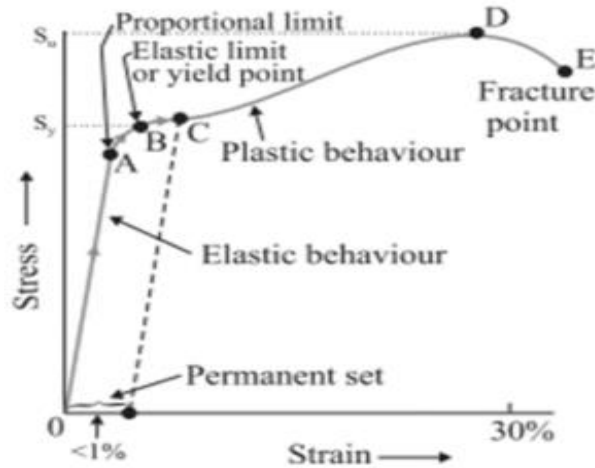
4.2.1 Estrés o Resistencia a la tracción (σ_t)

La resistencia a la tracción es una propiedad fundamental que caracteriza la resistencia de un material a una fuerza de estiramiento sin romperse. Se determina mediante un ensayo de tracción y la tensión (σ_t) se calcula como la fuerza aplicada (F) dividida por el área de la sección transversal original (A_0) (Callister & Rethwisch, 2018).

4.2.2 Módulo de Young (E):

El módulo de Young, o módulo de elasticidad, cuantifica la rigidez de un material. Se define como la relación entre la tensión (σ) y la deformación (ϵ) en la región elástica de la curva tensión-deformación (Callister & Rethwisch, 2018).

Figura 43: Curva de Estrés y deformación característica del comportamiento de materiales sólidos



Fuente: (Callister & Rethwisch, 2018).

4.2.3 Dureza (U_t) y Resistencia al Impacto:

La dureza representa la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. A menudo se determina utilizando el área bajo la curva tensión-deformación en la región plástica. La resistencia al impacto se evalúa mediante pruebas de impacto y se calcula la energía de impacto (U_t) (Callister & Rethwisch, 2018).

4.2.4 Dureza (H) y Resistencia al Desgaste:

La dureza es la resistencia de un material a las indentaciones o rayones, y a menudo se mide mediante pruebas como Rockwell o Brinell. La resistencia al desgaste es crucial en materiales sujetos a desgaste por deslizamiento o abrasión (Callister & Rethwisch, 2018).

4.2.5 Fatiga del material y tenacidad a la fractura:

La fatiga del material se caracteriza por cargas cíclicas que conducen a fallas con el tiempo. La vida a fatiga (N_f) a menudo se predice utilizando curvas S-N, donde la

tensión (σ) está relacionada con el número de ciclos hasta la falla (N) (Callister & Rethwisch, 2018).

4.3 Propiedades Fisicoquímicas de materiales

Comprender las propiedades fisicoquímicas de los materiales es fundamental para predecir su comportamiento en diversas condiciones. A continuación, se presenta una breve descripción de las principales propiedades Fisicoquímicas de materiales:

4.3.1 Densidad (ρ):

La densidad se define como el volumen que ocupa una masa determinada, en el caso de los sólidos se puede analizar la densidad de una masa individual o la densidad de una masa de sólidos apilados y dispersos. Esto último se denomina densidad de bulto, el cual toma en cuenta una cantidad de sólidos apilados. Se distinguen tres tipos de densidad de bulto, la densidad de bulto aireada que es la masa que ocupa un volumen de sólidos apilados tomando en cuenta la porosidad de los sólidos apilados; la densidad de bulto compacta donde se reduce la porosidad de los sólidos y se ve el efecto en el volumen, que por lo general se compactan los sólidos, por lo que si se mide la densidad de bulto en recipientes cilíndricos, este tendrá un valor mayor a la densidad de bulto aireada; finalmente, la densidad de bulto de trabajo que correlaciona ambas densidades de bulto y se relacionan por medio de un factor de compresibilidad (Perry et al., 2008).

En el caso de los líquidos, la densidad al igual que la viscosidad, son de las propiedades físicas más importantes a medir para las propiedades de transporte en el estudio de flujo de fluidos. Estas influyen directamente en múltiples propiedades del fluido esenciales para el dimensionamiento de equipos de transporte de sólidos. La densidad de igual manera se define como la masa del fluido líquido por una unidad de volumen determinada y a diferencia de los sólidos, este valor varía esencialmente con la temperatura y la presión, aunque el efecto de la presión no es tan representativo en fluidos incompresibles (Perry et al., 2008).

4.3.2 Calor específico (C):

El calor específico mide la cantidad de energía térmica necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado Celsius. Dependiendo del tipo de material y la técnica de medición se tienen comúnmente los calores específicos a presión constante y a volumen constante, denotados Cp y Cv respectivamente (Callister & Rethwisch, 2018).

4.3.3 Conductividad térmica (k):

La conductividad térmica cuantifica la capacidad de un material para conducir calor, de manera que, representa una cantidad básica para caracterizar este tipo de mecanismo de transferencia de calor a través de un material (Callister & Rethwisch, 2018). Se ajusta a la siguiente ecuación:

Ecuación 22: Calor conducido a través de un material

$$Q = -k * A * \frac{\Delta T}{d}$$

Donde Q es el calor conducido, k es la conductividad térmica del material, A es el área de transferencia de calor, dT es la diferencia de temperaturas causante de la transferencia y d es el espesor del material.

4.3.4 Índice de refracción (n):

El índice de refracción indica cuánto puede desviar un material la luz, al ser irradiado con un tipo específico de luz. Se emplea para caracterizar sustancias puras o combinaciones de materiales, desde que el índice se establece como una combinación proporcional a cada material presente en una mezcla (Callister & Rethwisch, 2018).

4.3.5 Tensión superficial (γ):

La tensión superficial es la fuerza por unidad de longitud que actúa sobre la superficie de un líquido. Se emplea para caracterizar los materiales con respecto a la forma de las

gotas que se forman en su superficie o para determinar la compatibilidad entre un sólido y un fluido (Callister & Rethwisch, 2018).

4.3.6 Viscosidad (η):

La viscosidad caracteriza la resistencia de un material a fluir. Es una propiedad base de la mecánica de fluidos, que permite calcular la forma como los patrones de flujo se formarán y las implicaciones que esto tiene en la transferencia de momentum, calor o masa en un material determinado. Es parte fundamental de varias ecuaciones de estado y adimensionales (Callister & Rethwisch, 2018).

4.3.7 Solubilidad (S):

La solubilidad se refiere a la cantidad máxima de soluto que puede disolverse en un solvente a unas condiciones determinadas de temperatura y presión. Esta propiedad es una medida de la compatibilidad de un fluido a disolver un soluto (Callister & Rethwisch, 2018).

4.3.8 Granulometría

La granulometría es el estudio de la distribución del tamaño de las partículas en materiales, un aspecto crucial que influye en diversas propiedades y comportamientos. Dentro de las propiedades granulométricas se suelen determinar las siguientes:

- Distribución de tamaño de partícula:

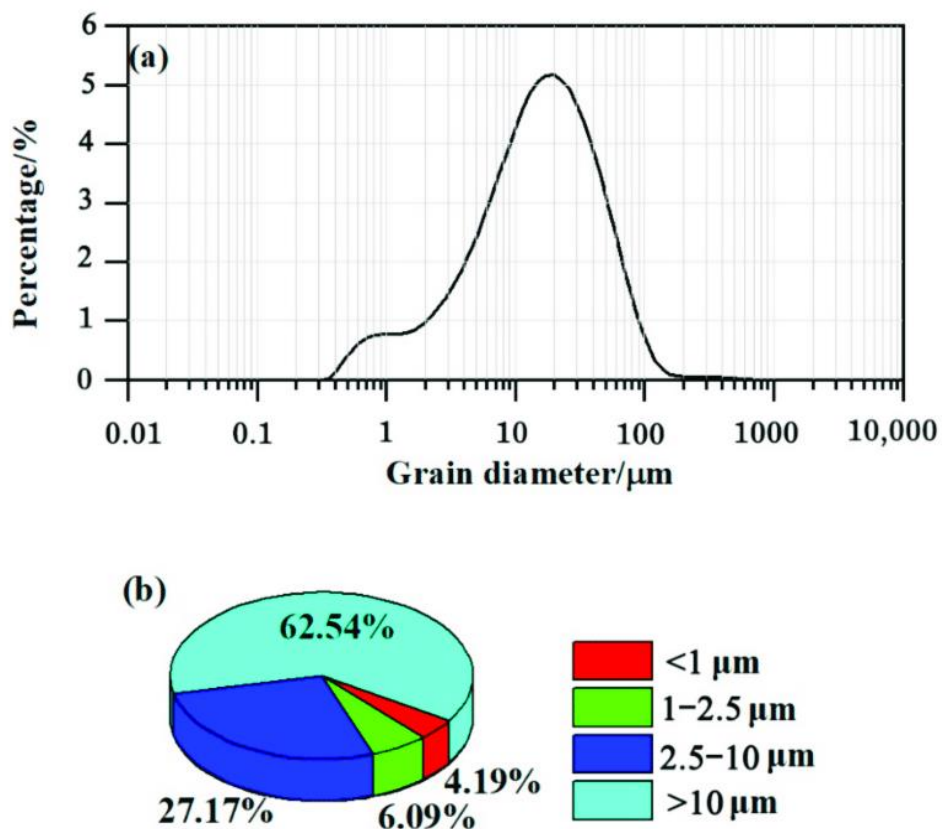
La distribución del tamaño de las partículas se refiere al rango de tamaños presentes en un conjunto de partículas dentro de un material, que influyen en sus propiedades físicas y químicas. Muchas de estas propiedades se comportan de forma “normal” de acuerdo con una campana de Gauss (Callister & Rethwisch, 2018).

- Función de distribución acumulativa (CDF):

La función de distribución acumulativa representa la fracción acumulada o el porcentaje de partículas más pequeñas que un tamaño determinado que se tienen en un material.

Sirve para determinar los rangos de tamaño que pueden verse en un material y puede calcularse a partir de la distribución de tamaño de partícula (Callister & Rethwisch, 2018).

Figura 44: Curva de distribución de tamaño de partícula y su análisis porcentual respectivo



Fuente: (Callister & Rethwisch, 2018).

- Análisis granulométrico por tamizaje:

El análisis de tamiz implica separar partículas según su tamaño utilizando una serie de tamices con aberturas progresivamente más pequeñas. Este tipo de análisis es la principal técnica empleada para determinar la distribución de tamaños de partícula o la función de distribución acumulativa (Callister & Rethwisch, 2018).

4.3.9 Porcentaje de humedad:

La humedad es la cantidad de agua retenida o absorbida sobre un cuerpo o material sólido, este se puede expresar en términos de un porcentaje al relacionar la masa de agua en el cuerpo o material sólido con la masa de sólido total húmedo. El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se puede describir en función del porcentaje en peso de humedad. En análisis de transferencia de masa se puede analizar la humedad en base húmeda o en base seca, este segundo es relacionando la masa de humedad con la masa de sólido seco (Perry et al., 2008).

En un material sólido hay tres tipos de humedades que se encuentran físicamente en el mismo. La humedad ligada, que se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura; la humedad no ligada que se refiere a la humedad contenida dentro de una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual que la del líquido puro a la misma temperatura; y finalmente la humedad libre, que consiste en la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio. En los procesos de secado únicamente puede evaporarse humedad libre, el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en la fase gaseosa (durante el secado) (Treybal, 1988).

4.3.10 Poder calorífico:

Se define el poder calorífico como la cantidad de energía en forma de calor proporcionada por una unidad de masa de una sustancia o unidad de volumen de este. Esto aplica con combustibles cuando se oxida de forma completa, por lo que es una de las propiedades más importantes a conocer de los combustibles. El poder calorífico de un combustible se puede dividir en dos tipos, el poder calorífico superior y el poder calorífico inferior (Fernández J., 2008).

El poder calorífico superior se define cuando se supone que todos los elementos de una combustión son medidos a 0°C, es decir, la mezcla de combustible y aire, y los productos obtenidos después son llevados de igual manera a 0°C después de la

combustión. Por lo que el vapor de agua presente en el combustible se condensará y se determina de esta manera la energía proporcionada por el combustible y se puede determinar la energía por unidad de masa de vapor condensado. Por otra parte, el poder calorífico inferior, que considera el vapor de agua contenido en los gases de la combustión no llega a condensar, lo que implica que no hay aporte adicional de calor por condensación del vapor de agua, por lo que únicamente se tiene el calor de la oxidación del combustible (Fernández J., 2008).

4.4 Principales Técnicas analíticas empleadas en la determinación de propiedades de Materiales

A pesar de que las técnicas analíticas que se emplean en la determinación de materiales pueden ser muy diversas y que, en dependencia de la aplicación y el tipo de material, pueden cambiar significativa, en este apartado, se proporciona un compendio descriptivo de las principales técnicas analíticas enfocadas en análisis de materiales propios de reacciones de pirólisis.

4.4.1 Cromatografía de gases

La cromatografía es una técnica de separación para cuantificar la separación y cuantificación de una mezcla con varios analitos. Este método separa los analitos que son acarreados por una fase móvil a través de una columna que contiene una fase estacionaria. En la cromatografía de gases, la fase móvil es un gas inerte, como el nitrógeno o el helio. De tal manera, los analitos pasan a través de la columna y por su afinidad se quedan atrapados en la columna y después eluyen a diferentes tiempos. Es altamente utilizado para sustancias con alta volatilidad, en especial compuestos orgánicos (Skoog et al., 2017).

El cromatógrafo de gases está compuesto por: una fuente de gas, un sistema de inyección, un horno con la columna cromatográfica, un sistema de detección y por último un sistema de registro. El detector es lo que cuantifica los analitos dentro de las muestras, por lo cual se puede optar por diferentes opciones. Una de las más utilizadas es la detección de ionización de llama, la cual consiste en la combustión del gas

proveniente de la columna mezclado con hidrógeno para medir la ionización de llama con un colector de iones polarizado. Otro método de detección es el de masas, donde se utiliza normalmente un cuadrupolo para separar los iones por su relación masa-carga (Skoog et al., 2017). En combustibles, esta técnica es la principal empleada para la determinación de composición molecular del material, identificando las especies químicas presentes en un combustible.

4.4.2 Análisis elemental

El análisis elemental se realiza para determinar la cantidad de un elemento en particular dentro de algún material o molécula. El análisis elemental se puede dividir en dos, un análisis cuantitativo y un análisis cualitativo. El análisis cualitativo donde se determina qué elementos están presentes o la presencia de un elemento particular y el análisis cuantitativo que permite cuantificar y determinar cuánto de un material está presente. El análisis elemental se puede realizar tanto a sólidos como líquidos y gases, algunos de los métodos utilizados para el análisis elemental caen en las categorías de métodos gravimétricos, métodos volumétricos y métodos colorimétricos (Raja & Barron, 2021).

En los métodos gravimétricos la muestra es separada de una solución por medio de un precipitado al cual se le mide su masa; en los métodos volumétricos normalmente se involucra la determinación del volumen de una sustancia que se combina con otra sustancia en proporciones conocidas; finalmente, los métodos colorimétricos o espectroscópicos, donde los análisis requieren la adición de un agente orgánico complejo (Raja & Barron, 2021).

4.4.3 Espectroscopia infrarroja

La región infrarroja del espectro electromagnético se divide en tres partes las cuales son el infrarrojo cercano (de 0.8 a 2.5 μm), el infrarrojo medio (de 2.5 a 50 μm) y el infrarrojo lejano (de 50 a 1000 μm). Aunque la región más importante para el análisis es entre 2.5 y 25 μm . Las radiaciones infrarrojas pueden estimular moléculas haciendo que estas vibren y a partir de estas vibraciones se puede observar en los espectros infrarrojos, el cual es una gráfica de la energía absorbida por una molécula en función de la

frecuencia o de la longitud de onda de la luz. Lo que se observa en estos espectros son los grupos funcionales orgánicos (Skoog et al., 2017).

En la espectroscopía infrarroja se utilizan dos tipos de espectrómetros, los de tipo dispersivo y los de transformada de Fourier. En los de tipo dispersivo, las fuentes de IR son sólidos calentados, y los detectores responden a calor, en lugar de responder a los fotones. Los componentes ópticos de estos instrumentos están contruidos de sales pulidas, como el cloruro de sodio o el bromuro de potasio. En los de transformada de Fourier, se detectan longitudes de onda IR en todo momento, poseen una potencia recolectora de luz más grande que los instrumentos dispersivos y una mejor precisión. Los cálculos de la transformada de Fourier se realizan por computadora con un software apropiado para la visualización de los espectros y de esta manera detectar los grupos funcionales del analito (Skoog et al., 2017).

4.4.4 Determinación de poder calorífico con Bomba calorimétrica

La bomba calorimétrica es un instrumento que permite determinar el poder calorífico de combustible sólido y líquido de manera constante. En ocasiones es necesario corregir el valor de poder calorífico mediante la determinación de la denominada energía de extraños, en la que intervienen los medios de ignición, las sustancias auxiliares a la combustión y la formación y disolución de ácidos nítrico y sulfúrico, que pueden ser cuantificados mediante valoración o conociendo el análisis elemental de la muestra (Skoog et al., 2017). El uso de este tipo de equipos permite medir analíticamente los poderes caloríficos superior e inferior de un determinado material, a través de una reacción de combustión controlada, que se mide bajo condiciones estándar.

