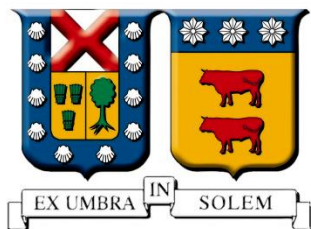


TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL  
Santiago – CHILE



“Diseño de una Herramienta de Simulación Para la  
Gasificación de Residuos Sólidos Urbanos y  
Asimilables”

RENATO ALVARADO CORTÉS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

|                        |   |                           |
|------------------------|---|---------------------------|
| PROFESOR GUÍA          | : | DANIEL RAMÍREZ LIVINGSTON |
| INGENIERO CORREFERENTE | : | RODRIGO MUÑOZ AHUMADA     |
| INGENIERO CORREFERENTE | : | RUBÉN GUTIÉRREZ GOTOR     |

DICIEMBRE – 2017

Título de la Memoria:

# **Diseño de una Herramienta de Simulación Para la Gasificación de Residuos Sólidos Urbanos y Asimilables**

Autor:

**RENATO ALVARADO CORTÉS**

**Trabajo de Memoria**, presentado en cumplimiento de los requisitos para el título de Ingeniero Civil Químico de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Daniel Ramírez Livingston

---

Rodrigo Muñoz Ahumada

---

Rubén Gutiérrez Gotor

---

Santiago, Diciembre de 2017

## **Agradecimientos**

Este trabajo fue posible gracias a las empresas Poch by WSP y Eco Hispánica. Agradezco especialmente al Jefe de Producción Sustentable Javier Aylwin por el apoyo brindado y ser el primero en haber confiado dejándome entrar a la empresa Poch by WSP, a Rodrigo Muñoz por su apoyo y guía durante este proceso, quien me ha enseñado mucho en este tiempo y a Rubén Gutiérrez quien proporcionó el tema de este proyecto y siempre estuvo dispuesto a brindar ayuda.

Finalmente agradezco a los profesores Daniel Navia por estar siempre atento y dispuesto a resolver cualquier duda que surgió durante la gestación de este proyecto y al profesor Daniel Ramírez por su apoyo durante la gestión de este proyecto.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a todos quienes me han acompañado y dejado una huella en mí dentro de este largo camino universitario, en especial a mi familia cuyo apoyo ha sido incondicional. A mis grandes amigos que me acompañaron en mi aventura universitaria Cristián M., Camilo A., Nicolás L., Luis W., Sebastián Z., Belén B., Diego C., Leandro R., Matías C., Vicky D., Catalina M., Camila V., y muchos otros que hicieron de este momento una experiencia enriquecedora y con quienes he tenido el placer de compartir algunos de los momentos más importantes de mi corta vida, sin ustedes no habría sido lo mismo.

Finalmente quisiera dedicar este trabajo a mis amigos de la vida Pablo C., Tomas C., Matías V. y otros que no se han nombrado, quienes siempre han estado ahí para brindar una mano, pasar las penas y alegrías.

***“magis laboras, ut in meliori te”***

## Resumen

En Chile se producen alrededor de 16,9 millones de toneladas de residuos sólidos al año, de las cuales 10,4 millones de toneladas corresponden a residuos de carácter industrial, mientras que las 6,5 millones de toneladas restantes corresponden residuos domiciliarios o asimilables. Tomando estos últimos Chile se ha catapultado como uno de los países con mayor índice de producción de residuos per cápita en el mundo, generando una drástica disminución de la vida útil de los actuales rellenos sanitarios y un incremento en las emergencias ocurridas en estos.

Por otro lado, la situación eléctrica a nivel nacional es un tema importante a analizar. Se estima que para el año 2050 habrá un crecimiento en el consumo de casi un 80% en 35 años. Ahora, al analizar la distribución de las fuentes generadoras de la matriz energética en Chile se aprecia que alrededor de un 20% corresponde al uso de gas natural y diésel, ambos combustibles fósiles que están agotándose.

Debido a las razones expuesta anteriormente, es que se está abriendo el paso a diversos estudios sobre alternativas tecnológicas de generación vía el uso de residuos o “*Waste to Energy*”, cuyo objetivo es disminuir los residuos a disposición final y por otra parte contribuir en la diversificación de la matriz energética, siendo materia de interés para las empresas Poch by WSP (consultora de ingeniería Chilena) y Eco Hispánica empresa Española que ha desarrollado y patentado un sistema propio para el tratamiento de Residuos Sólidos Domiciliarios y Asimilables que utiliza la gasificación como tecnología de valorización energética. Ambas empresas están patrocinando esta memoria de título. En base a lo anterior, surge la necesidad de generar una herramienta que permita realizar una evaluación de la capacidad de generación eléctrica a partir de la cantidad y caracterización de los residuos a tratar mediante gasificación.

Este trabajo de título tiene por objeto generar dicha herramienta, para lo cual se realizó una modelación del proceso de gasificación considerando como variables de ingreso el flujo y la caracterización de los residuos, además de datos físicos del gasificador a utilizar, para luego generar un código utilizando la sinergia entre los software Matlab y Excel para elaborar el software de cálculo. Dicha herramienta informa al usuario la caracterización del gas de síntesis generado por el proceso de gasificación y la potencia. La caracterización presenta

errores inferiores a un 15% al validar utilizando *chips* de madera de pino como biomasa, con excepción del gas metano, en cuyo caso se han presentado errores del orden un 37%. Para la potencia o capacidad de generar energía eléctrica, en tanto, ésta presenta un error de aproximadamente un 12,2%, sobreestimando la generación.

Si bien esta herramienta no ha podido ser validada con datos de gasificación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables, este tipo de modelos se pueden adaptar a diversos tipos de biomasa al conocer su composición química. Se espera, por ende, que los errores respecto de la composición del gas y potencia obtenidos de manera experimental no diverjan mucho de los ya informados. Esta hipótesis requiere de tal validación.

Finalmente, respecto del objetivo principal propuesto para la presente memoria de tesis, que considera el generar un simulador computacional de gasificación de residuos sólidos urbanos y asimilables que pueda estimar la capacidad de generación de energía eléctrica, dado los resultados descritos y la flexibilidad que presenta el modelo con diversos tipos de biomasa, se puede concluir que el modelo debiese ser capaz de simular de manera correcta tanto la composición del gas de síntesis como la potencia generada, pero requiere de una validación con datos experimentales para asegurar esta afirmación.

# Índice de Contenidos

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Resumen .....                                                   | 5  |
| 1. Introducción.....                                            | 13 |
| 1.1. Situación de los Residuos en Chile.....                    | 13 |
| 1.2. Situación Energética de Chile.....                         | 16 |
| 2. Objetivos y Alcances .....                                   | 18 |
| 2.1. Objetivo General.....                                      | 18 |
| 2.2. Objetivos Específicos .....                                | 18 |
| 3. Antecedentes.....                                            | 19 |
| 3.1. Definición y Clasificación de Residuos.....                | 19 |
| 3.2. Caracterización de los RSD .....                           | 20 |
| 3.2.1. Propiedades Físicas y Químicas de los RSD .....          | 21 |
| 3.3. Disponibilidad en Chile .....                              | 24 |
| 3.3.1. Situación Actual de los RSU .....                        | 24 |
| 3.3.2. Proyección de Generación de RSD .....                    | 24 |
| 3.4. Tecnologías Disponibles de Aprovechamiento .....           | 25 |
| 3.5. Gasificación .....                                         | 28 |
| 3.5.1. Etapas del Proceso .....                                 | 28 |
| 3.5.2. Factores que Afectan la Gasificación .....               | 30 |
| 3.5.3. Ventajas y Desventajas del Proceso .....                 | 34 |
| 3.6. Tratamiento de los RSD.....                                | 35 |
| 3.6.1. Proceso de Tratamiento y Separación .....                | 35 |
| 3.6.2. Proceso de Gasificación.....                             | 40 |
| 3.6.3. Tratamiento y Acondicionamiento del Gas de Síntesis..... | 40 |
| 3.6.4. Aprovechamiento Energético .....                         | 41 |

|        |                                                                         |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6.5. | Diagrama del Proceso .....                                              | 43 |
| 4.     | Modelación Matemática para un Gasificador Downdraft .....               | 47 |
| 4.1.   | Tipos de Modelación .....                                               | 47 |
| 4.1.1. | Modelo de Equilibrio Termodinámico .....                                | 48 |
| 4.1.2. | Modelos Cinéticos .....                                                 | 49 |
| 4.2.   | Selección de Modelo.....                                                | 49 |
| 4.3.   | Modelación Matemática Gasificador Downdraft .....                       | 49 |
| 4.3.1. | Waste Cleaner.....                                                      | 50 |
| 4.3.2. | Formulación Química.....                                                | 52 |
| 4.3.3. | Modelación Zona de Secado y Pirólisis .....                             | 53 |
| 4.3.4. | Modelación Zona de Oxidación .....                                      | 56 |
| 4.3.5. | Modelación Zona de Reducción.....                                       | 59 |
| 4.3.6. | Potencia Eléctrica .....                                                | 64 |
| 4.3.7. | Aprovechamiento Energético Calor Sensible de la Corriente de Gases..... | 66 |
| 5.     | Modelación Computacional.....                                           | 67 |
| 5.1.   | Algoritmo de Resolución .....                                           | 67 |
| 5.2.   | Interfaz Excel-Matlab .....                                             | 70 |
| 6.     | Resultados de la Modelación.....                                        | 78 |
| 6.1.   | Resultados del Proceso de Secado y Pirólisis.....                       | 79 |
| 6.2.   | Resultados del Proceso de Oxidación.....                                | 79 |
| 6.3.   | Resultados del Proceso de Reducción o Gasificación .....                | 80 |
| 7.     | Análisis de los Resultados y Validación .....                           | 84 |
| 7.1.   | Validación de la Composición del Gas de Síntesis.....                   | 84 |
| 7.2.   | Perfil de Temperaturas.....                                             | 86 |
| 7.3.   | Análisis del Aprovechamiento energético del Gas .....                   | 87 |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4. Análisis de la Variación del PCI con la Composición de los Residuos..... | 88  |
| 7.5. Variación en el Porcentaje de Humedad.....                               | 89  |
| 7.6. Variación en el Flujo de Oxígeno .....                                   | 91  |
| 8. Conclusiones y Recomendaciones .....                                       | 92  |
| 9. Bibliografía.....                                                          | 95  |
| ANEXOS.....                                                                   | 99  |
| ANEXO A: Tablas y Datos Para Modelación.....                                  | 99  |
| ANEXO B: Código Matlab .....                                                  | 103 |

## Índice de Tablas

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Vida útil restante de los rellenos y vertederos de la RM [4]. .....                                                  | 15 |
| Tabla 2: Propiedades físicas de los RSD que ingresan al proceso (elaboración propia a partir de los datos en [11]). .....     | 22 |
| Tabla 3: Análisis elemental por tipo de RSD que ingresa al proceso [11]......                                                 | 23 |
| Tabla 4: Datos respecto al contenido energético y porcentaje de inertes de los RSD [11]...                                    | 24 |
| Tabla 5: Composición molar, PCS y uso del gas de síntesis obtenido bajo distintos tipos de agentes gasificantes [17]......    | 32 |
| Tabla 6: Parámetros de ingreso para la simulación (elaboración propia). .....                                                 | 78 |
| Tabla 7: Porcentajes máxicos de la biomasa utilizada para la simulación (elaboración propia). .....                           | 78 |
| Tabla 8: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de secado y pirólisis (elaboración propia)...... | 79 |
| Tabla 9: Temperatura de pirólisis resultado de la simulación (elaboración propia). .....                                      | 79 |
| Tabla 10: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de oxidación (elaboración propia)......         | 79 |
| Tabla 11: Temperatura de oxidación resultado de la simulación (elaboración propia)......                                      | 80 |
| Tabla 12: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción (elaboración propia)......         | 80 |

|                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 13: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción en base seca (elaboración propia).....                                                                | 81  |
| Tabla 14: Temperatura de oxidación resultado de la simulación (elaboración propia).....                                                                                                          | 81  |
| Tabla 15: PCI del gas de síntesis resultado de la simulación. ....                                                                                                                               | 82  |
| Tabla 16: Eficiencia de generación eléctrica de los motores de combustión interna [32] ...                                                                                                       | 82  |
| Tabla 17: Potencia obtenida de la simulación (elaboración propia).....                                                                                                                           | 82  |
| Tabla 18: Comparación entre modelos y datos experimentales para la composición molar del gas de síntesis en base seca (elaboración propia a partir de los datos en [19], [22] y modelados). .... | 85  |
| Tabla 19: Perfil de temperaturas de las zonas del gasificador obtenidas de la modelación (elaboración propia).....                                                                               | 86  |
| Tabla 20: Validación del PCI del gas de síntesis.....                                                                                                                                            | 87  |
| Tabla 21: Variación del PCI del gas con la composición de RSD. ....                                                                                                                              | 88  |
| Tabla 22: Composición del gas de síntesis en base seca a distintas humedades iniciales (elaboración propia).....                                                                                 | 89  |
| Tabla 23: Propiedades termodinámicas de los componentes de gas de síntesis [19]. ....                                                                                                            | 99  |
| Tabla 24: Correlaciones para obtener el PCS de la biomasa [25]. ....                                                                                                                             | 100 |
| Tabla 25: Reacciones de gasificación y parámetros cinéticos [26]. ....                                                                                                                           | 100 |
| Tabla 26: Propiedades termodinámicas para las reacciones de gasificación [19]. ....                                                                                                              | 101 |
| Tabla 27: Velocidad de formación de las especies gaseosas durante la gasificación [26].                                                                                                          | 102 |
| Tabla 28: PCI de las especies gaseosas que componen el gas de síntesis [27]. ....                                                                                                                | 102 |

## Índice de Gráficos

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1: Producción per cápita de residuos de los principales generadores de América Latina (elaboración propia a partir de datos en [2]). .... | 13 |
| Gráfico 2: Distribución de los residuos en Chile por región (elaboración propia a partir de los datos en [3]). ....                               | 15 |
| Gráfico 3: Caracterización de los RSD en Chile (2008) [3]. ....                                                                                   | 21 |
| Gráfico 4: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción obtenidas de la modelación (elaboración propia). .... | 80 |

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 5: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción en base seca obtenidas de la modelación (elaboración propia). ..... | 81 |
| Gráfico 6: Potencia eléctrica de las opciones presentadas (elaboración propia). .....                                                                           | 83 |
| Gráfico 7: Comparación entre modelos y datos experimentales para la composición molar del gas de síntesis (elaboración propia). .....                           | 85 |
| Gráfico 8: Cambio de potencia por variación de la humedad para el aprovechamiento por motores de combustión interna (elaboración propia). .....                 | 90 |
| Gráfico 9: Cambio de potencia por variación del ratio de oxígeno para el aprovechamiento por motores de combustión interna (elaboración propia). .....          | 91 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Porcentaje de valorización de los residuos por tipo en Chile [3]. .....                                      | 14 |
| Figura 2: Ilustración de la evolución y proyección de consumo eléctrico en Chile 2005-2050 [5]. .....                  | 16 |
| Figura 3: Evolución de la composición de la matriz energética en Chile 2005-2015 [6]. ..                               | 17 |
| Figura 4: Proyección de residuos sólidos domiciliarios (RSD) 2010-2050 [13]. .....                                     | 25 |
| Figura 5: Diagrama de formas de tecnologías para realizar "Waste to Energy" (elaboración propia). .....                | 26 |
| Figura 6: Diagrama de proceso de gasificación (elaboración propia). .....                                              | 30 |
| Figura 7: Fotografía de la transformación materia orgánica luego de pasar por el <i>Waste Cleaner</i> [30]. .....      | 36 |
| Figura 8: fotografía de la transformación de los plásticos luego de pasar por el <i>Waste Cleaner</i> [30]. .....      | 37 |
| Figura 9: Representación del funcionamiento de un Trommel [30]. .....                                                  | 38 |
| Figura 10: Representación del funcionamiento de un separador magnético. ....                                           | 38 |
| Figura 11: Representación del funcionamiento de un separador magnético. ....                                           | 39 |
| Figura 12: Representación de un separador óptico. ....                                                                 | 39 |
| Figura 13: Ilustración de la planta de gasificación propuesta por la empresa Eco Hispánica (elaboración propia). ..... | 44 |
| Figura 14: Algoritmo de resolución iterativo (elaboración propia). .....                                               | 69 |

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15: Interfaz de ingreso de datos en Excel (elaboración propia). .....                                      | 70 |
| Figura 16: Interfaz Main Matlab (elaboración propia). .....                                                       | 71 |
| Figura 17: Ubicación del botón Run en Matlab (elaboración propia). .....                                          | 71 |
| Figura 18: Cambio de locación de carpeta en Matlab (elaboración propia). .....                                    | 72 |
| Figura 19: Cambio de locación de carpeta en Matlab (elaboración propia). .....                                    | 73 |
| Figura 20: Resultados de la modelación entregados en Excel en la pestaña "Resultados" (elaboración propia). ..... | 74 |
| Figura 21: Resultados de la modelación entregados en Excel en la pestaña "Diagrama" (elaboración propia). .....   | 75 |
| Figura 22: Resultados de la modelación entregados en Excel en la pestaña "Diagrama" (elaboración propia). .....   | 76 |

# 1. Introducción

## 1.1. Situación de los Residuos en Chile

En Chile se producen alrededor de 16,9 millones de toneladas de basura al año, de los cuales 10,4 millones de toneladas corresponden a residuos de carácter industrial, mientras que los 6,5 millones de toneladas restantes corresponden a residuos municipales (en adelante residuos sólidos domiciliarios o RSD) [1]. Tomando estos últimos como referencia, se tiene que cada chileno genera aproximadamente 456 kilos de basura al año catapultando a Chile como uno de los países con mayor índice de producción de residuos per cápita en el mundo y liderando la producción de residuos per cápita en América Latina por sobre países como Brasil (383 kilos), Uruguay (376 kilos) y Argentina (341) [2].