4.4.5 Análisis granulométrico

Luego de realizar un proceso de reducción de tamaño, se busca determinar no solo la eficiencia de la molienda, sino que también la cantidad de material sólido producido para un tamaño de partícula determinado. Para ello se realizan análisis granulométricos utilizando tamices para lograr una distribución del material molido a través de estos. Las mallas utilizadas siguen estándares de diseño de los cuales los más utilizados son las

mallas Tyler y las mallas mesh, estas últimas el número indica el número de hilos existentes en una pulgada lineal, por lo que, entre mayor sea el número de mesh, más pequeños serán los agujeros de la malla (Perry et al., 2008).

Para los análisis granulométricos se utilizan equipos del tipo Ro-tap machine, que consisten en una serie de mallas apiladas, donde la malla superior posee el menor número de malla (ya sea Tyler o Mesh) y conforme se baja en las mallas, este número aumenta considerablemente. El material se coloca en el equipo y se permite una distribución a lo largo de cada malla, con lo que a su vez se determina el porcentaje de material sólido en cada malla y cuanto atravesó cada una de las mallas. Estos análisis permiten determinar si el proceso de molienda cumple los parámetros de calidad que se puedan necesitar a un cierto tamaño o rango de tamaño de partícula (Perry et al., 2008).

4.4.6 Pruebas de Estrés, Dureza e Impacto

Son pruebas mecánicas que se realizan en equipos específicos para la determinación de una propiedad. Las pruebas de estrés implican aplicar una fuerza uniaxial a una muestra y medir su respuesta al estrés y la deformación. Las pruebas de dureza evalúan la resistencia de un material a la deformación, generalmente presionando un penetrador en la superficie. Las pruebas de impacto miden la capacidad de un material para absorber energía bajo condiciones de carga repentinas, a menudo utilizando un péndulo o una caída de peso (Perry et al., 2008).

Pruebas reológicas

Las pruebas reológicas se centran en el flujo y el comportamiento de deformación de un material bajo tensión o tensión aplicada. Se emplean para estas determinaciones reómetros o viscosímetros, capaces de detectar el tiempo necesario para que una muestra fluya y así poder calcular tanto viscosidades dinámicas como cinemáticas, u otras propiedades reológicas (Perry et al., 2008).

4.5 Clasificación de materiales en función de sus propiedades

Los materiales exhiben diversas propiedades que dictan su comportamiento en diferentes aplicaciones. Clasificar materiales en función de estas propiedades es esencial para seleccionar el material adecuado para un propósito específico. A continuación, se ofrece una descripción general de la clasificación de materiales según sus propiedades clave:

4.5.1. Propiedades mecánicas:

Los materiales a menudo se clasifican según sus propiedades mecánicas, incluida la resistencia, la dureza, la elasticidad y la plasticidad. Dentro de esta clasificación se encuentran los materiales elásticos, quebradizos, maleables o dúctiles, cuyas propiedades dinámicas les confieren un comportamiento específico frente al estrés o deformación (Callister & Rethwisch, 2018).

4.5.2. Propiedades térmicas:

Los materiales se pueden clasificar según sus propiedades térmicas, como conductividad, capacidad calorífica y expansión térmica. En este marco se establecen clasificaciones como la de materiales elastoméricos, termosets, termoplásticos, metales, entre otros (Callister & Rethwisch, 2018).

4.5.3. Propiedades eléctricas:

Los materiales se clasifican según su conductividad eléctrica, resistividad y otras propiedades eléctricas, teniendo principalmente materiales conductores, no conductores y semiconductores (Callister & Rethwisch, 2018).

4.5.4. Propiedades ópticas:

Los materiales se pueden clasificar según sus propiedades ópticas, incluida la transparencia, la refracción y la absorción de luz (Callister & Rethwisch, 2018).

4.5.5. Propiedades magnéticas:

Los materiales se clasifican según sus propiedades magnéticas, como la susceptibilidad y la coercitividad. En este caso, la clasificación general son los magnetizables y los no magnetizables (Callister & Rethwisch, 2018).

4.5.6. *Propiedades reológicas:*

Los materiales se pueden clasificar según sus propiedades reológicas, indicando cómo se deforman y fluyen bajo tensión (Callister & Rethwisch, 2018). Existe una gama amplia de clasificaciones, pero principalmente se categorizan en fluidos newtonianos y no newtonianos, que caracterizan la manera como un fluido se desplaza en función de la presión.

5. Combustibles y sus propiedades

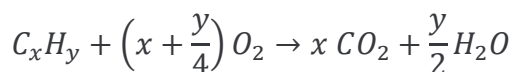
Los combustibles son fuentes esenciales de energía y proporcionan energía para diversas aplicaciones en las industrias, el transporte y la vida diaria. Vienen en varias formas, cada una con sus propiedades y aplicaciones únicas (Speight, 2014).

5.1 *Reacción de combustión y su utilidad*

La combustión es una reacción química rápida entre un combustible y un agente oxidante, normalmente oxígeno, que da como resultado la liberación de energía en forma de calor y luz. La reacción suele ser exotérmica y se caracteriza por la producción de dióxido de carbono y agua como productos comunes (Smith et al., 2005).

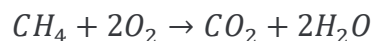
La forma genérica de una reacción de combustión de hidrocarburos (C_xH_y) es:

Ecuación 23: Reacción de Combustión

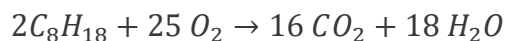


Donde C, H y O representan los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno respectivamente, x y y son coeficientes estequiométricos.

Algunos ejemplos de estas reacciones pueden ser, para el Gas Natural:



Para el Octano:



En general se pueden clasificar a las reacciones de combustión en: 1) Combustión completa: Ocurre cuando hay un aporte suficiente de oxígeno, dando lugar a la formación de dióxido de carbono y agua. 2) Combustión incompleta: Ocurre en condiciones de oxígeno limitado, lo que resulta en la producción de monóxido de carbono (CO) y potencialmente hollín (partículas de carbono) (Smith et al., 2005).

De manera que los factores que influyen en la combustión son: La Estequiometría, de la que depende equilibrar los reactivos y productos para asegurar una combustión completa; la Temperatura, que asegura la energía necesaria para la oxidación; y la mezcla de combustible y aire, cuya proporción es crucial para una combustión eficiente (Smith et al., 2005).

5.2 Tipos de combustibles

Existen varias clasificaciones de combustibles, pero dejando de lado los Biocombustibles, que se describen posteriormente, los principales tipos de los mismos son:

5.2.1 Combustibles fósiles:

Son todos aquellos compuestos que se extraen de organismos fosilizados en el subsuelo terrestre. Se encuentran en varias formas, por lo que su aplicación depende comúnmente de un proceso extractivo y su posterior purificación (Speight, 2014). Dentro de los más importantes se establecen:

- **Carbón:** Es una roca sedimentaria combustible de color negro o negro parduzco compuesta principalmente de carbono, junto con varios otros elementos. Ha sido una fuente tradicional de energía para la generación de energía (Speight, 2014).
- **Petróleo:** Es una mezcla compleja de hidrocarburos que se encuentran en formaciones geológicas. Sirve como una fuente crucial de combustible para el transporte y diversas industrias, luego de pasar por procesos de transformación físicos y químicos (Speight, 2014).
- **Gas Natural:** Se compone principalmente de metano y se encuentra en yacimientos subterráneos. Es un combustible de combustión limpia ampliamente utilizado para calefacción, generación de electricidad y como combustible para vehículos (Speight, 2014).

5.2.2. Combustibles nucleares:

Se refieren a todos aquellos elementos radiactivos que inducen la generación de energía nuclear. El más utilizado es el Uranio, que es un elemento radiactivo utilizado como combustible en reactores nucleares (Speight, 2014).

5.2.3. Combustibles sintéticos:

Los combustibles sintéticos son hidrocarburos producidos artificialmente, a menudo derivados de biomasa o mediante procesos como la síntesis de Fischer-Tropsch (Speight, 2014).

5.3 Propiedades de los combustibles

Existen varios estándares que se emplean para el manejo de combustibles y norman sus propiedades, entre ellos los más usados en la región son los ASTM y los ISO, por lo que en función de lo establecido en ASTM (2019a, 2019b, 2019c, 2019d y 2020), se establecen como principales propiedades para la comercialización de combustibles, las siguientes:

- Poder Calorífico: El poder calorífico o contenido energético, es una propiedad fundamental que indica la cantidad de calor liberado durante la combustión. Es vital para conocer cuánto se podrá extraer de energía de un combustible por unidad de masa.
- Densidad: La densidad del combustible es un parámetro clave que afecta la eficiencia del almacenamiento, el transporte y la combustión.
- Viscosidad: Influye en las características de flujo de los combustibles y la eficiencia de la combustión.
- Punto de inflamación y temperatura de ignición: Indican la inflamabilidad y la facilidad de combustión de un combustible.
- Contenido sulfuroso: Es un factor crítico que influye en las emisiones y el impacto ambiental, ya que proporciona información sobre compuestos contaminantes que pueden liberarse durante la reacción.

5.4 Biocombustibles

Al realizar ciertos procesos de transformación sobre materiales origen biológico o que preservan el ambiente se obtienen biocombustibles, los cuales se utilizan para fines energéticos dependiendo de su estado físico, se tienen biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Los biocombustibles tanto gaseosos como líquidos se utilizan para el transporte y se denominan de igual manera biocarburantes. Los biocombustibles sólidos se pueden utilizar en forma de pellets, donde se el contenido de humedad es la variable de mayor interés, debido a que, a mayor contenido de humedad, menor será el poder calorífico del biocombustible. Los biocombustibles se combinan con el oxígeno en los procesos de combustión y liberan la energía que contiene en los enlaces químicos de las moléculas orgánicas que los forman, donde se obtiene como producto final anhídrido carbónico y agua (Fernández, 2020).

Los biocombustibles líquidos pueden clasificarse según la International Energy Agency (IEA), como biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación. Los biocombustibles de primera generación son aquellos biocombustibles utilizados en la actualidad que ya han alcanzado la etapa de producción comercial. Estos proceden de

cultivos que utilizan técnicas similares a las de cosechas agrícolas alimenticias. Los biocombustibles de segunda generación o biocombustibles lignocelulósicos son aquellos que no compiten de ninguna forma con los suelos agrícolas, sino que se producen a partir de biomasa lignocelulósica como la contenida en la madera, por ejemplo, estos biocombustibles de segunda generación se encuentran en fase comercial. Los biocombustibles de tercera generación son aquellos aceites procedentes de algas y otros microorganismos, tal como el hidrógeno precedente de la biomasa. Estos biocombustibles aún se encuentran en fase de desarrollo y no hay procesos a escala por lo que no se pueden comercializar. Finalmente, los biocombustibles de cuarta generación son aquellos que se obtienen mediante procesos térmicos y bioquímicos, como lo es el proceso termoquímico de pirólisis para la obtención de biocombustibles líquidos a partir de biomasa (Guerrero et al., 2010).

5.5 Sostenibilidad y Economía circular de los combustibles

Frente a las preocupaciones globales sobre el cambio climático y la degradación ambiental, la sostenibilidad de los combustibles se ha convertido en una consideración primordial. El cambio hacia fuentes de energía más ecológicas y sostenibles es crucial para mitigar el impacto de las actividades humanas en el planeta (Lundie y Petersen, 2019).

Por otro lado, el enfoque de economía circular tiene como objetivo minimizar el desperdicio y aprovechar al máximo los recursos mediante la promoción de un sistema de circuito cerrado. En el contexto de los combustibles, esto implica el uso eficiente de los recursos, el reciclaje y la reducción del impacto ambiental (Lundie y Petersen, 2019). A continuación, se muestran algunas de las soluciones planteadas por este enfoque a los problemas actuales de los combustibles:

- De los residuos a la energía:

La conversión de materiales de desecho en energía, como el biogás a partir de residuos orgánicos o el gas de síntesis a partir de biomasa, es un componente clave de la economía circular de los combustibles, provee de valorización de residuos, que de otra

forma entrarían en un ciclo de carbono donde no serían aprovechados energéticamente (Lundie y Petersen, 2019). A pesar de que esto no es lo ideal desde la óptica de conservación energética, es una salida viable para aquellos residuos contaminados o que no pueden tratarse de otra forma.

- Utilización de Bioenergía y Biomasa:

La utilización de biomasa, incluidos residuos agrícolas y cultivos energéticos específicos, para la producción de bioenergía contribuye a un enfoque circular mediante la utilización de residuos orgánicos. Tal como en el caso de los residuos generales, este tipo de residuos si son clasificados pueden llevar a la producción de varios tipos de biocombustibles, por técnicas físicas, química, y/o biotecnológicas (Lundie y Petersen, 2019).

- Reciclaje y Reutilización de Componentes del Combustible:

El reciclaje y la reutilización de componentes de los combustibles, como la recuperación de metales de las baterías o la reprocesamiento del aceite de cocina usado para obtener biodiesel, se alinean con los principios de la economía circular, ya que reducen el impacto de estos residuos, generando valor para reducir el consumo de combustibles fósiles (Lundie y Petersen, 2019).

- Captura y utilización de carbono (CCU):

CCU implica capturar las emisiones de dióxido de carbono y utilizarlas como recurso, por ejemplo, en la producción de combustibles sintéticos. Esto puede hacerse con técnicas industriales, que implican procesos de captura de los gases de combustión en la chimenea o con técnicas biotecnológicas, que también pueden ser soluciones asociadas a bonos de carbono y el ciclo del mismo elemento (Lundie y Petersen, 2019).

- Economía del Hidrógeno y Pilas de Combustible:

La economía del hidrógeno, junto con las pilas de combustible, promueve la circularidad mediante el uso del hidrógeno como portador de energía y el reciclaje del calor residual.

Esta es una tecnología que presenta un acelerado crecimiento y gran potencial al ser combinada con fuentes renovables de energía para la producción del denominado “hidrógeno verde” (Lundie y Petersen, 2019).

5.6 Normas y estándares de Combustibles y Biocombustibles

De acuerdo con el análisis efectuado por Speight (2014), las normas y estándares para combustibles varían en función del lugar de comercialización, entidades involucradas o región. En general, las principales normas aplicables se listan a continuación con su respectiva descripción central:

Normas internacionales ASTM:

- ASTM D975 - Especificación estándar para combustible diésel
- ASTM D396 - Especificación estándar para combustibles líquidos
- ASTM D4814 - Especificación estándar para combustible de motores de encendido por chispa para automóviles
- ASTM D7467: Especificación estándar para combustible diésel y mezcla de biodiésel (B6 a B20)

Normas ISO (Organización Internacional de Normalización):

- ISO 8217 - Productos derivados del petróleo. Combustibles (clase F).
- ISO 14687 - Combustible de hidrógeno. Especificaciones del producto.
- ISO 15403 - Gas natural. Gas natural para uso como combustible comprimido para vehículos.

EN (Normas Europeas) para Combustibles:

- EN 590 - Combustibles para automoción - Diésel - Requisitos y métodos de ensayo

- EN 228 - Combustibles para automoción - Gasolina sin plomo - Requisitos y métodos de ensayo

Normas ASTM e ISO para Biocombustibles:

- ASTM D6751 - Especificación estándar para mezclas de combustible biodiesel (B100) para combustibles destilados medios
- ISO 24260 - Biodiesel. Determinación del contenido de éster y éster metílico del ácido linolénico mediante cromatografía de gases.

Directiva de la UE sobre energías renovables (RED):

- Directiva (UE) 2018/2001 - Promoción del uso de energía procedente de fuentes renovables (RED II)
- Directiva 2009/28/CE - Promoción del uso de energía procedente de fuentes renovables (RED I)

Estándares de Certificación de Sostenibilidad:

- Mesa redonda sobre biomateriales sostenibles (RSB): principios y criterios para la producción de biomasa sostenible
- Certificación Internacional de Sostenibilidad y Carbono (ISCC) - Sistema de Certificación de Biomasa y Bioenergía Sostenibles

Normas ASTM e ISO para combustibles gaseosos:

- ASTM D1835 - Especificación estándar para gases licuados de petróleo (LP)
- ISO 15403 - Gas natural. Gas natural para uso como combustible comprimido para vehículos.

Normas ASTM para combustibles de aviación:

- ASTM D1655 - Especificación estándar para combustibles para turbinas de aviación

- ASTM D7566: Especificación estándar para combustible de turbinas de aviación que contiene hidrocarburos sintetizados

GOST (Normas Nacionales Rusas) para Combustibles:

- GOST 305-82 - Combustible diésel. Especificaciones
- GOST 51105-97 - Combustible biodiesel. Especificaciones

Normas Nacionales Brasileñas para Biocombustibles:

- NBR 15597-1 - Combustibles automotrices - Combustible etanol (E100) para motores de encendido por chispa de automóviles - Parte 1: Especificación del etanol combustible (E100)
- NBR 15597-2 - Combustibles automotrices - Combustible etanol (E85) para motores de encendido por chispa de automóviles - Parte 2: Especificación del etanol combustible (E85)

Normas nacionales chinas para combustibles:

- GB 17930-2016 - Etanol (E85) para mezclar con gasolina para su uso como combustible para motores de encendido por chispa de automóviles - Especificaciones
- GB 252-2015 - Gasolina

Normas nacionales indias para combustibles:

- IS 1460 - Gasolina para automóviles (gasolina) - Especificación
- IS 15607 - Combustibles para automoción - Directrices para el uso de biodiésel en motores diésel

Normas existentes en Guatemala:

- Decreto número 109-97 Ley de Comercialización de Hidrocarburos del ministerio de Energía y Minas

6. Breve Historia de Guatemala

Precolonial

Tanto la historia como la arqueología suelen remitirse al siglo X de nuestra era para datar tanto la cumbre de la civilización maya de Yucatán, Chiapas, Guatemala y parte de Honduras, como el inicio de su repentino colapso y el abandono —a lo largo de más o menos un siglo— de sus grandes centros ceremoniales, como Palenque, Tikal y Copán, entre otras grandes ciudades (Morales, 2016).