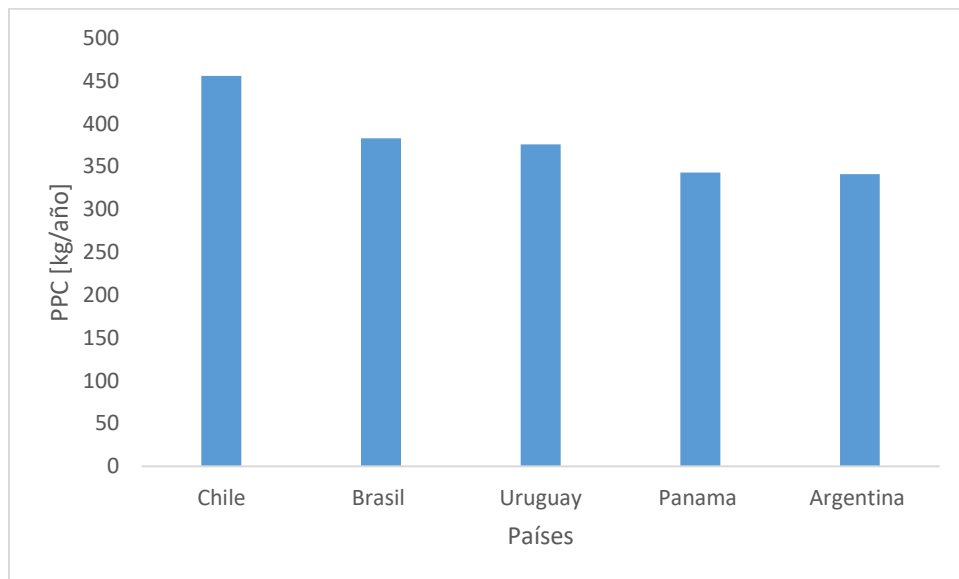


**Gráfico 1: Producción per cápita de residuos de los principales generadores de América Latina (elaboración propia a partir de datos en [2]).**

Al considerar los RSD se tiene que sólo alrededor del 10% de éstos es reciclado, mientras que el resto de los residuos terminan en rellenos sanitarios y vertederos (muchas veces ilegales o que no cumplen con las normativas vigentes). Se presenta en la figura N°1 la cantidad en toneladas generada por tipo de residuo y el porcentaje de ésta que se valoriza en el país [3]:

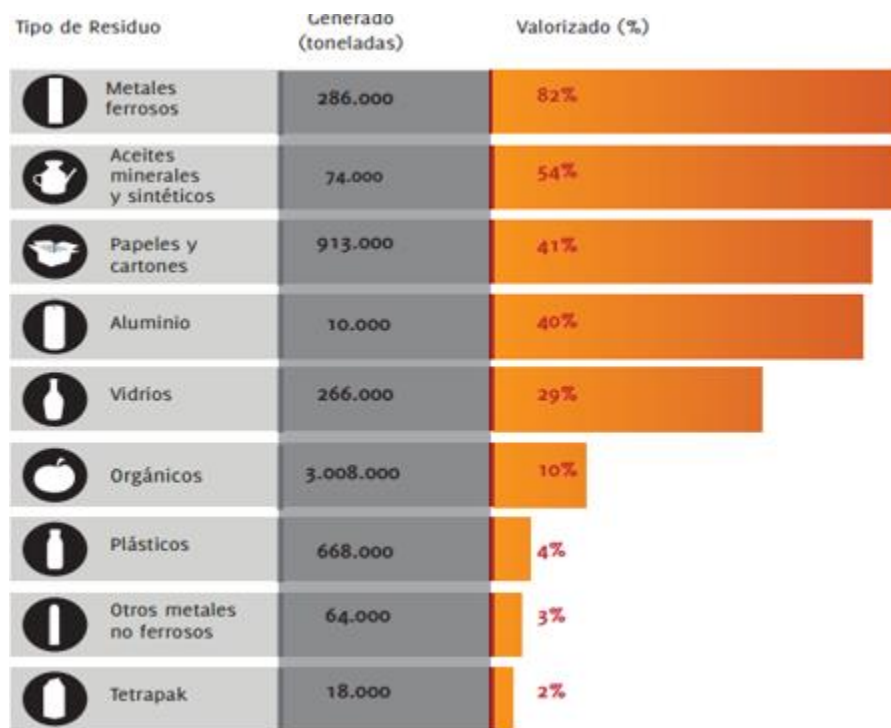


Figura 1: Porcentaje de valorización de los residuos por tipo en Chile [3].

Como se aprecia en la figura 1 sólo un 10% de la materia orgánica es valorizada siendo éste el residuo más abundante con alrededor de un 48% de la composición de los RSD. Por lo que existe un gran porcentaje de los residuos de los cuales se obtiene poco provecho y terminan apilados en los rellenos y vertederos. Pese a que desde el año 2008 se cuenta con normativas de seguridad y sanidad, han surgido nuevas problemáticas tales como la escasa disponibilidad de terrenos adecuados para disposición sobre todo en regiones más densamente pobladas y con un alto porcentaje generación de residuos como la Región Metropolitana (Ver gráfico N°2), una drástica disminución de la vida útil de los actuales rellenos sanitarios (Ver tabla N°1) y un incremento en la emergencias (incendios, derrumbes y emisiones de GEI sobre norma) debido al paso del tiempo, el crecimiento sostenido de la población y de la generación per cápita de residuos.

Estas situaciones obligan a derivar los residuos a otras instalaciones por cierres parciales o totales de instalaciones. Por otra parte, un manejo ineficiente de los residuos tiene por consecuencia severos impactos ambientales, dentro de éstos se encuentran la emisión de gases de efecto invernadero ( $CH_4$  y  $CO_2$ ), la contaminación de aguas superficiales y

subterráneas, la alteración de los ecosistemas, el cambio de la calidad del suelo utilizado para disposición final, el impacto visual y los malos olores, entre otros.

**Tabla 1: Vida útil restante de los rellenos y vertederos de la RM [4].**

| <b>Relleno / Vertedero</b>                   | <b>Vida útil restante (2017)</b> | <b>Resolución sobre vida útil</b>       |
|----------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
| Relleno sanitario Loma los Colorados (RSLLC) | 29 años                          | Resolución EX SESMA N°9979/96           |
| Relleno sanitario Sana Marta (RSSM)          | 4 años                           | Según Considerando N° 3.2 de RCA 344/01 |
| Relleno sanitario Santiago Poniente (RSSP)   | 6 años                           | Según Considerando N° 3.3 de RCA 479/01 |
| Relleno sanitario Cerros la Leona (RSCLL)    | 33 años                          | Resolución N° 34.332 /10                |
| Vertedero Controlado de Popeta               | Vida útil cumplida (2012)        | N.A.                                    |

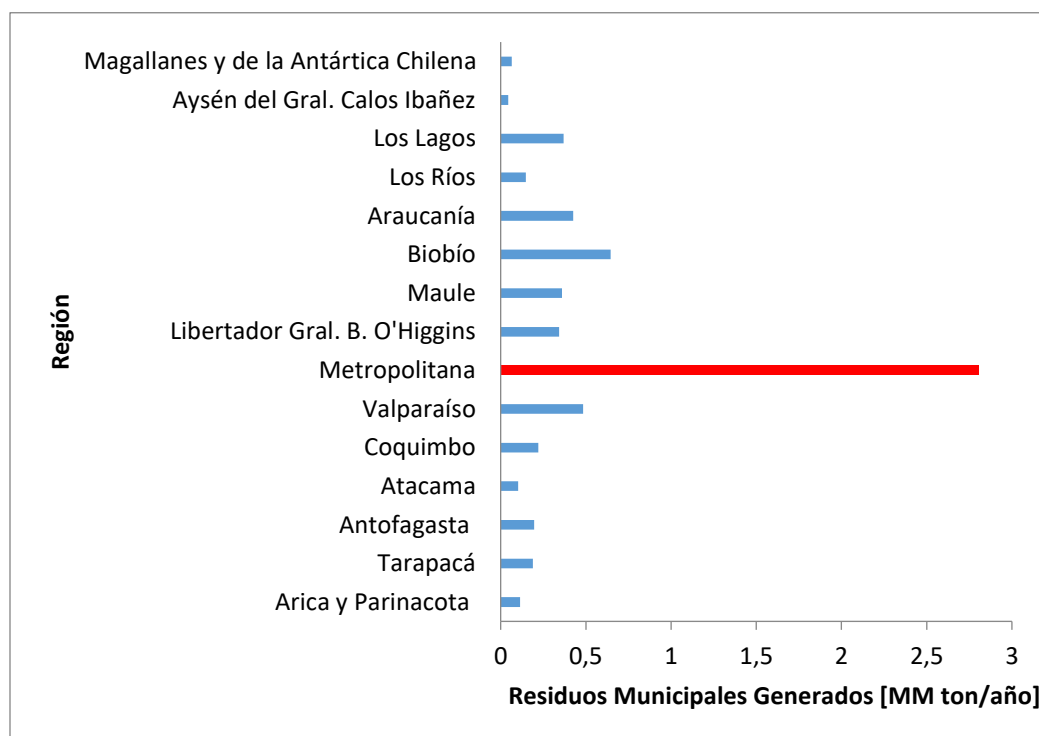


**Gráfico 2: Distribución de los residuos en Chile por región (elaboración propia a partir de los datos en [3]).**

La gráfica N°2 muestra la cantidad de RSD generados por región, apreciándose que las regiones de la zona central del país (RM y Valparaíso) son de las que poseen mayor generación de residuos sólidos domiciliarios en el país. Además se da la coincidencia de que estas regiones poseen menor superficie respecto de otras (2% y 2,2% de la superficie total de país respectivamente) y por ende existe una menor disponibilidad de terreno para la construcción de nuevos rellenos sanitarios y vertederos.

En este contexto se hace relevante el contar con opciones de implementación de proyectos en paralelo a las actuales soluciones, que contribuyan a disminuir el volumen de RSD a disposición final. Este trabajo se enfoca en estudiar alternativas de utilizar los residuos como fuente de energía, acción también conocida “*Waste to Energy*” o bien por sus siglas WTE, esto se encuentra con mayor detalle en la página 18 de la presente memoria.

## 1.2. Situación Energética de Chile

La situación eléctrica a nivel nacional es un tema importante a analizar. El consumo nacional durante el año 2017 fue de aproximadamente 90.000 [GWh] y, según las proyecciones realizadas, se espera que para el año 2030 el consumo aumente a 115.000 [GWh], lo que marca un crecimiento de casi un 28% en 13 años [5]. En la figura N°2 se puede apreciar una representación gráfica de las proyecciones:

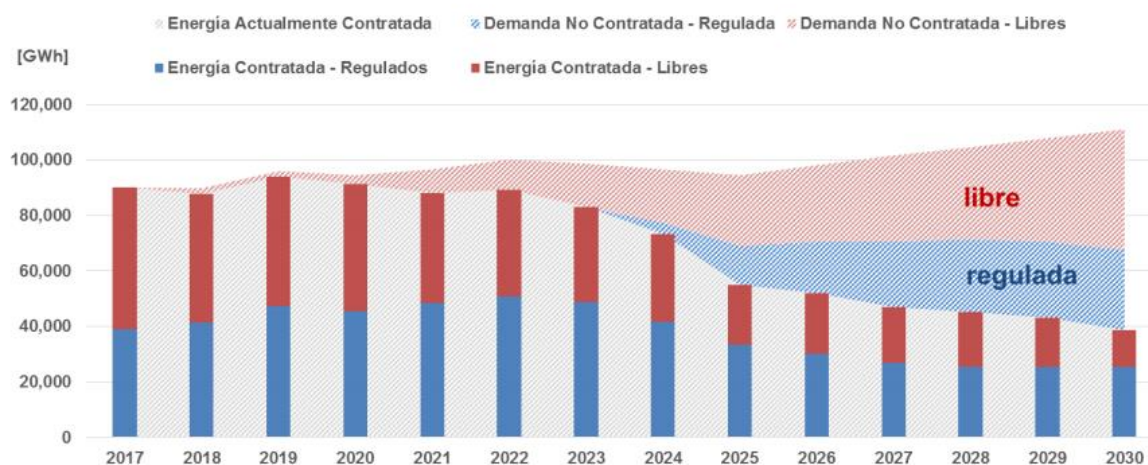


Figura 2: Ilustración de la evolución y proyección de consumo eléctrico en Chile 2017-2030 [5].

Al analizar la distribución de las fuentes generadoras de la matriz energética en Chile se observa que cerca del 59% de la generación utiliza combustibles fósiles como fuente

energética, con una alta dependencia de ésta; es más, al comparar las fuentes de generación del 2005 con las del 2015 se observa un aumento en el uso de combustibles fósiles de un 10% como se puede ver en la figura N°3. Si bien el aumento es principalmente en el consumo de carbón para la generación debido a las sequías de los años anteriores, aun se tiene una dependencia de casi un 20% de la matriz en base a gas natural y diésel [6] combustibles fósiles que están agotándose. Se estima que para el 2025 se habrán ocupado el 88% de las reservas de petróleo y que para el 2050 se agotarán tanto las reservas de petróleo como gas natural [7], por lo que se deben estudiar alternativas para su reemplazo.

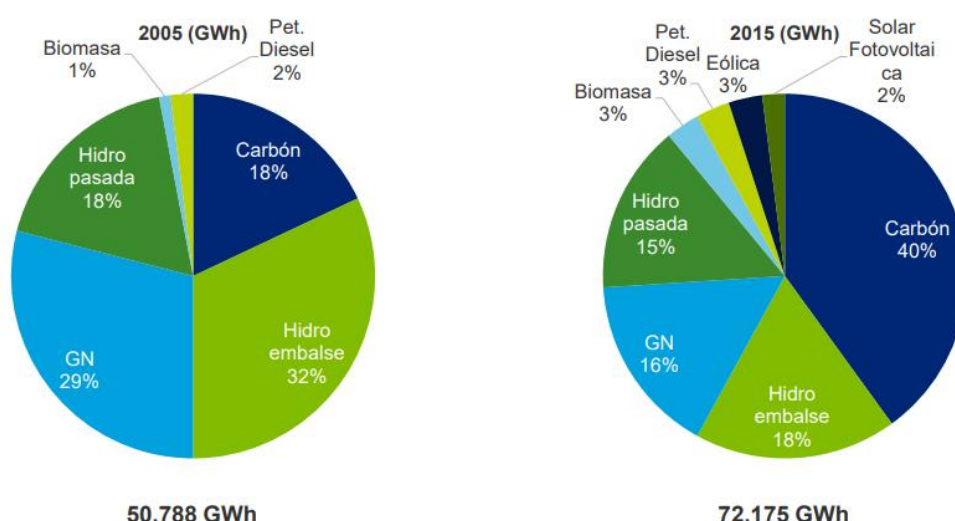


Figura 3: Evolución de la composición de la matriz energética en Chile 2005-2015 [6].

En este escenario, a partir del año 2008 Chile promueve la utilización de las Energías Renovables No Convencionales, mediante la aprobación de la Ley ERNC. Esta ley estableció que las empresas de generación eléctrica debían asegurar que como mínimo un 5% de sus inyecciones de energía provenían de ERNC, el que debía aumentar hasta un 10% el año 2024. Sin embargo, con la modificación introducida el año 2013 mediante la Ley 20.698, se aumentó este mínimo a un 20% para el año 2025 lo que ha significado un estímulo importante a las inversiones en ERNC, dentro de la cual califica el uso de residuos sólidos domiciliarios y asimilables como fuente energética a partir de biomasa [8].