Figura 45: Línea de tiempo de la historia de Guatemala



Fuente: (Morales, 2016).

Después del colapso de la gran unidad maya en el siglo X, los pueblos derivados de los mayas se expandieron por el sur de México y por todo lo que después sería el territorio guatemalteco, dentro del cual se diferenciaron cinco naciones con sus respectivos idiomas: los quichés, los cakchiqueles, los tzutuhiles, los mames y los kekchíes. Estos pueblos pronto establecieron una dinámica militar entre sí, basada en disputas de territorio, mujeres y controles de rutas mercantiles, con el norte y con el sur, en la cual la nación quiché acusó una inequívoca tendencia hacia el imperio (Morales, 2016).

Período Colonial

Cuando Hernán Cortés desembarca en México en 1519, lo acompaña Pedro de Alvarado, a quien aquél, después de la conquista de Tenochtitlán y de la muerte del emperador Moctezuma, encomienda la exploración y pacificación de las tierras del sur. Alvarado penetra en Guatemala y sigue la misma táctica que le había dado buen resultado a Cortés, a saber: aliarse con los pueblos sojuzgados por el poder imperialista que, en el caso de México, lo ayudaron a derrotar a los aztecas, y en el caso de Guatemala contribuyeron a que Alvarado derrotara a los odiados quichés. Los históricos odios entre cakchiqueles y quichés, que se remontaban a los siglos XI al XVI (debidos al genocidio perpetrado por éstos sobre aquéllos), se vieron agudizados por los avatares de la conquista española (Luján, 2012).

Guatemala pasa a ser, dentro de la organización política de la Colonia, una Capitanía General que en teoría estaba supeditada al Virreinato de la Nueva España (México), aunque en la práctica gozó de una autonomía casi total en materia política y económica, sobre todo desde que se reorganizó a la población indígena para que cumpliera con los objetivos de la empresa colonial. los indios permanecieron ligados a la tierra y los criollos perpetuaron el estado de cosas colonial, los mestizos o ladinos tuvieron que ubicarse en estamentos de servicios luego de constituir una minoría despreciada por españoles e indios. Ya a la altura del siglo XVIII, la indiferenciación étnica era generalizada en el Reino de Guatemala, hasta el extremo de que la autoidentificación llegó a ser el principal criterio de diferenciación, pues el término ladino se amplió a toda persona que no quisiera ser identificada como india, independientemente de que fenotípica y socialmente lo fuera o no (Luján, 2012).

Independencia y Revolución

Morales (2016) describe esta etapa de la siguiente forma: “El caso de Centroamérica es una excepción en el patrón de guerras independentistas lideradas por criollos ilustrados como Bolívar y San Martín en Sudamérica, y como Hidalgo y Morelos (quien era mestizo) en México, que instrumentalizaron a las masas indígenas y mestizas para pelear

contra las tropas españolas. En Centroamérica no hubo guerra de independencia, pero sí manipulación política de indios y ladinos. Y también aquí los criollos dividieron a la sociedad criolla en dos bandos: los liberales (republicanos y seculares) y los conservadores (monárquicos y eclesiásticos). Estos dos bandos y sus luchas pautaron las dinámicas militares de casi todo el siglo XIX, hasta que las economías centroamericanas se ligaron al mercado mundial capitalista por medio de las mono exportaciones, a finales de siglo. Pero decíamos que la independencia de Centroamérica (cuya capital era Guatemala) no ocurrió mediante una guerra, sino que se trató de una transición pacífica, hasta el extremo de que el mismo Capitán General español fungió como primer presidente republicano en 1821, cuando el 15 de septiembre se proclamó oficialmente la independencia de España”.

Este hecho excepcional, sin embargo, no impidió que Guatemala siguiera el patrón de las otras repúblicas nacientes, consistente en la fundación de ejércitos que, en el caso de Sudamérica y de México, habían sido producto de las guerras de independencia entre conservadores y liberales. En el caso de Guatemala, el motivo de la fundación de su ejército, así como su función primigenia fue coaccionar a la mano de obra indígena, que se negaba a viajar a las costas del sur a cultivar forzosamente el café, el algodón y la caña de azúcar, a trabajar en las grandes fincas que surgieron como resultado de la reconcentración de tierras que los criollos realizaron en 1871, luego de una revolución que neutralizó al bando conservador. Esta revolución marcó el inicio de la modernidad guatemalteca, al ligar su economía agroexportadora al mercado mundial capitalista, sobre todo mediante el cultivo intensivo y extensivo del café (Morales, 2016).

Liberalismo y Construcción

El proceso de modernización política y económica de Guatemala empieza en 1944, con el movimiento cívico que derroca a Jorge Ubico y propicia las primeras elecciones libres, que gana un prestigioso doctor en filosofía y profesor universitario, Juan José Arévalo. Esta gesta, conocida como la Revolución Democrática, se enmarca en el ciclo de revoluciones que a lo largo del siglo XX y con fines de modernización política y económica se realizaron en varios países latinoamericanos, en la siguiente secuencia:

México (1910), Guatemala (1944), Cuba (1959), Chile (1973) y Nicaragua (1979). Con excepción del caso de México, donde los cambios fueron cooptados y domesticados por la elite criolla, los intentos de modernización del Estado (democracia) y de la economía (capitalismo nacionalista) fueron abortados por Estados Unidos en el marco de la guerra fría. El caso de Guatemala fue, como se sabe, particularmente dramático (Morales, 2016).

En Guatemala, el período democrático duró diez años, de 1944 a 1954, cuando Estados Unidos, por medio de la CIA, perpetró un golpe de Estado mediante oficiales del Ejército y derrocó al segundo presidente de la revolución, Jacobo Arbenz, con el pretexto de que había comunistas en el Congreso de la República y de que la Reforma Agraria era una medida socialista. En efecto, el Partido Comunista era legal en Guatemala y había diputados de ese partido en el Congreso. Nada extraño en la época. A esto hay que añadir que Arbenz no era comunista, sino un ilustrado coronel nacionalista que intentaba, mediante el reparto de tierras ociosas. Los regímenes militares contrarrevolucionarios reinstalaron los privilegios de los terratenientes criollos, truncando así el proceso de modernización capitalista y la democratización del Estado. De entonces a esta parte, los problemas políticos, sociales y económicos de Guatemala pueden remitirse a este hecho histórico, el cual se tornó en un hecho cultural traumático que repercutió en la autoestima ciudadana y en su pérdida de fe en las propias fuerzas para forjar un futuro social que permitiera a la ciudadanía acceder al empleo, al salario y al consumo (Morales, 2016).

Conflicto armado, acuerdos de paz y modernidad

En 1960 gobernaba el país Miguel Idígoras Fuentes, quien había accedido al pedido de Estados Unidos de prestar el territorio guatemalteco para que pilotos mercenarios se entrenaran y lo usaran como base para invadir la Cuba castrista. Un puñado de oficiales del Ejército, entrenados en contrainsurgencia en academias estadounidenses, se rebelaron contra esta medida, que consideraron como una afrenta a la soberanía nacional y una deshonra para la institución armada, y propiciaron un golpe de Estado que fracasó. Idígoras entonces ofreció una amnistía a los alzados, muchos de los cuales se acogieron

a ella, pero unos cuantos no lo hicieron y se refugiaron en las montañas del oriente del país y de Honduras, constituyéndose así en el primer núcleo guerrillero que iniciaría una lucha armada, que habría de durar 36 años (Luján, 2012).

Luego de una serie de actos violentos, con víctimas militares y revolucionarias, la paz se firmó, pues, a finales de 1996, en circunstancias oscuras. El secretismo de las negociaciones, así como la negativa de las partes a la participación de la sociedad civil en las mismas, dejaron al descubierto componendas entre jefes militares que, mediante pactos secretos, se eximieron mutuamente de sus responsabilidades en la guerra sucia. Por otra parte, la URNG negoció la paz desde una posición de desventaja, pues estaba militarmente derrotada desde hacía más de cuatro años. El papel no sólo decisivo sino de presión que desempeñó la comunidad internacional por medio de la representación local de las Naciones Unidas (proclive a los intereses de la dirigencia de la URNG) (Morales, 2016).

De acuerdo con USAID (2020), el conflicto armado de Guatemala, que duró 36 años, fue el enfrentamiento más largo y violento de Centroamérica y mató a más de 200.000 personas, el 83 por ciento de las cuales eran indígenas. La firma de los Acuerdos de Paz en 1996, que comprendían acuerdos separados que abarcaban compromisos socioeconómicos, democráticos, de alto el fuego y de reconciliación, marcó el fin oficial del conflicto. Sin embargo, persisten importantes sospechas y desconfianzas entre las comunidades indígenas y el gobierno, dado que muchos de estos acuerdos nunca se implementaron plenamente.

En 2006, el gobierno firmó un acuerdo con las Naciones Unidas (ONU) estableciendo la Comisión Internacional Contra la Impunidad en Guatemala (CICIG) para investigar la corrupción de alto nivel en Guatemala. Ese mismo año, Guatemala firmó el Tratado de Libre Comercio entre República Dominicana y Centroamérica, que ha aumentado significativamente el comercio bilateral con Estados Unidos (USAID, 2020). Sin embargo, la CICIG fue removida de sus funciones en 2017 y los actos de corrupción, abusos y delitos continúan reportándose continuamente.

Guatemala experimentó una crisis política extrema en 2015 con la destitución y arresto del Presidente y el Vicepresidente debido a corrupción, descubierta por la CICIG. Estos arrestos representaron la primera vez en la historia reciente de Guatemala que se desafió efectivamente una cultura firmemente arraigada de impunidad y abuso de poder tanto por parte del gobierno como del sector privado (USAID, 2020).

A pesar de contar con planes de desarrollo y de apoyo como parte de la colaboración con Estados Unidos, la Unión Europea y varios países de Asia, el gobierno sigue teniendo índices internacionales adversos y su credibilidad internacional y sobre todo en la población, es cada vez más negativa. Es indispensable de acuerdo con USAID (2020) el compromiso del gobierno, para garantizar la transparencia de sus acciones y tomar las medidas necesarias para mejorar la situación de la población en general.

6.1 Hechos e Historia de los residuos sólidos en ciudad de Guatemala

La Ciudad de Guatemala a pesar de que ocupa el 0.17% del territorio, dentro del sistema de centros poblados del país es el centro urbano más importante, debido a que el 9.85% de la población se encuentra en esta área, y por la mayor concentración de actividades industriales, comerciales, etc. Para la planificación de los aspectos socioeconómicos en los centros urbanos es necesario tomar en cuenta que es un ecosistema que recibe constantemente cantidades de población, materias primas, alimentos, agua, energía, etc. Como contrapartida se generan necesidades materiales, infraestructura, etc. Asimismo, se producen volúmenes de residuos sólidos y líquidos que es necesario manejar adecuadamente (Martínez, 1996).

Martínez (1996) indica: “La Constitución Política de la República de Guatemala en el artículo 253 y el Código Municipal, Decreto No. 58-88, en el artículo 40, señalan como competencia territorial de las municipalidades, el establecimiento, regulación y atención de los servicios públicos locales. Asimismo, se dice que deberán participar en la promoción de la salud y el saneamiento ambiental. En cuanto a los residuos sólidos, siendo el primer esfuerzo en el campo, la Municipalidad emitió el 4 de enero de 1982, su reglamento de limpieza y saneamiento ambiental. En éste se asigna como función la

prestación del servicio de aseo, barrido de calles, recolección, disposición final de basuras y tratamiento de desechos sólidos. Es decir, el sentido de las normas jurídicas indica que los funcionarios municipales deben contemplar dentro de las acciones administrativas municipales, la promoción de un servicio público eficaz tendiente a proteger los recursos naturales y la vida de la población”.

Sin embargo, es frecuente observar los intersticios de la ciudad convertidos en botaderos abiertos de basuras. Aún más en la zona 3 de esta ciudad se encuentra el llamado “relleno sanitario”, cuya fecha de formación se desconoce, y que constituye realmente un tiradero abierto autorizado por el gobierno local. Situación que contribuye a una mayor contaminación de la atmósfera, el suelo y aguas subterráneas, debido a las emanaciones de gases, humos y lixiviados generados. Por mucho que los voceros de la actual administración municipal panista hayan intentado hacernos creer que se cuenta con un proyecto alternativo lo único evidente es un botadero que contamina drásticamente el medio ambiente metropolitano (Martínez, 1996).

La Ciudad de Guatemala consta de 25 zonas de acuerdo con la resolución del Consejo Municipal del 7 de diciembre de 1971 publicado en el diario oficial del 5 de enero de 1972. La localización de actividades urbanas muestra que en las zonas 1 y 4 predominan las oficinas de instituciones estatales y empresas comerciales, con expansión a las zonas 9 y 10, por las facilidades de acceso (Martínez, 1996).

El proceso de urbanización ha sustituido el uso de suelo agroforestal a urbano al utilizarlo como soportes para edificaciones o construcción de infraestructura. Esta situación ha provocado que de 1954 a 1981 se hayan perdido 64.92 km². Si, la anterior tendencia se hubiera mantenido y tomando como referencia la población existente a 1994, significaría que se habría perdido un equivalente a 75 m², por persona en 27 años. La pérdida total alcanzaría 176.04 km² (Martínez, 1996).

Un primer paso fue dado el 7 de febrero de 1989 siendo aprobado el Acuerdo Gubernativo No. 60-89, que contiene el "Reglamento de requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas servidas". Sin

embargo, la falta de control en el cumplimiento de las normas ha provocado que la contaminación se extienda más allá de esta área geográfica (Martínez, 1996).

En cuanto a los residuos sólidos, la Municipalidad de Guatemala y el sector privado solamente recolectan un 53% de los desechos generados. De allí que se admita que en toda la ciudad se encuentran dispersos los botaderos o basureros clandestinos. No existe un proceso de disposición final, solamente son depositados en un botadero general ubicado entre las zonas 3 y 7 de la ciudad. En él se promueve la contaminación de suelos y de la atmósfera principalmente durante el invierno y cuando se producen incendios (Martínez, 1996).

En el año de 1986 se emitió el Decreto del Congreso de la República No. 68-86, "Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente". Este expresó en sus considerandos que la protección y mejoramiento del medio ambiente y los recursos naturales y culturales "...es fundamental para el logro de un desarrollo social y económico del país, de manera sostenida". Además, se afirmó que Guatemala al aceptar las resoluciones de la conferencia de las Naciones Unidas, celebrada en 1972, en Estocolmo, Suecia, debía integrarse a los programas mundiales para la protección y mejoramiento del medio ambiente y la calidad de vida en lo que a su parte territorial corresponde (Martínez, 1996).

El día 25 de junio de 1996 fue publicado el Decreto No. 33-96 del Congreso de la República, que reformó el Código Penal, Decreto del Congreso No. 17-73. En aquel Decreto se contemplaron los delitos contra el ambiente. Se adicionó al Código Penal, el artículo 347 "A", el cual se refiere a la contaminación de la manera siguiente: "Será sancionado con prisión de uno a dos años, y multa de trescientos a cinco mil quetzales, el que contaminare el aire, el suelo o las aguas, mediante emanaciones tóxicas, ruidos excesivos, vertiendo substancias peligrosas o desechando productos que puedan perjudicar a las personas, a los animales, bosques o plantaciones. Si la contaminación se produce en forma culposa, se impondrá multa de doscientos a mil quinientos quetzales" (Martínez, 1996).

Como se evidencia de lo anterior, los hechos históricos relacionados se encuentran dispersos y hasta los años 2020, se tenía una serie de medidas aleatorias no acatadas, que no se cumplen, con poco o nulo sustento técnico y que llevan a problemas de tratamiento y contaminación considerables.