Consecuentemente, diversos estudios se han abierto paso acerca de alternativas tecnológicas de generación vía el uso de residuos o “Waste to Energy”, cuyo objetivo es disminuir los

residuos a disposición final y por otra parte contribuir en la diversificación de la matriz energética. Estas alternativas tecnológicas son de especial interés para las empresas Poch by WSP (consultora de ingeniería Chilena) y Eco Hispánica, empresa española que ha desarrollado y patentado un sistema propio para el tratamiento de Residuos Sólidos Domiciliarios y Asimilables que utiliza la gasificación como tecnología de valorización energética, en particular utilizando la tecnología donwdraft que corresponden a gasificadores de lecho fijo, que se caracterizan por un lecho de combustible que se mueve lentamente hacia abajo por acción de la gravedad mientras se gasifica, alimentándose el gas en sentido descendente. Ambas empresas están patrocinando esta memoria de título. En base a lo anterior, surge la necesidad de generar una herramienta que permita realizar una evaluación de la capacidad de generación a partir de la cantidad y caracterización de los residuos a tratar mediante gasificación, y de esta manera poder permitir modelar plantas según las diversas caracterizaciones de RSD, sin necesidad de realizar costosos ensayos para determinar la calidad del gas de síntesis a generar, finalmente esta herramienta también permite determinar cómo se comportará el gas de síntesis obtenido dependiendo de las fracciones alimentadas y las características de los residuos, permitiendo poder determinar cómo poder rectificar la composición del gas de síntesis en pro de obtener un gas de mayor calidad, o bien un gas con un mayor poder calorífico (PCI).

## 2. Objetivos y Alcances

### 2.1. Objetivo General

El objetivo general de esta memoria es generar un simulador computacional de gasificación de residuos sólidos urbanos y asimilables que pueda estimar la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de la caracterización y cantidad de residuos a manejar.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Establecer un modelo matemático para simular un gasificador tipo downdraft.
- Programar un simulador del proceso de gasificación utilizando el modelo establecido mediante el software Matlab.
- Caracterizar el gas de síntesis generado por un gasificador downdraft en función del tipo de residuos para estimar la potencia eléctrica generada por el proceso.
- Determinar el perfil de temperaturas de reacción en el gasificador downdraft.

### 3. Antecedentes

#### 3.1. Definición y Clasificación de Residuos

Antes de definir el concepto de residuos propiamente tal, es importante mencionar que hoy en día en la sociedad el concepto de lo que en realidad es un residuo está asimilado por la mayoría de las personas, no obstante hay que considerar la subjetividad del concepto, ya que lo que unos entienden por un residuo, otros lo pueden valorar como una materia prima. Esta reflexión obliga a ser muy cuidadoso a la hora de definir el término residuo.

Existen múltiples definiciones del término residuo, a continuación se presentan algunas de ellas, que lo definen con cierta exactitud [9]:

- Según el concepto que publica el profesor A. Viera, el residuo se define como “lo que queda o resulta después de utilizar las cosas”.
- La Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (O.C.D.E.) denomina a los residuos como “aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado ningún valor económico en el contexto en que son producidas, es decir, aquello que su propietario desecha por no serle útil, comprendiendo, en el ámbito de la utilidad, una posible cesión rentable del producto”.

Estos conceptos están definidos desde el punto de vista de actividades de producción, generándose un cambio de concepto a partir de la toma de conciencia de la sociedad y la implementación de leyes que los regularizan.

Según la Ley chilena 20.920 se define residuo como “Cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar” [10].

Por lo tanto, un residuo es toda sustancia u objeto que por sí no tiene ninguna utilidad para su poseedor. Aquí se incluye, por ejemplo, desde los papeles, plásticos o residuos orgánicos generados en un hogar, hasta los materiales radiactivos procedentes de un hospital.

En cuanto a la clasificación, en Chile se clasifican los residuos por el riesgo y origen de éstos:

#### **Por riesgo:**

- **Peligrosos:** Presentan características de riesgo para la salud humana y/o al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo.
- **No peligrosos:** No presentan características de riesgo para la salud humana y/o al medio ambiente.
- **Inertes:** Residuos no peligrosos que no pueden reaccionar física, química ni biológicamente.

#### **Por origen:**

- **Residuos sólidos domiciliarios:** Producidos en los hogares.
- **Residuos sólidos domiciliarios y asimilables:** Producidos en los hogares así como otros que por su naturaleza o composición sean similares a los producidos en hogares.
- **Residuos sólidos municipales:** Corresponden a la agrupación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables a éstos, así como también residuos de parques y jardines, vías públicas, ferias libres, oficinas, colegios, barrido de calles, etc.
- **Residuos industriales:** Producidos en actividades industriales.
- **Residuos silvoagropecuarios:** Producidos en actividades forestales, agrícolas y pecuarias.
- **Residuos mineros:** Producido por procesos de exploración, prospección, extracción de mineral, transformación hidrometalúrgica, pirometalúrgica y refinación.
- **Residuos de la construcción:** Producidos en la construcción, transformación, reparación y/o demolición de obras civiles. Se incluyen los producidos en la preparación del terreno.
- **Residuos hospitalarios:** Producidos en centros de atención a la salud.

### **3.2. Caracterización de los RSD**

Cabe destacar que uno de los puntos importantes a considerar al aprovechar los residuos sólidos domiciliarios para la obtención de energía corresponde a la caracterización que éstos tengan, de esto dependerán factores tan importantes como el poder calorífico o la

humedad del combustible. Hoy en día en Chile la mayoría de los residuos urbanos corresponden a residuos orgánicos con un alto índice de humedad, seguido de plásticos y papeles [3]. A continuación se presenta el gráfico N°3 que exhibe la caracterización del país:

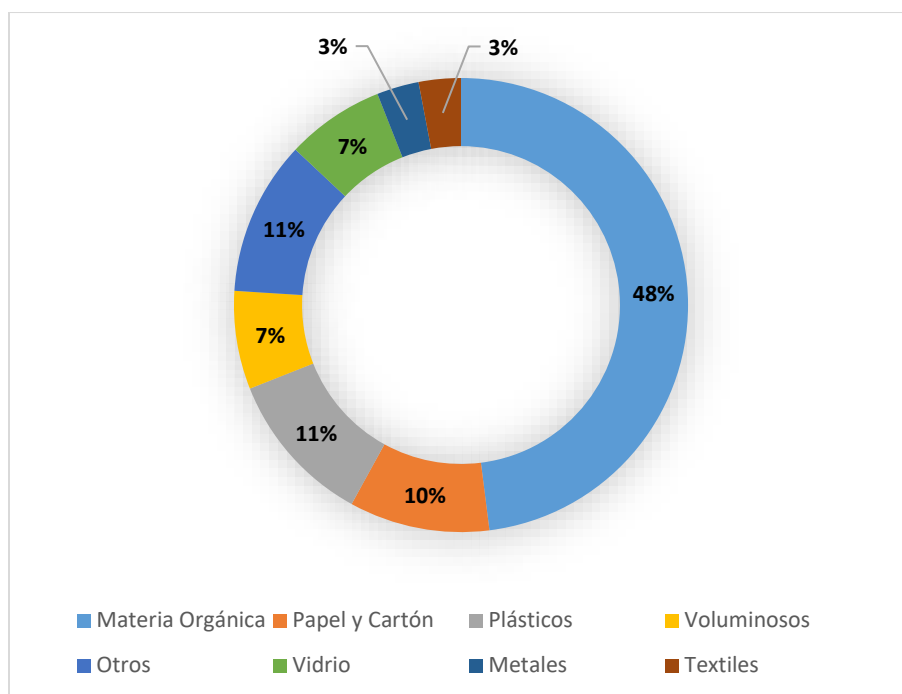


**Gráfico 3: Caracterización de los RSD en Chile (2008) [3].**

La alta proporción de residuos orgánicos representa una ventaja desde el punto de vista medio ambiental debido a que éstos generan una menor cantidad de azufre y otros contaminantes, pero el alto contenido de humedad presente en éstos jugará en contra a la hora de intentar aprovecharlos, por lo que se requiere de algún pre-tratamiento para su mejor aprovechamiento.

### 3.2.1. Propiedades Físicas y Químicas de los RSD

Es importante conocer la composición química de los componentes que conforman en conjunto a los RSD con la finalidad de poder evaluar las mejores opciones disponibles para su aprovechamiento y recuperación.