6.2 Condiciones Económicas en Guatemala

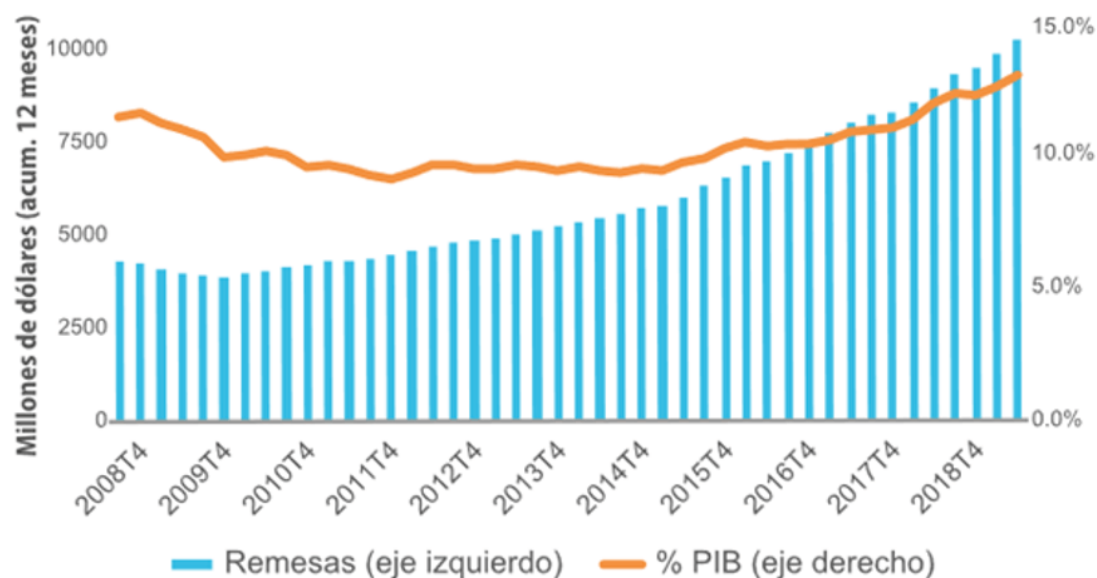
De acuerdo con el Banco Mundial (2023), Guatemala es un país de ingreso medio-alto y la economía más grande de América Central, por población y actividad económica. En 2021, su población superó los 17 millones y su producto interno bruto (PIB) total y per cápita fue de US\$86 mil millones y US\$5,025, respectivamente. El país ha experimentado un ritmo estable de crecimiento (3,5 por ciento en promedio durante el período 2010-2019), respaldado por una gestión fiscal y monetaria y una postura macroeconómica prudentes. Luego de un fuerte repunte en 2021 (8 %), la economía de Guatemala creció aproximadamente un 4 por ciento en 2022, impulsada por el consumo privado, la inversión y el consumo público. Se espera que el crecimiento del PIB se desacelere a 3,2 por ciento en 2023.

USAID (2020) indica que el país enfrenta importantes desafíos de desarrollo: las tasas de pobreza y desigualdad de Guatemala se encuentran entre las más altas de la región de América Latina y el Caribe (ALC), debido a la existencia de una numerosa población desatendida, en su mayoría rural e indígena y empleada en el sector informal. Un estado pequeño e ineficaz, la falta de educación y oportunidades laborales y los frecuentes eventos naturales adversos son algunos de los factores clave que han contribuido a la pobreza en Guatemala. Las simulaciones para 2019 sugieren que alrededor del 54 por ciento de la población estaba ese año por debajo del umbral de pobreza, solo un poco por debajo del 55,4 por ciento en 2014, la última estimación oficial de pobreza.

El Índice de Capital Humano (HCI, por sus siglas en inglés) de Guatemala aumentó de 0,44 a 0,46 entre 2010 y 2018, pero el puntaje general del HCI del país sigue estando muy por debajo del promedio de ALC. Un HCI de 0.46 indica que se esperaría que un niño nacido en Guatemala en 2018 alcance solo el 46 por ciento de lo que habría sido su

productividad de por vida si hubiera disfrutado de una educación completa y plena salud. Los indicadores de capital humano son bajos entre los pueblos indígenas y afrodescendientes, que representaban alrededor del 45 por ciento de la población en 2018 (Banco Mundial, 2023).

Figura 46: Tendencia de las Remesas en Guatemala



Fuente: (CEPAL, 2019)

La tasa de desnutrición de niños menores de cinco años en Guatemala (47 por ciento) se encuentra entre las diez más altas del mundo. A pesar de los esfuerzos recientes del gobierno para priorizar las intervenciones en la primera infancia, la tasa de retraso en el crecimiento sigue siendo particularmente alta y podría empeorar en un contexto de inseguridad alimentaria y precios elevados de los alimentos (Banco Mundial, 2023).

Los eventos naturales adversos han anulado los logros obtenidos en capital humano, destruido la infraestructura, reducido la producción agrícola, intensificado la inseguridad alimentaria, propagado enfermedades e interrumpido la prestación de servicios esenciales. Estimaciones recientes sugieren que los huracanes Eta e Iota en 2020

causaron pérdidas relacionadas con la infraestructura cercanas al 0,56 por ciento del PIB (Banco Mundial, 2023).

De acuerdo con USAID (2020) y con el Banco Mundial (2023), Guatemala tiene un enorme potencial para generar crecimiento y prosperidad para toda su población. El país es rico en recursos naturales, es uno de los países megadiversos del mundo, posee riqueza cultural y tiene una economía diversificada y con proximidad a Estados Unidos, lo que ofrece importantes oportunidades de turismo y de “nearshoring” (deslocalización cercana).

6.3 Condiciones Políticas en Guatemala

De acuerdo con USAID (2020), el conflicto armado de Guatemala, que duró 36 años, fue el enfrentamiento más largo y violento de Centroamérica y mató a más de 200.000 personas, el 83 por ciento de las cuales eran indígenas. La firma de los Acuerdos de Paz en 1996, que comprendían acuerdos separados que abarcaban compromisos socioeconómicos, democráticos, de alto el fuego y de reconciliación, marcó el fin oficial del conflicto. Sin embargo, persisten importantes sospechas y desconfianzas entre las comunidades indígenas y el gobierno, dado que muchos de estos acuerdos nunca se implementaron plenamente.

En 2006, el gobierno firmó un acuerdo con las Naciones Unidas (ONU) estableciendo la Comisión Internacional Contra la Impunidad en Guatemala (CICIG) para investigar la corrupción de alto nivel en Guatemala. Ese mismo año, Guatemala firmó el Tratado de Libre Comercio entre República Dominicana y Centroamérica, que ha aumentado significativamente el comercio bilateral con Estados Unidos (USAID, 2020). Sin embargo, la CICIG fue removida de sus funciones en 2017 y los actos de corrupción, abusos y delitos continúan reportándose continuamente.

Guatemala experimentó una crisis política extrema en 2015 con la destitución y arresto del Presidente y el Vicepresidente debido a corrupción, descubierta por la CICIG. Estos arrestos representaron la primera vez en la historia reciente de Guatemala que se desafió

efectivamente una cultura firmemente arraigada de impunidad y abuso de poder tanto por parte del gobierno como del sector privado (USAID, 2020).

Elecciones 2019

Alejandro Giammattei ganó las elecciones generales de Guatemala de 2019 con el 58 por ciento de los votos. Se eligieron mil ciento sesenta diputados al Congreso, dos tercios de los cuales son nuevos legisladores de 19 partidos diferentes, lo que pone de relieve la alta fragmentación del tejido político del país. Los resultados electorales fueron similares a nivel municipal, donde tres cuartas partes de los alcaldes fueron elegidos recientemente, con una gran dispersión de partidos políticos y los mismos tres partidos ganaron un mayor número de municipios. Las elecciones de 2019 en Guatemala fueron las primeras desde la aprobación de las históricas reformas electorales de 2016, que autorizaron al Tribunal Supremo Electoral a rastrear y penalizar el uso de fondos de campaña ilícitos o anónimos y permitieron anuncios igualitarios en los medios para todos los partidos, entre otras. Si bien estas reformas nivelaron el campo de juego entre los candidatos, continúan siendo atacadas por partes interesadas que se beneficiaron del sistema anterior (USAID, 2020).

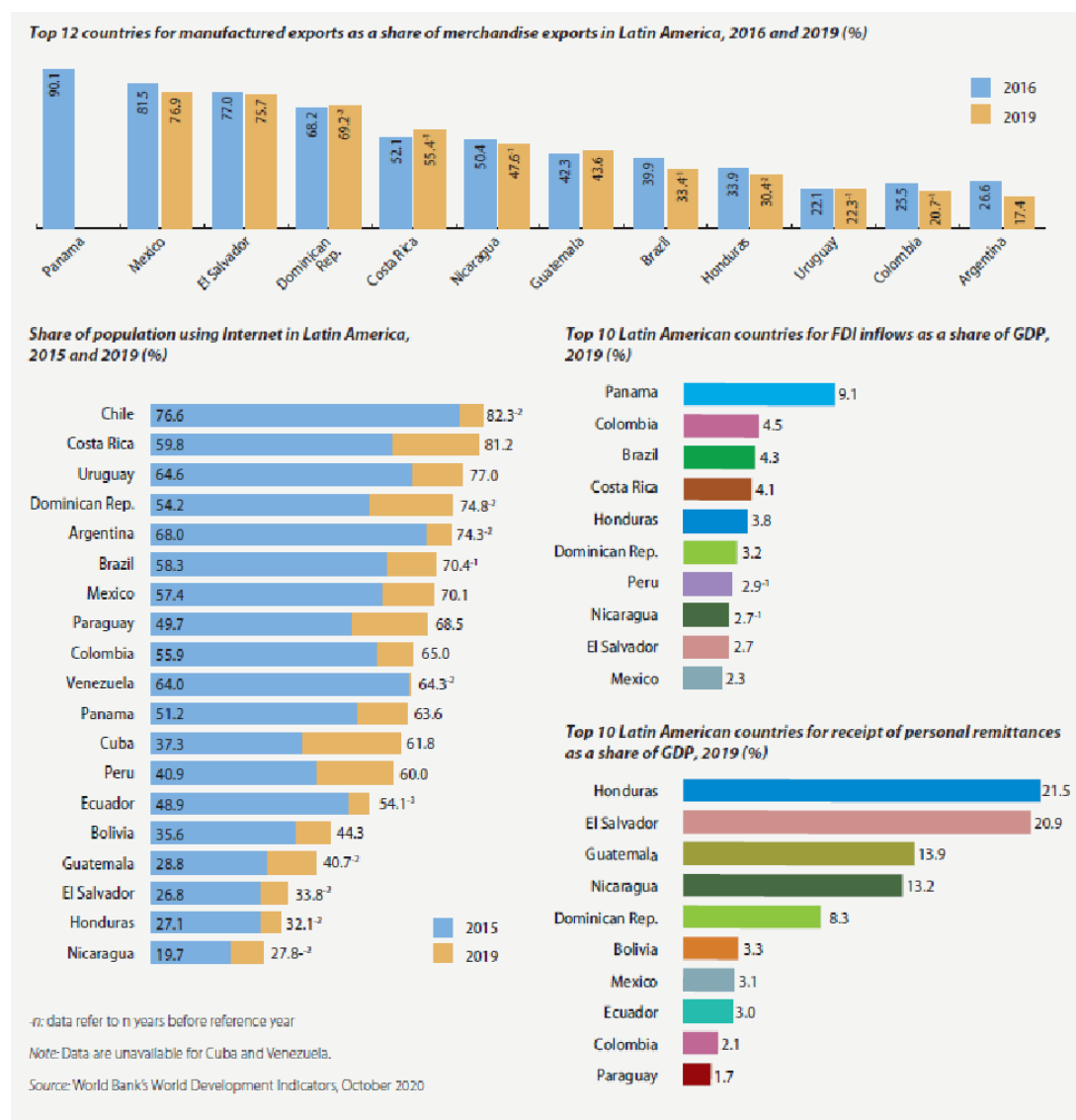
A pesar de contar con planes de desarrollo y de apoyo como parte de la colaboración con Estados Unidos, la Unión Europea y varios países de Asia, el gobierno sigue teniendo índices internacionales adversos y su credibilidad internacional y sobre todo en la población, es cada vez más negativa. Es indispensable de acuerdo con USAID (2020) el compromiso del gobierno, para garantizar la transparencia de sus acciones y tomar las medidas necesarias para mejorar la situación de la población en general.

6.4 Desarrollo e Investigación en la región

De lo publicado por (Aguilera et al., 2017) se evidencia la notable diferencia en desarrollo entre los países latinoamericanos que invierten en ciencia y tecnología, comparado con los que no lo hacen. Se evidencia en combinación con (Dutrénit et al., 2021), que, en la región latinoamericana, las investigaciones podrán dar el soporte necesario para inducir el desarrollo sostenible, reducir la pobreza y las brechas

socioeconómicas, y brindar mayores fuentes de financiamiento para investigaciones y patentes.

Figura 47: Tendencias Económicas de manufactura y remesas en Latinoamérica

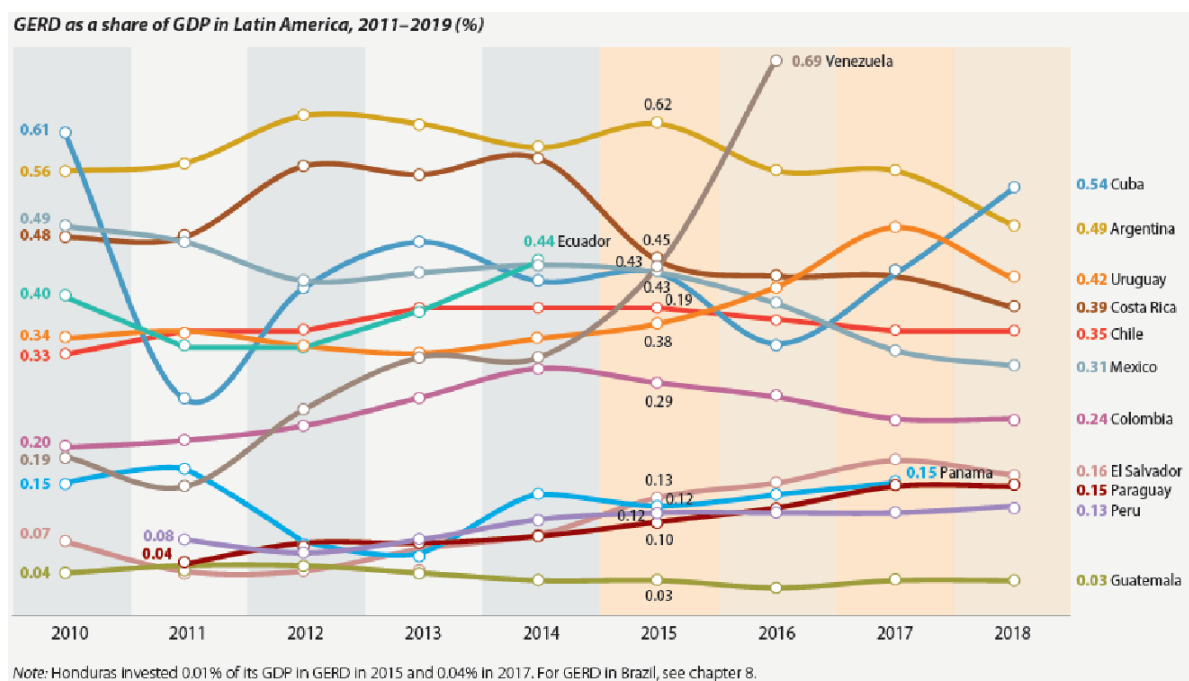


Fuente: (Dutrénit et al., 2021)

A pesar de esto, existen países como Guatemala que de acuerdo con (Dutrénit et al., 2021) tiene limitada inversión en investigación, siendo el país que invierte el menor porcentaje del PIB en este rubro, con solamente el 0.03% (ver Figura 44). Esto

corresponde a la limitada inversión del gobierno en investigación y desarrollo, y contrasta con el aporte significativo de las instituciones educativas, que proveen de más del 70% de los fondos usados en el país para investigación (Dutrénit et al., 2021). Muchos de estos fondos provienen de donantes internacionales, que otorgan los recursos por la trayectoria de las instituciones y su capacidad de aporte científico.

Figura 48: Tendencias de inversión en Investigación y Desarrollo en Latinoamérica

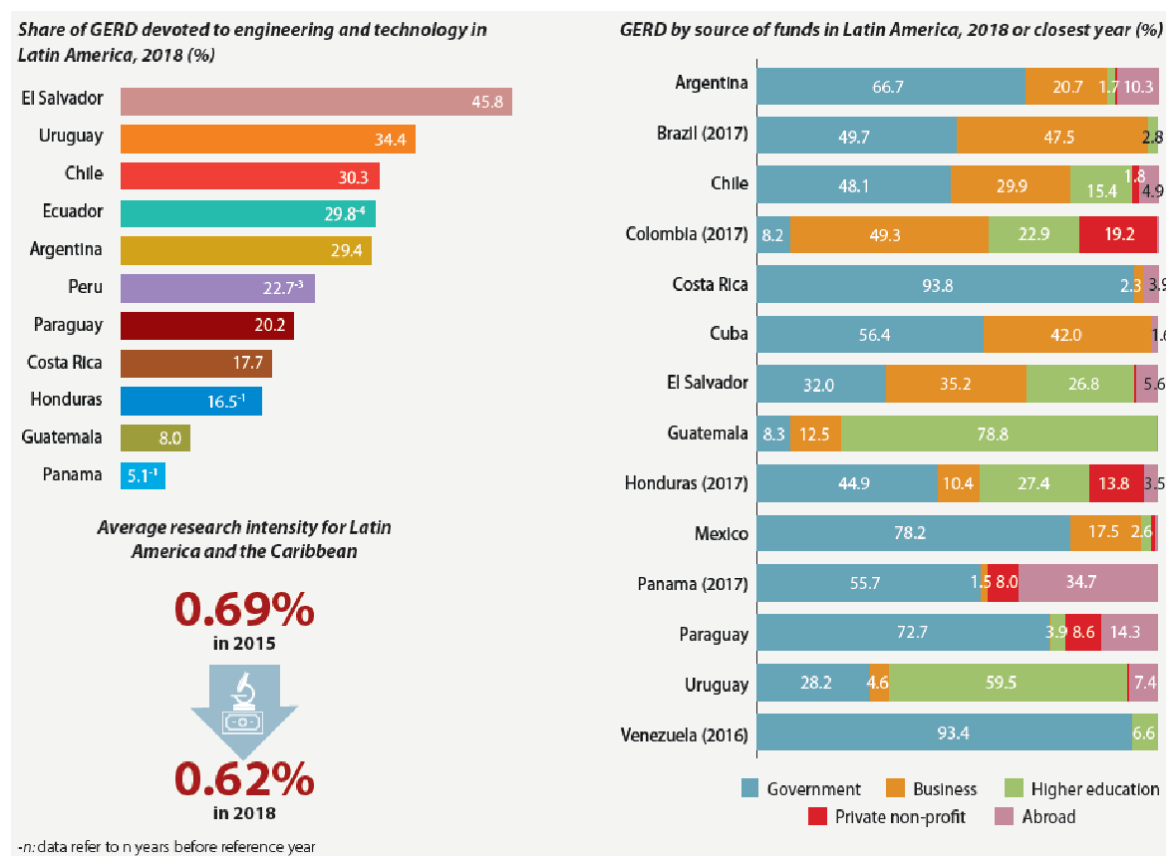


Fuente: (Dutrénit et al., 2021)

A pesar de esto, la investigación en Guatemala tiene una trayectoria de profesionales que, aunque limitados en número (menos de 900 profesionales con grado de doctorado) y recursos, generan contribuciones anuales a la comunidad científica. Se observa de la Figura 45, que solo en 2019 se realizaron 269 publicaciones, con histórico creciente que ronda el 10% de incremento anual en dicho número, superando a varios países que tienen más inversión en este campo. El área más fuerte de investigación son las ciencias de la salud que, por la trayectoria de varios centros, obtienen colaboraciones internacionales (Dutrénit et al., 2021). Sin embargo, las investigaciones tecnológicas son

limitadas, aunque se tiene patentes en algunos campos específicos (CEPAL, 2019). El balance de género, el aprovechamiento de los recursos y el esfuerzo de investigaciones colaborativas son factores clave de la tendencia positiva, aunque limitada.

Figura 49. Tendencias de inversión en Investigación y Desarrollo en Latinoamérica



Fuente: (Dutrénit et al., 2021)

7. Análisis Legal y Normativo

Empleando información de diferentes fuentes sobre las legislaciones guatemaltecas y acuerdos internacionales donde el país ha participado, se presenta un análisis de los principales aplicables a la investigación planteada. El resumen de leyes, normas y acuerdos se muestra a continuación:

7.1 Acuerdos Internacionales

De acuerdo con lo mencionado por MARN (2021b) en su documento sobre convenios y tratados internacionales ambientales ratificados por Guatemala, así como en lo expresado por MARN (2011) en su página web, se tienen obligaciones internacionales en las siguientes líneas relacionadas al campo del proyecto: 1) Protección Ambiental, 2) Ecosistemas Críticos, Vida Silvestre y Diversidad Biológica, 3) Recursos Filogenéticos, 4) Cambio Climático, 5) Desechos Peligrosos y Contaminantes Persistentes, y 6) Convenios Regionales Centroamericanos de Protección Ambiental. La gama de lo acordado en cada uno es variada y va en líneas desde la preservación de Biodiversidad y control de cambio climático, hasta la reducción de contaminación de diferentes fuentes.

Los referentes legales o normativos que aplican en esta categoría de acuerdos internacionales relacionados al tema de investigación, se muestran en el Cuadro 53, en este se resumen los tratados internacionales firmados, estableciendo el año en el que se firmaron por las autoridades locales, generando su compromiso, y proporcionando una breve descripción de cada uno, con el objetivo de conocer en primera instancia todo aquello que internacionalmente debe o puede cumplirse como resultado de los acuerdos diplomáticos de Guatemala.

Cuadro 53: Principales Tratados Internacionales firmados por Guatemala y relacionados al tema Ambiental

Autor / Ley o Reglamento	Año	Breve Descripción
Declaración de Estocolmo	1972	La Declaración de Estocolmo, que contenía 26 principios, colocó las cuestiones ambientales en el primer plano de las preocupaciones internacionales y marcó el inicio de un diálogo entre los países industrializados y en desarrollo sobre el vínculo entre el crecimiento económico, la contaminación del aire, el agua y los océanos y el bienestar de las personas de todo el mundo. El plan de acción constaba de tres tipos generales de acción: a) El programa global de evaluación del medio humano (Vigilancia mundial); b) Las actividades de ordenación del medio humano; c) Las medidas internacionales auxiliares de la acción nacional e internacional de evaluación y ordenación. Además, estos tipos generales de acción se desglosaron en 109 recomendaciones.
Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo	1992	Habiéndose reunido en Río de Janeiro del 3 al 14 de junio de 1992, Reafirmando la Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, aprobada en Estocolmo el 16 de junio de 1972, y tratando de basarse en ella, con el objetivo de establecer una alianza mundial nueva y equitativa mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, los sectores claves de las sociedades y las personas, procurando alcanzar acuerdos internacionales en los que se respeten los intereses de todos y se proteja la integridad del sistema ambiental y de desarrollo mundial. Establece 27 principios y compromisos de los participantes.
Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	1994	La CMNUCC entró en vigor el 21 de marzo de 1994, estableciendo un marco de acción cuyo objetivo último es "Lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera en un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático.
Protocolo de Kyoto	1997	El Protocolo de Kioto fue creado para reducir las emisiones de gases de efecto (GEI) invernadero que causan el calentamiento global. Es un instrumento para poner en práctica lo acordado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero entró en vigor hasta 2005. La decimoctava Conferencia de las Partes sobre cambio climático (COP18) ratificó el segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kioto desde enero de 2013 hasta diciembre de 2020.
Declaración del Milenio	2000	Los objetivos de desarrollo del Milenio constituyen el marco más general, más centrado y más ampliamente compartido por la comunidad internacional para luchar contra la pobreza. Los objetivos de desarrollo del Milenio, surgidos de la Declaración del Milenio y aprobados y acordados por todos los gobiernos en el año 2000, representan los compromisos contraídos por los Estados Miembros de las Naciones Unidas para reducir la pobreza extrema y sus diversas manifestaciones: el hambre, las enfermedades, la desigualdad entre los géneros, la falta de educación y de acceso a infraestructuras básicas, así como la degradación del medio ambiente.
Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)	2001	Los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) son sustancias químicas que persisten en el ambiente, se bioacumulan en la cadena alimentaria y tienen potencial para transportarse a larga distancia, pudiendo llegar a regiones en las que no se han producido o utilizado. Este grupo de contaminantes prioritarios está compuesto de pesticidas, productos químicos utilizados en procesos industriales y otras sustancias generadas de forma no intencionada. Estas sustancias son evaluadas y reguladas a nivel internacional por el Convenio de Estocolmo, que insta a los países a reducir sus emisiones y liberaciones de estos compuestos químicos mediante prohibiciones y restricciones a su fabricación y uso.

<p>Declaración sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo</p>	<p>2002</p>	<p>La Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de 2002 en Johannesburgo adoptó una Declaración Política y un Plan de Implementación que incluyó disposiciones que cubren un conjunto de actividades y medidas que deben tomarse para lograr un desarrollo que tenga en cuenta el respeto por el medio ambiente. De este modo, esta Cumbre, que contó con la participación de más de un centenar de jefes de Estado y de gobierno y decenas de miles de representantes gubernamentales y organizaciones no gubernamentales, dio como resultado, después de varios días de deliberaciones, decisiones relacionadas con el agua, la energía, salud, agricultura, diversidad biológica y otras áreas de interés.</p> <p>Con respecto a la diversidad biológica, el Plan de Implementación pidió el establecimiento de un régimen internacional para asegurar una distribución justa y equitativa de los beneficios derivados del uso de los recursos genéticos. El texto incluía disposiciones sobre el Protocolo de Kyoto sobre la reducción de gases de efecto invernadero para los estados que lo habían ratificado. Se instó a los que aún no lo habían hecho a que lo ratificaran sin demora. Las disposiciones también incluyen la creación de un fondo de solidaridad mundial para la erradicación de la pobreza y el lanzamiento de programas decenal para apoyar iniciativas regionales y nacionales destinadas a acelerar la transición hacia patrones de producción y consumo viables.</p>
<p>Capítulo 17 Ambiente DR-CAFTA</p>	<p>2004</p>	<p>En el Capítulo 17 del DR-CAFTA, Ambiente, los países del DR-CAFTA acordaron asegurar que sus leyes y políticas provean y estimulen altos niveles de protección ambiental, que se continúe con la mejora de dichas leyes y políticas, y que no se falle en su aplicación efectiva.</p> <p>El Capítulo 17 aborda asuntos procesales relativos al cumplimiento efectivo de las leyes, mecanismos voluntarios para mejorar el desempeño ambiental, el establecimiento de un Consejo de Asuntos Ambientales, oportunidades para la participación pública, presentaciones relacionadas con el cumplimiento, además de otros temas.</p>
<p>Protocolo de Nagoya</p>	<p>2011</p>	<p>Acuerdo internacional sobre acceso a los recursos genéticos y la participación justa y equitativa en los beneficios derivados de su utilización, que se inscribe bajo la órbita del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB). Como su nombre lo sugiere, fue adoptado en Nagoya (Japón), en la décima conferencia de las partes del Convenio de Diversidad Biológica.</p> <p>El Protocolo se propone contribuir a la conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica. Se aplica a los recursos genéticos que están cubiertos por el CDB, a los conocimientos tradicionales asociados a los recursos genéticos y a los beneficios derivados de su utilización.</p>

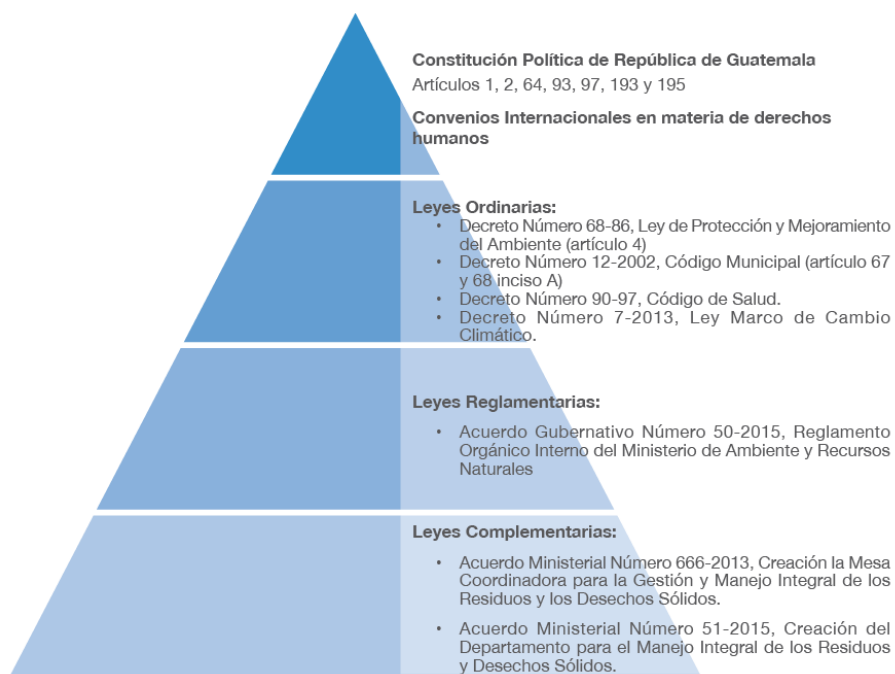
Fuente: Elaboración Propia. En base a lo publicado por MARN (2011) y MARN (2021b).

7.2 Legislación Nacional

Por otro lado, en función de lo descrito por Naciones Unidas (1999), la normativa nacional de Guatemala tiene 3 niveles: 1) la constitución de la República de Guatemala, que fue modificada la última vez por una asamblea nacional constituyente y que se coloca de primero por ser la base de todas las leyes y garantías. 2) Las leyes orgánicas, que son aprobadas por el Congreso de la República de Guatemala y que establecen o regulan aspectos específicos, las mismas pueden identificarse por su nomenclatura respecto a este autor. Y 3) Las reglamentaciones, de las que usualmente se manejan dos tipos: las que son aprobadas por el Presidente de la República y la totalidad o una

parcialidad de su gabinete, y, por otro lado, las que son elaboradas y aprobadas únicamente por uno de los ministerios del poder ejecutivo local. Dentro del contexto del proyecto, el ministerio con la mayor relevancia es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. En la Figura 47, se muestra la infografía sobre los niveles sobre los que se regulan temas ambientales en Guatemala.

Figura 50: Infografía de la pirámide legal de temas ambientales de Guatemala



Fuente: (MARN, 2015).

Cuadro 54: Principales Leyes y Regulaciones locales relacionados al tema Ambiental

Autor / Ley o Reglamento	Fecha	Breve Descripción
Asamblea Nacional Constituyente / Constitución Política de Guatemala y sus Reformas, contenidas en el Acuerdo Legislativo No.18-93	17 de noviembre de 1993	Establece cuáles son los organismos de gobierno, qué características tienen y cuáles son sus atribuciones. Ella establece, de manera general, quienes gobiernan, con qué poderes y con cuáles límites, además de los derechos y responsabilidades de la entidad y los ciudadanos (Naciones Unidas, 1999, pp.2). En ella se establecen derechos fundamentales, que aplicables al proyecto son: Derecho a un Ambiente Sano, Derecho a la Información, Derecho a la Salud, Derecho a la Educación, Disposiciones sobre Protección al Ambiente, Disposiciones sobre Manejo de Recursos y Disposiciones sobre la Participación Civil.
Congreso de la República / Decreto 68-86, Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.	1986	La Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente (Decreto 68-86 del Congreso de la República) establece el marco general para la protección ambiental al crearse la Comisión Nacional del Medio Ambiente, CONAMA, cuya función primordial es asesorar y coordinar todas las acciones tendientes a la formulación de la política nacional ambiental y propiciar su aplicación a través de los distintos ministerios de Estado, dependencias autónomas, semiautónomas y descentralizadas gubernamentales así como municipales y del sector privado del país (Naciones Unidas, 1999, pp. 19-38).
Decreto 58-88, Código Municipal.	1988	Establece el funcionamiento y regulación del ente gestor de cada comunidad o sector del país, en él se establecen las obligaciones de alcaldes y delegados, y se detallan las funciones relacionadas a conservación ambiental (Naciones Unidas, 1999, pp. 19-38).
Congreso de la República / Decreto 4-89, reformado por Decreto 110-96 ambos del Congreso de la República. Ley de Áreas Protegidas. Y Acuerdo Gubernativo 759-90, Reglamento de la Ley de Áreas protegidas Decreto 114-97, Ley del Organismo Ejecutivo	1997/1990	Establecen los límites de áreas protegidas y las obligaciones gubernamentales respectivas a esta materia (Naciones Unidas, 1999, pp. 19-38).
Congreso de la República / Decreto 90-97, Código de Salud	1990	Establece las normativas relacionadas a ambiente que impactan sobre la salud de los ciudadanos, además de la regulación de registros sanitarios, que pretenden cuidar los productos nuevos al ambiente (Naciones Unidas, 1999, pp. 19-38).
Congreso de la República de Guatemala / Ley de Promoción del Desarrollo científico y tecnológico nacional - Decreto 63-91 del Congreso de la República de Guatemala	1991	Marco general para el fomento, organización y orientación de las actividades científicas y tecnológicas, a efecto de estimular su generación, difusión, transferencia y utilización (Batley y González, 2010, pp. 214-434).
Congreso de la República / Decreto No. 101-96, Ley Forestal y Resolución 4.23.97 de la Junta Directiva del INAB, Reglamento de la Ley Forestal	1996	Establece la formación de INAB y la regulación de bosques, tala y controles de deforestación (Naciones Unidas, 1999, pp. 19-38).
Congreso de la República de Guatemala / Ley de Propiedad Industrial, decreto 57-2000	2000	Tiene por objeto la protección, estímulo y fomento a la creatividad intelectual que tiene aplicación en el campo de la industria y el comercio y, en particular, lo relativo a la adquisición, mantenimiento y protección de los signos distintivos, de las patentes de invención y de modelos de utilidad y de los diseños industriales, así como la protección de los secretos empresariales y disposiciones relacionadas con el combate de la competencia desleal (Batley y González, 2010, pp. 214-434).
Presidencia de la República / Reglamento para el manejo de desechos sólidos hospitalarios	2001	Tiene como finalidad el dar cumplimiento a lo preceptuado en el Artículo 106 del Código de Salud, así como de las disposiciones relativas a la preservación del medio ambiente contenidas en la ley del Organismo Ejecutivo y la Ley de Protección y mejoramiento del Medio Ambiente en cuanto a las descargas y emisiones al ambiente; concernientes, particularmente, al manejo de desechos que comprende la recolección clasificación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de los mismos provenientes de los hospitales públicos o privados, centro de atención medica autónomos o semiautónomos y de atención veterinaria. Los desechos generados por los mataderos o rastros deben manejarse de conformidad con el reglamento que para efecto se emita. (Batley y González, 2010, pp. 214-434).