Debe considerarse que si los residuos van a ser utilizados como combustible, es necesario conocer las características que afectan el funcionamiento o la eficiencia de los posteriores procesos de aprovechamiento, para esto es recomendable realizar los siguientes análisis:

1. Análisis Físico
2. Análisis Químico o Elemental
3. Contenido Energético

#### **Análisis Físico:**

El análisis físico requerido para utilizar los RSD como combustibles comprende los siguientes análisis:

- Análisis de Humedad
- Análisis de Materia Volátil
- Análisis de Carbono Fijo

A continuación se presentan los resultados de estudios realizados a las propiedades físicas de los residuos sólidos domiciliarios y comerciales respecto a humedad, cantidad de carbono volátil, carbono fijo y fracción no combustible [11]:

**Tabla 2: Propiedades físicas de los RSD que ingresan al proceso (elaboración propia a partir de los datos en [11]).**

| <b>Tipo de Residuo</b>              | <b>Carbono Fijo<br/>[%]</b> | <b>Carbono<br/>Volátil [%]</b> | <b>Humedad<br/>[%]</b> | <b>Fracción Seca<br/>[%]</b> |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------------|
| <b>Orgánicos (Restos de Comida)</b> | 6,5                         | 93,5                           | 70                     | 30                           |
| <b>Papel y Cartón</b>               | 18,5                        | 81,5                           | 7,7                    | 92,3                         |
| <b>Residuos de Jardín (Poda)</b>    | 21,1                        | 78,9                           | 36,5                   | 63,5                         |
| <b>Plásticos</b>                    | 3,3                         | 96,7                           | 0,2                    | 98,8                         |

Cabe mencionar que los resultados presentados para los restos de comida corresponden al promedio de los distintos tipos de residuos que la componen (grasas, residuos de frutas, residuos de carnes, entre otros) según la referencia.

### **Análisis Químico o Elemental:**

Este análisis implica el determinar el porcentaje en masa del carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y otros (nitrógeno (N), azufre (S) y cenizas). A continuación se presenta los resultados de estudios realizados a residuos sólidos domésticos donde se determina su análisis elemental [11]:

**Tabla 3: Análisis elemental por tipo de RSD que ingresa al proceso [11].**

| <b>Tipo de Residuo</b>              | <b>Carbono [%]</b> | <b>Hidrógeno [%]</b> | <b>Oxígeno [%]</b> | <b>Otros [%]</b> |
|-------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|------------------|
| <b>Orgánicos (Restos de Comida)</b> | 48                 | 6,4                  | 37,6               | 8                |
| <b>Papel y Cartón</b>               | 43,8               | 6                    | 44,3               | 5,9              |
| <b>Residuos de Jardín (Poda)</b>    | 47,8               | 6                    | 42,7               | 3,5              |
| <b>Plásticos</b>                    | 60                 | 7,2                  | 22,8               | 10               |

### **Contenido Energético e Inertes**

El contenido energético es una propiedad fundamental a la hora de evaluar la capacidad e los RSD para generar energía, sobre todo para los procesos de generación directa como lo sería procesos como la incineración. A continuación, se presentan estudios realizados donde se determina su contenido energético y porcentaje de rechazos por inertes [11]:

**Tabla 4: Datos respecto al contenido energético y porcentaje de inertes de los RSD [11].**

| <b>Tipo de Residuo</b>              | <b>Rechazos Inertes [%]</b> | <b>PCI [<i>Kcal/kg</i>]</b> |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>Orgánicos (Restos de Comida)</b> | 5                           | 1.111                       |
| <b>Papel y Cartón</b>               | 5,5                         | 3.945                       |
| <b>Residuos de Jardín (Poda)</b>    | 4,5                         | 7.778                       |
| <b>Plásticos</b>                    | 10                          | 1.556                       |

### 3.3. Disponibilidad en Chile

A continuación se realizará una descripción de la situación actual y proyectada de los RSD en Chile, con la finalidad de poder analizar si es factible realizar un proyecto en base a éstos en el país.

#### 3.3.1. Situación Actual de los RSU

Actualmente se generan aproximadamente 6,5 millones de toneladas de RSD, siendo aproximadamente el 38,5% del total de los residuos [3], la mayor parte de los cuales se concentra en la zona central del país; sólo en la Región Metropolitana se produce el 43% de los RSD. Se debe considerar que alrededor del 40,3% de la población del país vive en la Región Metropolitana lo que explica la gran concentración de los RSD [12].

Por otro lado, hay que considerar que esta misma concentración de los residuos genera las condiciones propicias para la implementación de proyectos de aprovechamiento de los residuos, ya que no es necesario recorrer grandes distancias para poder obtener una gran cantidad de éstos, punto decisivo para la rentabilidad de este tipo de proyectos.

#### 3.3.2. Proyección de Generación de RSD

Para analizar la situación futura de los residuos se utilizó las proyecciones realizadas por el Green Lab UC (2013), las cuales se presentan a continuación [13]:

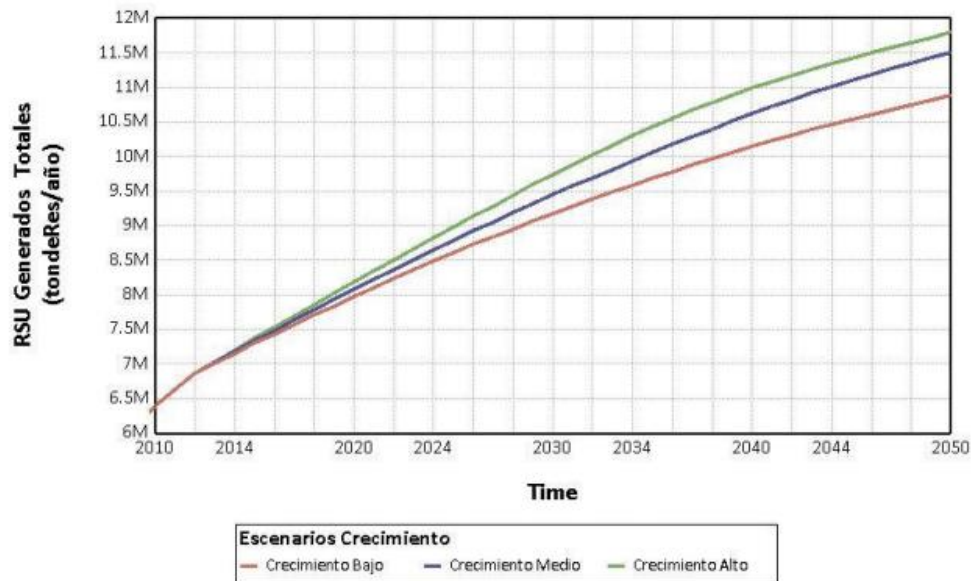


Figura 4: Proyección de residuos sólidos domiciliarios (RSD) 2010-2050 [13].

Tomando en consideración la situación de crecimiento medio presentada en la figura N°4, se proyecta que para el año 2050 se generarían aproximadamente 11,5 millones de toneladas, lo cual implica un incremento aproximado del 77% de los RSD con respecto a la situación base de 6,5 millones de toneladas [13]. Esta situación es alarmante; a menos que exista un cambio en la distribución de la población a lo largo del país, la mayoría de estos residuos se concentrarían en la Región Metropolitana, causando una disminución en la vida útil de los rellenos sanitarios y, a la larga, graves problemas a nivel sanitario. Por otro lado, la zona central del país se caracteriza por estar densamente poblada y no tener una gran cantidad de áreas disponibles que cumplan con los requerimientos para disponer residuos, por lo que resulta de interés el evaluar proyectos que utilicen los RSD como insumo para sus procesos, como sería el caso de utilizarlos como fuente de energía en proyectos “*Waste to Energy*”.