Congreso de la República de Guatemala / Ley de Colegiación Profesional Obligatoria Decreto No. 72-2001	2001	Establece la creación de los colegios de profesionales, que tienen por obligación, un comité de ética y un código de ética establecidos para regular cualquier caso. Dicha ley regula la Colegiación de los Profesionales Universitarios como obligatoria para ejercer. Se entiende por Colegiación la asociación de graduados universitarios formada para cumplir y velar por las disposiciones de esa Ley (Batle y González, 2010, pp. 214-434).
Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales / Normativa sobre la política de marco de gestión ambiental	2003	Este acuerdo tiene por objeto fijar la Política Marco de Gestión Ambiental, y constituirá el marco de referencia en el ámbito nacional, al servicio del Estado para orientar planes, programas y proyectos vinculados a mantener la calidad ambiental y la sostenibilidad de la biodiversidad y los recursos naturales, a través de la dinámica de cambio gradual; la generación de consensos; y la participación e inclusión en los procesos de gestión ambiental, para que la sociedad guatemalteca haga uso de los recursos naturales bajo un enfoque de desarrollo sostenible. (Batle y González, 2010, pp. 214-434).
Presidencia de la República / Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos	2006	Establece los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reuso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Lo anterior para que, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas, se logre establecer un proceso continuo que permita: a) Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana. b) Recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización. c) Promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada. También es objeto del Reglamento establecer los mecanismos de evaluación, control y seguimiento para que el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales promueva la conservación y mejoramiento del recurso hídrico. (Batle y González, 2010, pp. 214-434).
Presidencia de la República / Reglamento para la evaluación, control y seguimiento ambiental	2007	Contiene los lineamientos, estructura y procedimientos necesarios para propiciar el desarrollo sostenible del país en el tema ambiental, mediante el uso de instrumentos que facilitan la evaluación, control y seguimiento ambiental de las actividades, obras, industrias o proyectos que se desarrollan y los que se pretenden desarrollar en el país; lo que facilitará la determinación de las características y los posibles impactos ambientales, para orientar su desarrollo en armonía con la protección del ambiente y los recursos naturales. (Batle y González, 2010, pp. 214-434).
Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales / Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos	2015	La Política Nacional para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos tiene como propósito fundamental establecer a través de programas y líneas de política, acciones para minimizar de la manera más eficiente, los riesgos a los seres humanos y al ambiente, en especial la reducción de la cantidad o peligrosidad de los desechos sólidos que llegan a los sitios de disposición final a través de una gestión integral que contribuya al bienestar del ambiente y la salud. (MARN, 2015, pp. 10-14).
Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales / Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes. Acuerdo Gubernativo Número 164-2021	2021	Tiene por objeto establecer las normas sanitarias y ambientales que deben aplicarse para la gestión integral de los residuos y desechos sólidos comunes, en función de asegurar la protección de la salud humana y evitar la contaminación del ambiente (MARN, 2021a, pp. 5-8). Establece también la necesidad de elaboración de Planes municipales para la gestión integral de residuos y desechos sólidos, la forma de Clasificación de los materiales residuales, Normas para los espacios o sitios destinados al almacenamiento temporal, Normas para los recipientes o contenedores destinados al almacenamiento temporal, Normas sobre el procedimiento de recolección y transporte, Responsabilidades generales de los entes recolectores, Normas para la construcción e instalación de estaciones de transferencia, Normas para la recuperación de materiales, Normas para la construcción e instalación de plantas de reciclaje de materiales recuperados, Normas para la construcción e instalación de plantas de tratamiento, Normas para la construcción e instalación de plantas de tratamiento por incineración, Normas para la construcción e instalación de plantas de tratamiento por reducción mecánica del volumen o tamaño, entre otros (MARN, 2021a, pp. 8-40).

Fuente: Elaboración Propia. En base a lo publicado por MARN (2021b), MARN (2011), Batle y González (2010) y Naciones Unidas (1999).

7.3 Normas de proyectos, productos o análisis

De acuerdo con lo analizado a partir de MARN (2021b), MARN (2011), Batle y González (2010) y Naciones Unidas (1999), no se han encontrado leyes o normas

directamente aplicables a los proyectos de investigación, tesis doctorales o el tratamiento de residuos sólidos con la técnica de pirólisis. De manera que la normativa guía para el proyecto planteado se define como los estándares internacionales respecto a las características técnicas del proceso o productos de la pirólisis, tales como la ASTM D7544, ASTM D7579 y ASTM E3296 para los productos líquido, sólido y gaseoso respectivamente, así como los estándares mostrados en el cuadro 55, obtenido de Oasmaa et al. (2015), donde se muestra un resumen de los valores típicos analizados para cada uno de los productos que pueden obtenerse de esta técnica y las respectivas normas o estándares internacionales empleados para realizar el análisis.

Cuadro 55: Estándares internacionales para evaluar propiedades de los productos de Pirólisis

property	typical range	applicable test methods
higher heating value, HHV	14–19 MJ/kg	DIN51900, ASTM D240
lower heating value, LHV	13–18 MJ/kg	DIN51900, ASTM D240, ASTM D5291 for H
water	20–30 wt %	ASTM E203
pH	2–3	ASTM E70
TAN	70–100 mg KOH/g	ASTM D664
kinematic viscosity at 40 °C	15–40 mm ² /s	EN ISO 3104, ASTM D445
density at 15 °C	1.11–1.30 kg/dm ³	EN ISO 12185, ASTM D4052
pour point	–9.–36 °C	EN ISO 3016, ASTM D97
carbon	50–60 wt % (d.b.)	ASTM D5291
hydrogen	7–8 wt % (d.b.)	ASTM D5291
nitrogen	<0.5 wt % (d.b.)	ASTM D5291
sulfur	<0.05 wt % (d.b.)	EN ISO 20846, ASTM D 5453
oxygen	35–40 wt % (d.b.)	as difference
solids	<1 wt %	ASTM D7579
MCR, CCR	17–23 wt %	ASTM D4530, ASTM D189
ash	<0.3 wt %	EN ISO 6245
flash point	40–110 °C	EN ISO 2719, ASTM D93B
sustained combustibility	does not sustain combustion	EN ISO 9038
Na, K, Ca, Mg	<0.06 wt % (d.b.)	EN ISO 16476
chlorine	<75 ppm	not specified

Fuente: (Oasmaa et al., 2015)

Anexo 2 Métodos Experimentales complementarios

1. Pirólisis a Escala laboratorio

Equipo y materiales requeridos

1 balanza semi-analítica Ohaus, modelo Value 300 Xtreme, con un rango de 0 a 2000 g e incertidumbre de ± 0.1 g.

1 reactor de pirólisis de 100 g de lecho fijo

1 horno mufla Thermo Scientific, Thermolyne, modelo F6010, con un rango de temperatura de 25 a 1200 °C.

1 sistema de condensación de vidrio.

1 bomba de agua de pesera de 120 W.

1 sistema de chimenea de acero inoxidable 304 del reactor de pirólisis.

2 pedazos de cañuela de 15 cm de largo y 10 cm de diámetro.

1 espátula de metal

1 sistema de soporte (soporte y pinzas)

1 beaker de 500 mL.

1 beaker de 250 mL

1 cubera plástica con capacidad de 20 L.

2 mangueras plásticas

4 frascos de vidrio

50 mL de n-hexano con 96% de pureza, marca Merck.

50 mL de acetona 99.3% de pureza.

Preparación de la muestra

- Con la balanza semi-analítica y el beaker de 500 mL medir la masa de materia prima del proceso de pirólisis.
- Abrir el reactor de pirólisis removiendo la tapa del mismo.
- Alimentar el reactor con el polietileno de alta densidad con ayuda de la espátula de metal y cerrar el reactor colocando la unión de grafito.
- No sobre cargar el reactor, de manera que se evite la salida de materia prima por la chimenea.
- Tarar los 4 frascos de vidrio, que se utilizarán para almacenar el producto, determinar su masa y hacer el balance de másico y energético del proceso.

Montaje del sistema de pirólisis

- Utilizar el horno mufla, el cuál es la fuente de energía del sistema de pirólisis y el sistema de condensación.
- Introducir el reactor cargado con la materia prima en el horno mufla.
- Colocar el sistema de chimenea del reactor, colocándolo a través del agujero ubicado en la parte superior de la mufla y roscando el mismo con el reactor.
- Colocar los aislantes de cañuela en la parte superior del mismo, para evitar que se solidifique el reflujo tapando el sistema de chimenea.
- Montar el sistema de condensación para los gases de chimenea.
- Utilizando el soporte y las pinzas, colocar con cuidado el contenedor de vidrio.
- Llenar de agua la cubeta plástica y sumergir la bomba de agua de pecera.
- Unir la bomba de agua de pecera con el contenedor de vidrio con la manguera plástica y utilizar la otra para dirigir lo que sale del condensador de regreso a la cubera. Asegurar las mangueras en un arreglo a contracorriente con respecto a los gases de chimenea.
- A la salida del condensador colocar el beaker de 250 mL para recuperar los productos condensados.

- Unir el extremo de la salida de chimenea con el sistema de pirólisis para condensar los gases provenientes del mismo.

Corrida de pirólisis

- Iniciar la corrida conectando la bomba de agua de pecera a la corriente para comenzar a circular el agua de enfriamiento del condensador.
- Medir la temperatura del agua de enfriamiento con el termómetro láser.
- Encender la mufla presionando el botón de encendido ubicado en el panel de control.
- Colocar una temperatura inicial desde el panel de control de 110 °C.
- Una vez la mufla haya alcanzado esa temperatura, aumentar la temperatura del horno a una tasa definida por el usuario.
- Medir la temperatura en la chimenea a la salida de la mufla y a la entrada del condensador con el termómetro láser.
- Recuperar los productos a medida que vaya aumentando la temperatura, procurar separar el agua del combustible (el agua es lo primero en evaporarse en este sistema).
- Una vez que no se pueda recuperar producto del condensador, apagar la mufla, apagar la bomba de agua de pecera para detener la condensación y recuperar el producto líquido correspondiente a la fracción pesada en los frascos de vidrio.
- Luego de recuperar el producto líquido, se debe desmontar el sistema de condensación, descargando el agua del condensador en la cubeta y lavando con agua y acetona el condensador para remover los remanentes del producto en el sistema.
- De manera de evitar dañar el sistema, se debe de armar el reactor dentro de la mufla con la chimenea puesta y descargar hasta el siguiente día de manera que su temperatura se regule.

Recuperación y cuantificación de los productos

- Se utiliza la tara realizada de los recipientes para determinar la masa de cada uno de los productos.
- En el caso de los productos líquidos se debe hacer por diferencia la determinación de la masa recolectada.
- En el caso del producto sólido se debe abrir el reactor y con ayuda de una espátula de metal remover el producto de pirólisis del reactor recolectarlo en un frasco de vidrio.
- Una vez recolectado, se mide la masa del mismo, para cuantificar la cantidad de producto sólido y realizar el balance de masa.
- Este proceso se debe hacer en quintuplicado, para poder hacer un análisis Q dado el caso haya datos dudosos en la serie recolectada.

2. Generación de modelos cinéticos

- Una vez hecho el procedimiento de pirólisis se debe de determinar los datos que se pueden utilizar para el diseño del modelo energético y el modelo cinético que describa el reactor.
- Se debe de plantear un sistema de ecuaciones diferenciales que describan el comportamiento del polietileno de alta densidad dentro del reactor, de manera que se pueda posteriormente acomodar a un reactor en “batch” y un reactor continuo.
- Desarrollar un método gráfico de interpretación de los datos de manera que se pueda describir la información obtenida del reactor.
- Para el análisis de temperatura se realizó la ecuación de Boltzmann modificada para hornos mufla.
- Posteriormente se debe ajustar los datos obtenidos de la temperatura en función del tiempo.
- Una vez se tengan ajustados los datos, se debe hacer un análisis de masa contra tiempo a partir de la constante descomposición de Arrhenius y la velocidad de reacción.

- Una vez planteado el modelo para llevar a cabo el proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad se procede a ajustar el modelo a los datos experimentales, determinando los parámetros cinéticos para cada gradiente de temperatura.

3. Análisis de poder calorífico

- Se debe de preparar el calorímetro IKA 200C de manera que se pueda empezar a evaluar.
- Pesar 0.1g de Ácido Benzoico para calibrar el sistema.
- Llevar a cabo el proceso y determinar el poder calorífico del ácido benzoico, comparándolo con el valor teórico.
- Una vez calibrado, se procede a pesar 0.1g de líquido combustible obtenido, el cual se prepara e ingresa al calorímetro.
- Se obtiene el poder calorífico.

4. Análisis de Combustibles

- Para el análisis cromatográfico del producto líquido, se analizó por separado la fracción ligera de la fracción pesada.
- Para la fracción ligera se realizó una filtración utilizando telas para recuperar inicialmente la fracción pesada y tomar unas muestras de la misma.
- Luego de la filtración con telas se realizó una filtración al vacío para terminar la filtración de la fracción ligera y finalmente se introdujeron en viales con la ayuda de jeringas de plástico y microfiltros.
- Para la fracción pesada, se midió la masa inicial de producto y se diluyó en 10 mL de cloroformo (haciendo una dilución de 0.25 g de muestra en 5 mL de cloroformo).
- Luego de diluir el producto de la fracción pesada se introdujo en viales con la ayuda de jeringas de plástico y microfiltros.
- Una vez se tuvo las muestras en viales, separando las muestras de la fracción ligera de la fracción pesada se corrieron el cromatógrafo de gases.

- Para la fracción ligera se utilizó una columna HP5 calentando a 60°C durante 2 minutos, luego calentando a una tasa de 3°C/min hasta 250°C por 5 minutos utilizando un flujo de 1 mL/min.
- Para la fracción pesada se utilizó una columna DB-Wax bajo las mismas condiciones de operaciones que con la columna HP5.
- Posteriormente se analizó los cromatogramas obtenidos para ambas fracciones con el cromatograma y el informe proporcionado por el equipo.
- Por otra parte, para la fracción pesada se realizó un análisis de los compuestos obtenidos en el informe, depurando ciertos compuestos y comparando con la base de datos del software ChemStation y con datos de la literatura para seleccionar compuestos que sean más acordes al proceso y la materia prima utilizada.
- Finalmente, para la fracción pesada se realizó un análisis del porcentaje de abundancia de cada compuesto sin tomar en cuenta el solvente para determinar la fracción de cada uno en la muestra.
- Se realizó el análisis de la fracción ligera en triplicado y el análisis de la fracción pesada en duplicado.

Anexo 3 Datos de Evaluación de Fuentes

3.1 Evaluación de Fuentes de Propiedades de residuos sólidos

A continuación se muestran los cuadros de las evaluaciones de fuentes referenciales realizadas para las propiedades de residuos sólidos:

Cuadro 56: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos de Papel y Cartón

Fuente	Confianza	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Bajpai (2024)	5	4	4	4	5	4	4.33	Datos relevantes para el estudio, pero no de todas las composiciones buscadas.
Brown et al. (2017)	5	3	5	4	4	4	4.17	Tiene datos complementarios a otros autores, pero no totales.
Gupta et al. (2009)	5	4	5	4	5	5	4.67	Tiene información adecuada para las propiedades mecánicas de los materiales.
Kweon et al. (2024)	4	4	4	4	3	3	3.67	Tiene datos de un segmento particular de los residuos analizados. Limitaciones en metodología usada.
Pivnenko et al. (2015)	5	5	4	4	5	4	4.50	Datos importantes sobre la composición de los residuos buscados.
Ozola et al. (2019)	5	5	4	4	5	5	4.67	Composiciones e información identificada como relevante para los estudios.
Weißbach et al. (2019)	5	5	5	4	4	5	4.67	La metodología utilizada no está 100% explícita.

Fuente: Elaboración propia. Categorización de residuos de acuerdo con (MARN, 2021c).

Cuadro 57: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos Plásticos

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
--------	---------------	------------	------------	----------------------	-------------	-------------	----------	-------------

Al-Salem et al. (2009)	5	5	5	4	5	5	4.83	Contiene información importante sobre materiales plásticos. No tienen más de 3 publicaciones del tema.
Andrady (2003)	4	5	5	4	3	4	4.17	No se tiene declaración de metodologías empleadas para los valores mostrados.
Ashby et al. (2018)	5	5	5	5	4	5	4.83	La metodología está implícita por tratarse de un libro de texto, aunque si está especificada.
Geyer et al. (2017)	4	5	4	4	4	4	4.17	Tiene datos de un segmento particular de los residuos analizados. Limitaciones en declaración de la metodología usada.
Hopewell et al. (2009)	4	4	4	4	5	4	4.17	Tiene datos de algunos de los plásticos definidos a analizar en el estudio.
Pielichowski et al. (2022)	5	5	5	4	4	5	4.67	En esta fuente se tiene metodología que no está 100% explícita, pero que hace sentido con los datos reportados.
Shea (2006)	5	4	5	5	5	4	4.67	Tiene algunos datos relevantes para el estudio, pero deben ser complementados.

Fuente: Elaboración propia. Categorización de residuos de acuerdo con (MARN, 2021c).

Cuadro 58: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos de Vidrio y Metal

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Brandes (2013)	5	3	5	4	4	3	4.00	Tiene algunos datos referenciales, pero no toda la información buscada. Además, no declara explícitamente la metodología.