### 3.4. Tecnologías Disponibles de Aprovechamiento

Existen diversas maneras de aprovechar los residuos, si consideramos la estrategia jerarquizada de los residuos tenemos que reutilizar, reciclar y luego valorizar energéticamente son las medidas fundamentales, pero para efectos de la presente memoria solo se tomará en cuenta el uso de los RSD para generar energía o el aprovechamiento energético. A continuación se presenta en la figura N°5 las diferentes opciones o rutas para transformar estos residuos en energía:

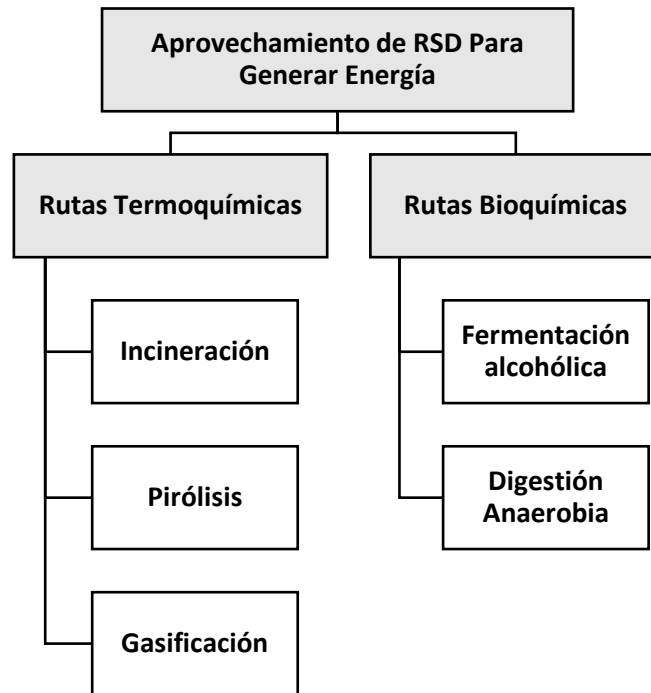


Figura 5: Diagrama de formas de tecnologías para realizar "Waste to Energy" (elaboración propia).

Como se puede apreciar en la figura N°5 existen dos rutas principales para obtener energía a partir de los residuos, por un lado tenemos los procesos termoquímicos que son procesos que se llevan a cabo a grandes temperaturas y, por otro lado, tenemos las rutas Bioquímicas donde se aprovecha el uso de bacterias y enzimas para sus procesos.

A continuación se realizará una breve descripción de cada una de estas tecnologías [28]:

#### Procesos Bioquímicos:

- **Digestión anaerobia:** el proceso consiste en la fermentación de la materia orgánica de los RSD realizada por microorganismos; en este proceso los microorganismos son los encargados de generar una serie de reacciones bioquímicas con la materia orgánica generando un gas que está compuesto principalmente por dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y metano ( $CH_4$ ), también llamado biogás.

Para esta sección no se tomará en cuenta la digestión aerobia o compostaje, proceso que si bien es una manera de tratar los RSD orgánicos al igual que la digestión anaerobia, los principales productos de este proceso son dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y

compost material útil como abono, pero no produce ningún subproducto para la generación de energía.

- **Fermentación alcohólica:** este proceso consta, en primera instancia, de un fase de hidrólisis que consiste en la conversión de la biomasa orgánica de los RSD en azúcares mediante la acción de enzimas, para luego realizar un tratamiento con levaduras donde los azúcares se transforman en alcoholes, principalmente etanol (combustible) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

#### **Procesos Termoquímicos:**

- **Incineración:** este proceso consiste en la oxidación completa de los RSD en presencia de suficiente oxígeno a temperaturas entre 800 a 1450 [°C], generándose gases de combustión a altas temperaturas cuya energía térmica puede ser aprovechada para procesos que la requieran o la generación de energía eléctrica. Esta es la tecnología que puede tratar una amplia gama de residuos y la más desarrollada en este ámbito. Además esta tecnología permite reducir el volumen de los residuos y su peligrosidad.
- **Pirólisis:** este proceso consiste en la descomposición térmica de los residuos en ausencia total o casi total de oxígeno a temperaturas entre los 200 a 1100 [°C]; uno de los productos de este proceso es el gas de síntesis, pero los principales productos generados son Bioaceite combustible y carbón (char), utilizado como combustible de hornos o acondicionador de suelos y ácidos inorgánicos.
- **Gasificación:** este es un proceso térmico donde ocurren múltiples reacciones en cadena siendo un proceso de alta complejidad para su análisis y modelación, debido a estos en general para facilitar su análisis se considera este como un proceso que consta de tres etapas, la primera etapa o etapa de pirolisis, luego le sigue una etapa de oxidación parcial (15 a 40% del oxígeno estequiométrico [14]), para terminar con una etapa de reducción, las etapas de proceso se llevan a cabo a temperaturas entre 500 a 1200 [°C]. Este proceso transforma un combustible sólido en uno gaseoso, llamado gas de síntesis que está compuesto principalmente por hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), agua ( $H_2O$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ).

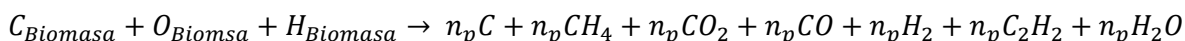
Este último proceso de valoración energética para los RSD, gasificación, es el que se abordará en esta memoria y, por lo tanto, se estudiara más a fondo en los siguientes capítulos.

### 3.5. Gasificación

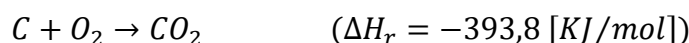
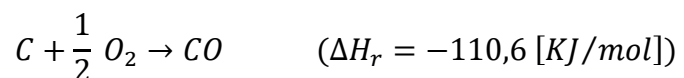
Como se mencionó con anterioridad, la gasificación corresponde a un proceso en donde se transforma un combustible sólido en un gaseoso, llamado gas de síntesis, mediante una serie de reacciones químicas que se pueden dar o bien en paralelo o sectorizadas según el tipo de reactor en que operan. Durante este proceso se puede apreciar una serie de etapas las cuales se presentan a continuación:

#### 3.5.1. Etapas del Proceso

- **Etapas de Secado:** corresponde a la primera etapa del proceso, donde se produce el secado de los RSD al evaporarse el agua que éstos contienen; esta etapa se lleva a cabo a temperaturas cercanas a los 100 [°C].
- **Etapas de Pirólisis:** esta etapa consiste en una absorción de calor en ausencia de oxígeno lo cual genera una ruptura de las moléculas de mayor tamaño (biomasa) y genera carbón (char), hidrocarburos condensables o alquitrán y gases. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas que oscilan entre 300 a 1100 [°C], siendo ideal una temperatura cercana a los 600 [°C] para asegurar una mayor reactividad del char [15]. A continuación se presenta la formula general del proceso:

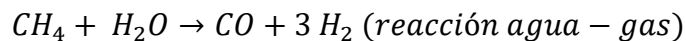
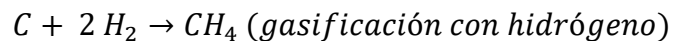
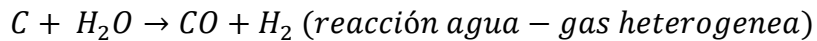
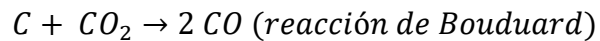


- **Etapas de Oxidación:** esta etapa se caracteriza por realizarse con un déficit en la cantidad de oxígeno estequiométrico necesario para alcanzar una combustión completa, a fin de generar una oxidación parcial del char e hidrógeno provenientes de la pirólisis, generando monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); esta etapa se produce bajo temperaturas en el rango de 700 a 1200 [°C]. A continuación se presentan las reacciones que se producen durante esta etapa:



- **Etapas de Reducción:** en esta etapa es donde se llevan a cabo las llamadas reacciones de gasificación; ocurren principalmente reacciones endotérmicas que producirán los gases combustibles del producto. Esta etapa se lleva a cabo entre los 600 y 1000 [°C].

Durante esta etapa se da a lugar a una serie de reacciones gas-sólido y gas-gas, donde el *char* reacciona con los gases, principalmente el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ) para generar dióxido de carbono ( $CO_2$ ), hidrógeno ( $H_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ). A continuación se presentan las principales reacciones que tienen lugar en esta etapa y que se utilizó posteriormente en la modelación:



Cabe recalcar que éstas son las reacciones principales pero durante esta etapa se producen más reacciones que no serán consideradas por tener una participación de menor grado.

A continuación se presenta un diagrama que representa los productos obtenidos de las distintas etapas descritas:

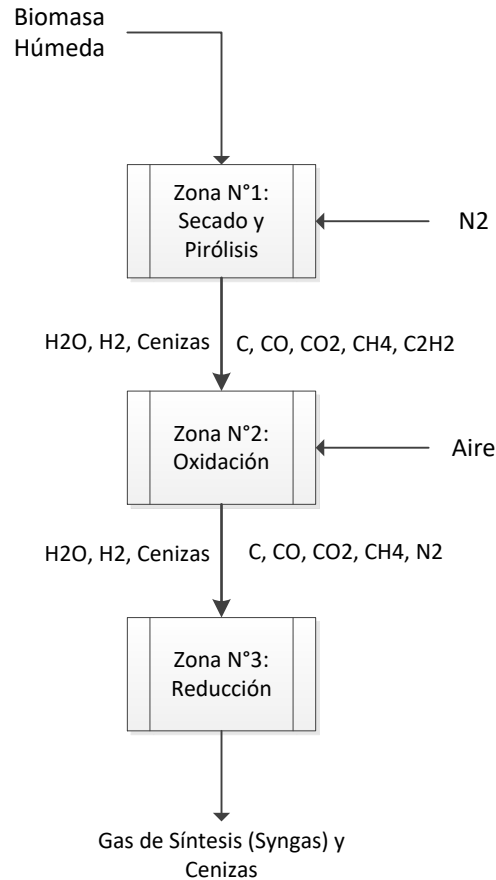


Figura 6: Diagrama de proceso de gasificación (elaboración propia).