Furrer et al. (2010)	5	4	5	4	4	4	4.33	Tiene datos de metales y metaloides, pero no especifica todos los métodos empleados en análisis de propiedades.
McLellan (1984)	5	5	5	5	5	4	4.83	Tiene información importante, únicamente para los residuos de vidrio y su composición.
Moosbrugger et al. (2003)	5	5	5	5	5	4	4.83	Tiene información importante, únicamente para los residuos metálicos y su composición.
Tchobanoglous (2009)	5	3	5	4	4	3	4.00	Los datos son muy generales para este tipo de residuos hace falta detalle.

Fuente: Elaboración propia. Categorización de residuos de acuerdo con (MARN, 2021c).

Cuadro 59: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos Sanitarios

Fuente	Confianza	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Bangash et al. (2024)	4	3	4	4	3	3	3.50	Tiene algunos datos sobre pañales, pero con un enfoque diferente al necesario
Kanoo et al. (2023)	4	4	4	4	4	4	4.00	Tiene datos solamente sobre una de las categorías de residuos estudiada.
Khanyile et al. (2020)	4	3	4	4	3	3	3.50	No se tiene claridad de los métodos utilizados para la obtención de las propiedades buscadas.
Lambert et al. (2013)	5	5	5	4	4	5	4.67	Datos relevantes para el estudio, pero no de todas las composiciones buscadas.
Luchese et al. (2021)	5	5	5	4	4	5	4.67	La metodología queda sobreentendida aunque hace sentido con las propiedades analizadas.

Velasco et al. (2021)	4	4	4	4	3	3	3.67	Tiene datos solamente sobre una de las categorías de residuos estudiada. La metodología genera dudas sobre aspectos analíticos.
-----------------------	---	---	---	---	---	---	------	---

Fuente: Elaboración propia. Categorización de residuos de acuerdo con (MARN, 2021c).

Cuadro 60: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos Peligrosos

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Baldé et al. (2018)	5	4	4	3	4	3	3.8	Solamente tiene datos de una categoría y no se logró acceder al registro de algunos de los autores.
Daniel et al. (2012)	4	3	4	4	4	3	3.7	Tiene datos limitados y de una sola de las categorías estudiadas.
Lu et al. (2013)	5	5	5	4	4	5	4.7	Compilado completo de residuos de diferentes índoles. Algunas técnicas analíticas no se detallan apropiadamente.
Viktoryová et al. (2022)	5	4	5	4	5	4	4.5	Solamente presentan datos de una categorías de los residuos analizados.
Weiss (1997)	4	4	3	3	5	4	3.8	No fue posible encontrar datos del autor

Fuente: Elaboración propia. Categorización de residuos de acuerdo con (MARN, 2021c).

Cuadro 61: Evaluación de fuentes referenciales de los residuos varios

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Calister et al. (2020)	5	5	5	4	5	4	4.67	Tiene datos de varios de los residuos de la categorías, pero deben completarse con los de otras fuentes.

Chen et al. (2008)	5	4	5	4	4	4	4.33	La metodología no tiene claridad sobre las técnicas analíticas de algunos datos.
Cho et al. (2023)	4	3	4	4	4	3	3.67	Se tiene datos parciales con un enfoque diferente al del estudio, pero que pueden complementar los de otros autores.
Ferrerira et al. (2011)	5	4	5	4	5	4	4.50	Solamente tiene datos de una de las categorías estudiadas.
Khan et al. (2023)	4	4	5	4	3	4	4.00	Tiene datos de una sola categoría y hace falta detalles de la metodología seguida.
Nanthini et al. (2017)	4	4	4	4	5	4	4.17	Solamente tiene datos de una de las categorías estudiadas.
Santos et al. (2015)	4	4	4	4	3	4	3.83	Solo tiene datos de una categoría y tiene metodología con detalle limitado.
Yalcin-Enis et al. (2019)	5	4	4	4	4	4	4.17	Solamente tiene datos de una de las categorías estudiadas.
Panshin et al. (1981)	4	4	4	3	4	3	3.67	La información es de un solo residuo y de hace más de 40 años de publicación.

Fuente: Elaboración propia. Categorización de residuos de acuerdo con (MARN, 2021c).

3.2 Evaluación de Fuentes de proporciones y Propiedades de productos obtenidos con la reacción de pirólisis

A continuación se muestran los cuadros de las evaluaciones de fuentes referenciales realizadas para las proporciones y Propiedades de productos obtenidos con la reacción de pirólisis:

Cuadro 62: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos de papel y cartón

Fuente	Confianza	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Demirbas (2009)	5	5	5	5	5	5	5.00	Es una fuente recomendada por la trayectoria del autor
Demirbas (2007)	5	4	5	5	5	4	4.67	La información presentada no tiene todas las propiedades buscadas, pero se complementa con otras fuentes del mismo autor
Gani et al. (2007)	4	4	4	4	3	3	3.67	Tiene limitaciones en los tipos de residuos considerados y las propiedades analizadas.
Rosenfeld et al. (2011)	5	4	4	4	4	4	4.17	La metodología descrita no tiene todos los análisis técnicos detallados.
Zhou et al. (2013)	5	3	4	4	4	3	3.83	Los datos son de un tipo muy específico de los residuos estudiados, aunque pueden funcionar de forma complementaria.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 63: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos plásticos

Fuente	Confianza	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Al-Salem et al. (2017)	5	4	5	4	5	4	4.50	Posee análisis de algunas de las categorías de residuos especificadas en el estudio.
Charitopolou et al. (2023)	5	5	4	4	5	4	4.50	Es una fuente recomendada por lo actual de la información presentada y la reputación de los autores.
Demirbas (2004)	5	5	5	5	5	5	5.00	Es una fuente recomendada por la trayectoria del autor

Dimitri et al. (2014)	4	4	5	4	4	3	4.00	Tiene información necesaria de algunos tipos de residuos. Existe información técnica que se coloca de manera implícita.
Miskolczi (2004)	4	4	4	3	4	3	3.67	No se encontraron para el autor, referencias claras de su desarrollo profesional y correlación con entidades académicas.
Panda et al. (2020)	5	5	5	4	5	5	4.83	Información útil pero enfocada en algunos tipos de residuos.
Williams et al. (2007)	4	4	4	4	3	4	3.83	Limitantes en la descripción metodológica de las técnicas analíticas utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 64: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos Sanitarios y peligrosos

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Callegari et al. (2018)	4	4	4	4	5	4	4.17	Datos relevantes para el estudio, pero no de todas las composiciones buscadas.
Demirbas (2007)	5	4	5	5	5	4	4.67	La información presentada no tiene todas las propiedades buscadas, pero se complementa con otras fuentes del mismo autor
Demirbas (2009)	5	5	5	5	5	5	5.00	Es una fuente recomendada por la trayectoria del autor
Gholizadeh et al. (2020)	5	4	4	4	5	4	4.33	Tiene datos de algunas categorías de residuos únicamente.
Kumar et al. (2023)	4	3	3	4	4	3	3.50	No se encontró información sobre la afiliación de todos los autores.

Samolada et al. (2014)	5	4	4	4	4	4	4.17	Limitantes en el detalle técnico de la metodología presentada.
Williams et al. (2007)	4	4	4	4	3	4	3.83	Limitantes en la descripción metodológica de las técnicas analíticas utilizadas.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 65: Evaluación de fuentes referenciales de los productos de pirólisis de residuos

Varios

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Bañon et al. (2016)	5	4	5	5	5	4	4.67	Tiene información solamente de una categoría de residuos.
Conesa et al. (2009)	5	5	5	5	5	5	5.00	Tiene datos solamente de algunas de las categorías necesarias.
Demirbas (2009)	5	5	5	5	5	5	5.00	Es una fuente recomendada por la trayectoria del autor, sin embargo no tiene los datos de todas las categorías buscadas en esta sección de residuos.
Demirbas (2007)	5	4	5	5	5	4	4.67	La información presentada no tiene todas las propiedades buscadas, pero se complementa con otras fuentes del mismo autor
Kluska et al. (2019)	4	4	4	3	4	3	3.67	No se encontraron referencias académicas de todos los autores.
Tripathi et al. (2016)	4	4	4	4	3	3	3.67	Presenta limitantes de la metodología respecto del detalle técnico presentado.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Evaluación de Fuentes referenciales de modelos cinéticos de la reacción de pirólisis

A continuación se muestran los cuadros de las evaluaciones de fuentes referenciales modelos cinéticos de la reacción de pirólisis:

Cuadro 66: Evaluación de fuentes referenciales de modelos cinéticos de pirólisis de residuos alimenticios, de jardinería, papel y cartón

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Alvarado et al. (2022)	5	5	5	5	4	4	4.67	Datos cinéticos de algunos de los residuos estudiados
Amutio et al. (2012)	4	5	4	4	4	4	4.17	Limitantes en el detalle técnico de la metodología presentada.
Bovee (2014)	5	5	5	4	5	4	4.67	Datos cinéticos de solamente un residuo estudiado
Gai et al. (2013)	5	5	5	5	5	4	4.83	Datos relevantes para el estudio, pero solamente de algunos de los tipos de residuos.
Ounas et al. (2011)	5	5	5	5	5	4	4.83	Datos cinéticos de algunos de los residuos estudiados
Ranzi et al. (2008)	4	5	4	4	4	4	4.17	Datos cinéticos de algunos de los residuos estudiados
White et al. (2011)	5	5	5	5	4	4	4.67	Limitantes en el detalle técnico de la metodología presentada.
Yang et al. (2007)	5	5	5	4	4	4	4.50	Limitantes en el detalle técnico de la metodología presentada.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 67: Evaluación de fuentes referenciales de modelos cinéticos de pirólisis de residuos plásticos

Fuente	Confiabilidad	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
--------	---------------	------------	------------	----------------------	-------------	-------------	----------	-------------

Bungay (2017)	5	5	4	4	5	4	4.50	Presenta datos relevantes para el estudio, pero solo de algunos tipos de residuos
Encinar et al. (2008)	5	5	5	4	5	4	4.67	Solamente presenta datos de uno de los residuos estudiado
Kaminsky (2010)	4	4	4	4	3	3	3.67	Limitantes en el detalle técnico de la metodología presentada.
Lefebvre et al. (2005)	5	5	5	4	5	4	4.67	Presenta datos relevantes para el estudio, pero solo de algunos tipos de residuos
Lyon (1998)	4	5	5	4	5	4	4.50	Presenta datos relevantes para el estudio, pero solo de algunos tipos de residuos
Morteza eikia et al. (2021)	5	5	4	4	5	4	4.50	Presenta datos relevantes para el estudio, pero solo de algunos tipos de residuos
Park et al. (2000)	4	4	4	4	3	3	3.67	Limitantes en el detalle técnico de la metodología presentada.
Westerhout et al. (1997)	5	5	4	4	5	4	4.50	Solamente presenta datos de uno de los residuos estudiado
Zhao et al. (2020)	5	5	5	5	5	4	4.83	Solamente presenta datos de uno de los residuos estudiado

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 68: Evaluación de fuentes referenciales de modelos cinéticos de pirólisis de residuos varios

Fuente	Confianza	Relevancia	Reputación	Autoridad de Autores	Metodología	Pertinencia	Promedio	Comentarios
Choi et al. (2018)	5	5	5	4	5	4	4.67	Datos adecuados para algunos tipos de residuos del estudio.
Liu et al. (2018)	5	4	5	4	5	4	4.50	Solamente presenta datos de uno de los residuos estudiado

Márquez et al. (2023)	4	4	4	4	4	4	4.00	Limitantes en las afiliaciones de algunos de los autores.
Miranda et al. (2013)	5	4	4	4	5	4	4.33	Solamente presenta datos de uno de los residuos estudiado
Mishra et al. (2015)	5	3	4	4	4	4	4.00	Solamente presenta datos de una subcategoría de los residuos estudiado
Reina et al. (1998)	4	4	4	4	3	3	3.67	Limitantes en el detalle técnico de la metodología presentada.
Wang et al. (2016)	5	5	4	4	4	4	4.33	Presenta datos relevantes para el estudio, pero solo de algunos tipos de residuos
Xie et al. (2013)	5	5	5	4	5	4	4.67	Presenta datos relevantes para el estudio, pero solo de algunos tipos de residuos

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4 Datos de Propiedades y parámetros cinéticos

4.1 Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas por clasificación de residuos sólidos

A continuación se muestran los cuadros de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los diferentes tipos de residuos sólidos:

Cuadro 69: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos de papel y cartón

Tipo de Propiedad	Propiedad	Rango/Valores Típicos de Papel	Rango/Valores Típicos de Cartón
Propiedades Físicas	Densidad	0.5–1.2 g/cm ³	0.5–0.8 g/cm ³
	Porosidad	40–70%	40–70%
	Contenido de Humedad	5–20%	5–20%
	Tamaño de Partícula	50–500 µm	50–500 µm
Propiedades Químicas	pH	6–8	4.5–6.5
	Contenido de Carbono	40–50%	40–50%
	Contenido de Nitrógeno	0.1–0.5%	0.1–0.5%
	Metales	0.5–5%	0.5–5%
	- Calcio (Ca)	1–3%	1–3%
	- Silicio (Si)	0.1–0.5%	0.1–0.5%
	- Aluminio (Al)	0.1–0.5%	0.1–0.5%
Propiedades Mecánicas	Resistencia a la Tracción	1–10 MPa	2–14 MPa
	Resistencia a la Compresión	5–15 MPa	0.5–2 MPa
	Módulo de Elasticidad	0.1–0.5 GPa	0.1–0.4 GPa
	Dureza	2–4 Mohs	2–5 Mohs

Fuente: Gupta et al. (2009), Ozola et al. (2019) y Weißenbach et al. (2019).

Comparativamente, los residuos de papel y cartón muestran propiedades de mayor estabilidad mecánica, asociadas a su comportamiento sólido y rangos de otras propiedades que los hacen poderse procesar con técnicas propias al manejo de materiales sólidos. Contrasta el bajo contenido de nitrógeno en comparación con otros materiales, que se genera a partir de la naturaleza de las moléculas constituyentes de la celulosa.

Cuadro 70: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos de plástico

Propiedad	HDPE	LDPE	PP	PET	PVC	Poliuretano	Poliestireno
Densidad [g/cm ³]	0.94–0.96	0.91–0.93	0.90–0.92	1.30–1.38	1.16–1.35	1.00–1.20	1.04–1.06
Temperatura de fusión [°C]	130–137	105–115	160–170	245–265	No aplica	No aplica	No aplica
Resistencia a la tracción [MPa]	25–40	10–20	30–40	50–70	40–50	20–60	30–50
Resistencia al impacto [J/m]	100–200	150–250	50–100	30–50	3–5	100–300	10–30
Rigidez dieléctrica [kV/mm]	20–25	20–30	25–30	15–20	10–15	10–20	20–25
Módulo elástico [MPa]	800–1200	200–500	1200–1800	2500–3000	3000–3500	10–100	2000–3000
Absorción de agua [%]	<0.01	<0.01	<0.01	0.1–0.5	0.2–0.4	0.5–1.5	<0.01
Dureza (Shore D)	60–70	40–50	60–70	70–80	80–90	40–60	70–80

Fuente: Al-Salem et al. (2009), Ashby et al. (2018), Pielichowski et al. (2022) y Shea (2006).

En el caso de los residuos plásticos, contrasta su alta resistencia mecánica y baja densidad en comparación con otros materiales, lo que le confiere propiedades distintivas, pero necesidades específicas de molienda para poder ser procesados. Su baja capacidad comparativa de absorción de agua es una propiedad importante que contrasta con otros materiales.

Cuadro 71: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos de vidrio y metal

Propiedad	Vidrio	Aluminio	Acero	Cobre	Latón	Estaño
Densidad [g/cm ³]	2.4–2.8	2.7	7.8	8.9	8.4–8.7	7.3
Temperatura de fusión [°C]	1400–1550	660	1370–1510	1083	900–1000	232
Módulo elástico [GPa]	60–90	69	190–210	110–130	100–115	50–55

Resistencia a la tracción [MPa]	30–50	90–120	400–800	200–400	200–500	15–20
Dureza (Mohs)	5.5–7	2.5–3	4–4.5	3	3–4	1.5
Conductividad térmica [W/m·K]	0.8–1.2	205	50–60	390	100–150	67
Resistencia al impacto [kJ/m ²]	Muy baja	Media	Alta	Alta	Alta	Baja
Coefficiente de expansión térmica [1/°C]	$8-12 \times 10^{-6}$	23×10^{-6}	$11-13 \times 10^{-6}$	$16-17 \times 10^{-6}$	$18-20 \times 10^{-6}$	$22-23 \times 10^{-6}$

Fuente: McLellan (1984) y Moosbrugger et al. (2003).

En los residuos de vidrio y metal llama la atención las altas resistencias mecánicas, acompañadas de altas densidades, que comparativamente le proporcionan una alta complejidad para transportarse y procesarse. Este es otro factor que le confiere a estos residuos un bajo potencial para tratarse con la técnica de pirólisis.

Cuadro 72: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos sanitarios

Propiedad	Residuos de Papel Higiénico	Residuos de Pañales
Densidad [g/cm ³]	0.8–1.2	0.6–0.8
Capacidad de absorción [g agua/g material]	3–5	8–15
Resistencia a la tracción [MPa]	0.5–1.5	1–3
Elongación antes de la rotura [%]	10–20	20–50
Rigidez [N/m]	1–5	5–10
Permeabilidad al agua [mm/s]	Alta	Media
Desintegración en agua [%]	70–90	<10
Módulo elástico [MPa]	5–10	10–20

Fuente: Lambert et al. (2013) y Luchese et al. (2021).