### 3.5.2. Factores que Afectan la Gasificación

En el proceso de gasificación existen una serie de variables diferentes a la procedencia y tipo de material combustible que afectan el proceso y que pueden ser modificadas según el requerimiento del proceso. A continuación se describen las variables más influyentes:

#### **Agentes Gasificantes:**

El proceso de gasificación requiere el uso de un agente gasificante que influye directamente en la composición del gas de síntesis a obtener, lo que tiene repercusiones en el poder calorífico de éste y sus potenciales aplicaciones como combustible o en procesos de síntesis química. El agente gasificante tiene como funciones aportar calor, fluidizar el sólido y entregar el oxígeno necesario para la combustión parcial de la biomasa. A continuación se presentan las distintas opciones de agente gasificante que se pueden utilizar [16]:

- **Aire:** el oxígeno presente en el aire se utiliza para generar una reacción de oxidación parcial de los residuos y de esta manera aporta la energía necesaria para mantener las reacciones de gasificación, pero este agente gasificante tiene como inconveniente el producir un gas de síntesis de bajo contenido energético, entre 4 y 6  $[MJ/Nm^3]$ , debido a la gran cantidad de nitrógeno (inerte) presente en el aire (cercano al 79%). Este gas puede utilizarse como combustible en calderas, turbinas de gas o motores de combustión interna.
- **Oxígeno (Puro):** a diferencia del aire, al utilizar oxígeno puro se obtiene un gas de síntesis con mayor poder energético, entre 10 y 15  $[MJ/Nm^3]$ , gracias a la ausencia del nitrógeno en éste. Sin embargo, existe un inconveniente al utilizar este agente gasificante desde el punto de vista económico, ya que el uso de oxígeno como agente gasificante encarece mucho el proceso, haciéndolo poco viable. Los usos dados a este gas de síntesis desde el punto de vista del aprovechamiento como combustible son como combustible en calderas, turbinas de gas o motores de combustión interna y también para la producción de ciertos compuestos orgánicos.
- **Aire/Oxígeno más Vapor de Agua:** el uso de vapor de agua en conjunto con aire u oxígeno permite obtener un gas de síntesis con mayores porcentajes de monóxido de carbono ( $CO$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ), generando un gas de síntesis de un poder calorífico ligeramente mayor, entre 10 y 20  $[MJ/Nm^3]$ . Este gas de síntesis se puede utilizar como combustible o en la síntesis de metanol, amoníaco o combustibles líquidos; es importante mencionar que el costo operacional de trabajar con vapor es muy alto (salvo que exista vapor disponible de otros procesos), por lo tanto resulta en un proceso económicamente inviable para la elaboración de combustibles, por lo que la gasificación utilizando vapor como agente gasificante se utiliza mayormente para la síntesis de otros compuestos como los antes mencionados.
- **Hidrógeno:** el uso de hidrógeno como agente gasificante da como resultado un gas de síntesis de mucho mayor poder energético, que supera los 30  $[MJ/Nm^3]$ ; este proceso tiene un alto costo de operación ya que requiere el uso de hidrógeno puro como agente gasificante y el gas de síntesis producido bajo estas condiciones se utiliza como un sustituto del gas natural.

A continuación se presenta en la tabla N°5 la composición esperada, el poder calorífico superior (PCS) y el uso del gas de síntesis en función del agente gasificante [17]:

Tabla 5: Composición molar, PCS y uso del gas de síntesis obtenido bajo distintos tipos de agentes gasificantes [17].

| Agente Gasificante | PCS<br>[MJ/Nm <sup>3</sup> ] | Composición del Gas Obtenido<br>[% en volumen] |    |                 |                 |                |                | Uso                           |
|--------------------|------------------------------|------------------------------------------------|----|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------------|
|                    |                              | H <sub>2</sub>                                 | CO | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> |                               |
| Aire               | 6<                           | 16                                             | 20 | 12              | 2               | 50             | -              | Combustible                   |
| Oxígeno            | 10-15                        | 32                                             | 48 | 15              | 2               | 3              | -              | Combustible y gas de síntesis |
| Vapor de Agua      | 10-20                        | 50                                             | 20 | 22              | 6               | -              | 2              | Combustible y gas de síntesis |
| Hidrógeno          | >30                          | -                                              | -  | -               | -               | -              | -              | Substituto del gas natural    |

#### Temperatura:

La temperatura afecta directamente a la termodinámica y la cinética de las múltiples reacciones que se llevan a cabo en el proceso. Desde un punto de vista cinético un aumento en la temperatura supone una mayor concentración de las especies de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>), aumentando el poder calorífico del gas de síntesis. En general, los procesos de gasificación se llevan a cabo a temperaturas entre 700 y 900 [°C] [26].

#### Presión:

La presión del sistema, al igual que la temperatura, afecta a la cinética, promoviendo la formación de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); esto disminuye, a su vez, las concentraciones de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>), generando un gas de síntesis con menos poder calorífico. En la actualidad se operan gasificadores a altas presiones, pero esto se debe a que al trabajar a presiones altas se requiere de equipos más pequeños, mejorando así la viabilidad económica del proceso.

### **Estructura de la Materia Prima (Porosidad):**

Para las reacciones de gasificación se tiene como materia prima el producto carbonoso también llamado *char*, que se genera de los procesos de pirólisis y oxidación. Por ende, la porosidad y la distribución del tamaño de esos poros determinarán el área superficial donde se llevarán a cabo las posteriores reacciones de reducción o gasificación, y la facilidad con que los reactantes gaseosos puedan desplazarse por la superficie.

### **Tamaño de Partícula:**

En el reactor de gasificación ocurren los siguientes procesos:

- Calentamiento de la partícula sólida
- Difusión
- Absorción de los reactivos en la partícula

Por ello, el tamaño de la partícula influye de manera importante, fundamentalmente en el tiempo de contacto necesario para que las reacciones se completen. A menor tamaño de partícula de los residuos o biomasa que ingresan al gasificador se reduce la formación de *char*, esto se debe principalmente a que al tener un menor tamaño de partícula se genera un calentamiento más homogéneo de la muestra lo cual produce una mejor volatilización del material, por otra parte un menor tamaño de partícula facilita que la materia se volatilice debido a que la materia volatilizada debe recorrer una distancia menor para abandonar la parte sólida de esta en comparación con tamaños de partícula mayores, la situación anterior provoca una disminución de las reacciones de gasificación.

### **Tiempo de Residencia:**

La variación del tiempo de residencia genera variaciones en la composición del gas de síntesis, ya que a mayor tiempo de residencia tendrá mayor tiempo para que se den las reacciones internas y se generará un mayor consumo del material sólido.

### **Ratio o Razón de Oxígeno (Etapa de Oxidación):**

Si el *ratio* de oxígeno es muy alto se favorecerán las reacciones de oxidación o combustión, generando un mayor volumen de estos gases, lo cual provoca una disminución del volumen de los gases de combustibles que se generan en la etapa de reducción ( $CH_4$ ,  $H_2$  y  $CO$ ). Esto

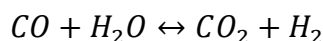
conlleva una disminución en el poder calorífico del gas de síntesis, lo cual se traduce en una menor generación de energía con su uso.

#### **Ratio o Razón H/C:**

El *ratio* H/C mide la cantidad de moles de hidrógeno versus la cantidad de moles de carbono presente en la muestra a gasificar; mientras mayor es este *ratio*, mayor será el contenido de monóxido de carbono ( $CO$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ) y menor la cantidad de alquitranes generados.

#### **Ratio o Razón S/B:**

Este *ratio* describe la relación que existe entre el agua y la cantidad de material a gasificar; mientras mayor es este ratio se incrementa la concentración de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ), pero disminuye la de monóxido de carbono ( $CO