En el caso de los residuos sanitarios se observan propiedades parecidas a los residuos de papel y cartón, sin embargo, contrasta la variable capacidad de desintegración en agua, lo que hace sensible el proceso de tratamiento al almacenamiento del residuo de esta categoría.

Cuadro 73: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos varios estudiados

Propiedad	Residuos de Cerámica	Residuos de Madera	Residuos de Hule	Residuos de Cuero	Residuos de Algodón	Residuos de Fibras
Densidad [g/cm ³]	2.3–2.6	0.3–0.9	1.1–1.2	0.8–1.0	1.5–1.6	1.2–1.5
Resistencia a la compresión [MPa]	100–250	30–50	5–20	15–30	2–4	5–10
Resistencia a la tracción [MPa]	5–15	80–120	2–10	5–25	30–50	50–100
Dureza (Mohs)	6–7	2–3	0.5–1	2–3	1–2	2–3
Rigidez [N/m]	Alta	Baja-Media	Media	Media	Baja	Media
Absorción de agua [%]	<1	5–10	1–3	10–15	15–20	10–15
Elasticidad [GPa]	40–70	10–15	0.1–0.5	0.5–1	0.01–0.05	1–5
Degradabilidad ambiental	Baja	Alta	Media	Media	Alta	Alta

Fuente: Calister et al. (2020), Chen et al. (2008) y Ferrerira et al. (2011).

De forma análoga a lo sucedido con la composición elemental, las propiedades de los residuos “varios” presentan una dependencia del tipo de residuo que se considere, existiendo algunos con propiedades más parecidas a los de los residuos de vidrio y otros llegando a propiedades de los residuos plásticos.

Cuadro 74: Propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas de los residuos peligrosos estudiados

Propiedad	Residuos de Baterías	Residuos de Aceites	Residuos de Lámparas	Residuos de Recubrimientos
Densidad [g/cm ³]	2.0–2.5	0.8–0.9	1.5–2.0	1.2–1.5
Resistencia a la compresión [MPa]	10–20	N/A	5–10	10–15
Resistencia a la tracción [MPa]	1–5	N/A	1–2	5–10
Elasticidad [GPa]	0.1–0.5	N/A	0.2–0.5	0.5–1.0
Viscosidad [cP]	N/A	50–300	N/A	500–1,000
Permeabilidad	Baja	N/A	Baja	Media
Conductividad eléctrica [S/m]	Alta	Baja	Baja	Media
Capacidad de absorción de impactos	Alta	Baja	Media	Media

Fuente: Lu et al. (2013) y Viktorová et al. (2022).

Los residuos peligrosos presentan una alta variabilidad de propiedades propias de los tipos de residuos que la categoría abarca y que tienden a potencialmente funcionar como medio para poder separarlos y subclasificarlos. Estos inducen la necesidad de diferencias en almacenamiento y tratamiento previo a la reacción de pirólisis.

4.2 Parámetros cinéticos determinados por clasificación de residuos sólidos

A continuación se muestran los cuadros de los parámetros cinéticos de los diferentes tipos de residuos sólidos:

Cuadro 75: Parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis de residuos plásticos

Residuo	Parámetros cinéticos		
	Factor de Frecuencia [A] (s ⁻¹)	Energía de Activación (kJ/mol)	Orden de Reacción
HDPE	3.10E+16	230	1
LDPE	2.80E+16	220	1.2
PP	2.50E+16	250	1.1
PET	1.50E+06	190	1.3
PVC	1.20E+06	180	1
Poliuretano	5.00E+05	160	1.4
Poliestireno	3.00E+15	240	1.1

Fuente: Bungay (2017), Encinar et al. (2008), Lefebvre et al. (2005), Lyon (1998) y Zhao et al. (2020).

Los parámetros cinéticos de la mayoría de los residuos plásticos contrastan factores de frecuencia de varios ordenes de magnitud mayores a los de otros tipos de residuos y energía de activación inferiores pero por una diferencia menos contrastante, por lo que

en definitiva la velocidad de reacción de estos residuos presenta las velocidades más altas de todos los encontrados en la literatura.

Cuadro 76: Parámetros cinéticos de la reacción de pirólisis de residuos varios

Residuo	Parámetros cinéticos		
	Factor de Frecuencia [A] (s ⁻¹)	Energía de Activación (kJ/mol)	Orden de Reacción
Papel higiénico	5.10E+04	120	1.1
Pañales	1.80E+05	140	1
Baterías	7.20E+03	180	1.5
Aceites	4.60E+04	90	0.8
Lámparas	3.30E+03	150	0
Madera recubierta	1.50E+04	110	1.2
Hule	2.20E+04	160	0.9
Cuero	1.00E+05	130	1.3
Algodón	6.80E+03	95	0.7
Fibras textiles	4.00E+04	120	1

Fuente: Choi et al. (2018), Liu et al. (2018), Miranda et al. (2013), Wang et al. (2016) y Xie et al. (2013).

Análogo a los residuos de jardín y alimenticios, los parámetros cinéticos de los residuos varios, presentan una tendencia a valores de factor de frecuencia y energía de activación menores a los de los plásticos. Esto provoca la ya mencionada dependencia de la velocidad de reacción con la temperatura.

Anexo 5 Fotografías y código de los modelos empleados

1. Fotografías

Figura 51: Trituradora de residuos orgánicos utilizada para la molienda de la materia prima



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 52: Molino de discos utilizado para la molienda de la materia prima



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 53: Cáscara de aguacate luego del proceso de molienda



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 54: Sistema de pirólisis del reactor de 100 g



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 55: Reactor de pirólisis de 100 g



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 56: Medición de la masa de la materia prima para el reactor de pirólisis de 100g



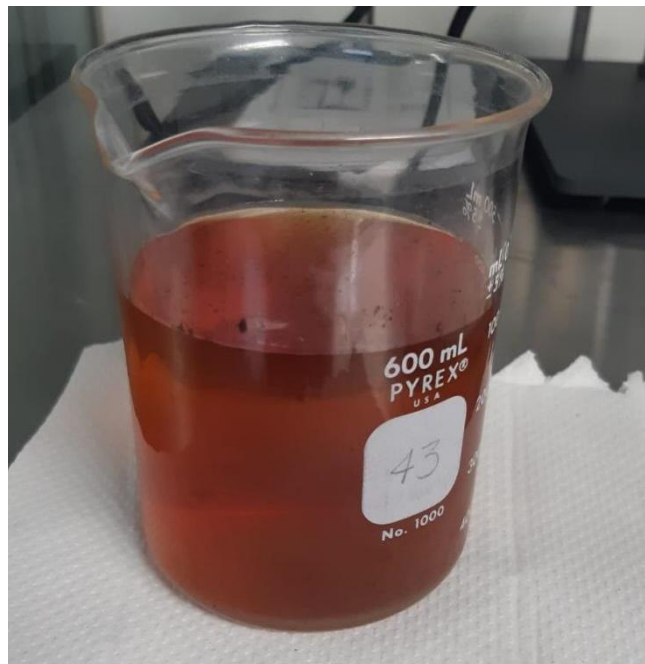
Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 57: Producto sólido del proceso de pirólisis



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 58: Producto líquido del proceso de pirólisis de HDPE a escala laboratorio



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 59: Sistema de crisoles utilizados para el análisis proximal de materiales



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 60: Sistema de digestión de Kjeldahl para el análisis del producto sólido



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 61: Sistema de destilación de Kjeldahl para el análisis del producto sólido



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala

2. Códigos de los modelos utilizados

Código de la cinética promedio del proceso de pirólisis de polietileno de alta densidad (HDPE) con el gradiente de temperatura de 5°C cada 30 minutos para utilizarlo en el software Berkeley-Madonna.

METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 450

DT = 0.02

$rw = (K_{on} * (HDPE - W_f)^z)$

$K_{on} = X * \exp(-E_a / (R * Temperatura))$

$X = 6.7779E20$

$E_a = 189007.99871$

$R = 8.314$

$W_f = 1.2$

$z = 1.52944$

$R1 = ((T2 - T1) * \exp((t_a - TIME)/a)) / (a * (1 + \exp((t_a - TIME)/a)))$

$R2 = ((T3 - T2) * \exp((t_b - TIME)/b)) / (b * (1 + \exp((t_b - TIME)/b)))$

$R3 = ((T4 - T3) * \exp((t_c - TIME)/c)) / (c * (1 + \exp((t_c - TIME)/c)))$

$R4 = ((T5 - T4) * \exp((t_d - TIME)/d)) / (d * (1 + \exp((t_d - TIME)/d)))$

$$R5 = ((T6-T5)*\exp((te-TIME)/e))/(e*(1+\exp((te-TIME)/e)))$$

$$R6 = ((T7-T6)*\exp((tf-TIME)/f))/(f*(1+\exp((tf-TIME)/f)))$$

$$R7 = ((T8-T7)*\exp((tg-TIME)/g))/(g*(1+\exp((tg-TIME)/g)))$$

$$R8 = ((T9-T8)*\exp((th-TIME)/h))/(h*(1+\exp((th-TIME)/h)))$$

$$R9 = ((T10-T9)*\exp((ti-TIME)/i))/(i*(1+\exp((ti-TIME)/i)))$$

$$R10 = ((T11-T10)*\exp((tj-TIME)/j))/(j*(1+\exp((tj-TIME)/j)))$$

$$R11 = ((T12-T11)*\exp((tk-TIME)/k))/(k*(1+\exp((tk-TIME)/k)))$$

$$R12 = ((T13-T12)*\exp((tl-TIME)/l))/(l*(1+\exp((tl-TIME)/l)))$$

$$R13 = ((T14-T13)*\exp((tm-TIME)/m))/(m*(1+\exp((tm-TIME)/m)))$$

$$R14 = ((T15-T14)*\exp((tn-TIME)/n))/(n*(1+\exp((tn-TIME)/n)))$$

$$T1 = 375$$

$$T2 = 380$$

$$T3 = 385$$

$$T4 = 390$$

$$T5 = 395$$

$$T6 = 400$$

$$T7 = 405$$

$$T8 = 410$$

$$T9 = 415$$

$$T10 = 420$$

$$T11 = 425$$

$$T12 = 430$$

$$T13 = 435$$

$$T14 = 440$$

$$T15 = 445$$

$$a = 0.78$$

$$b = 1.30$$

$$c = 0.81$$

$$d = 1.47$$

$$e = 1.15$$

$$f = 0.94$$

$$g = 1.02$$

$$h = 1.51$$

$$i = 0.83$$

$$j = 0.69$$

$$k = 0.60$$

$$l = 0.87$$

$$m = 0.85$$

$$n = 0.74$$

$$t_a = 0.41$$

$$t_b = 30.73$$

$$t_c = 60.44$$

$$t_d = 90.8$$

$$t_e = 120.62$$

$$t_f = 150.52$$

$$t_g = 180.53$$

$$t_h = 210.81$$

$$t_i = 240.45$$

$$t_j = 270.37$$

$$t_k = 300.33$$

$$t_l = 330.47$$

$$t_m = 360.47$$

$$t_n = 390.41$$

$$\text{init Temperatura} = 375$$

$$\text{init HDPE} = 50$$

init Combustible_Liquido = 0

init Gas = 0

init Solido = 0

d/dt(Temperatura)= if TIME <30 then R1 else if TIME <60 then R2 else if TIME <90 then R3 else if TIME < 120 then R4 else if TIME <150 then R5 else if TIME < 180 then R6 else if TIME < 210 then R7 else if TIME < 240 then R8 else if TIME < 270 then R9 else if TIME < 300 then R10 else if TIME < 330 then R11 else if TIME < 360 then R12 else if TIME < 390 then R13 else R14

d/dt(HDPE) = if time < 120 then rw = 0 else-rw

d/dt(Combustible_Liquido) = if HDPE = 50 then 0 else 0.85*rw

d/dt(Gas) = 0.12*rw

d/dt(Solido) = 0.03*rw

Código desarrollado en el programa Berkeley Madonna para generación del modelo cinético con BOPP o residuos de Aguacate

```
METHOD RK4

STARTTIME = 0

STOPTIME = 69

DT = 0.02

RXN1=A*exp(-E/(R*T))*(W-Wf)^n

A=5.783*10^16

E=57664.13

R=1.987

Wf=24.7

n=0.54

T=T1+((T2-T1)/(1+exp((V-TIME)/m)))

T1=133.6

T2=774.3

V=15.51

m=15.84

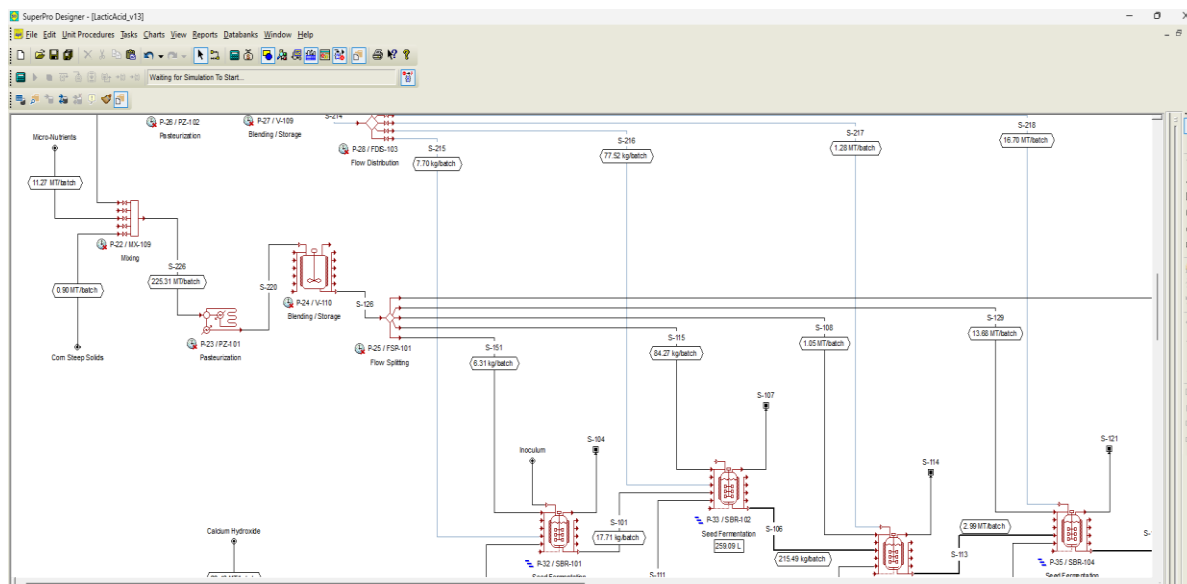
INIT W=60

INIT P=0

d/dt(P)=+RXN1

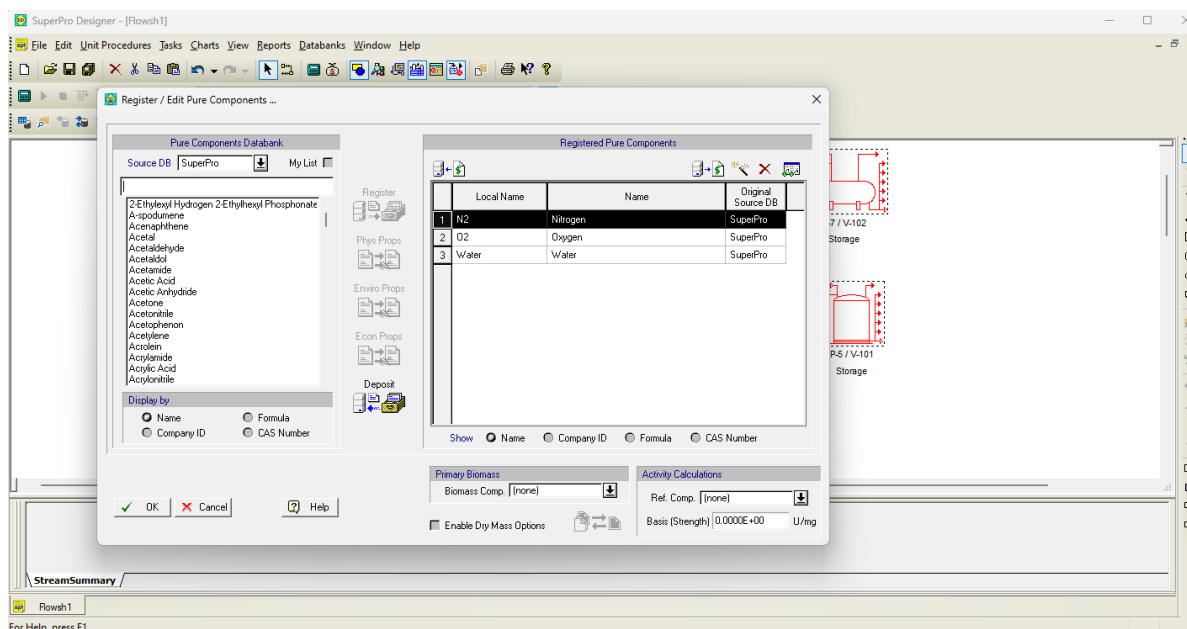
d/dt(W)=-RXN1
```

Figura 62: Pantalla Típica utilizada en SuperPro Designer® para ingresar los datos de proceso empleados en las simulaciones



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala.

Figura 63: Pantalla Típica utilizada en SuperPro Designer® para ingresar los parámetros de reactivos y productos empleados en las simulaciones



Fuente: Propia en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala.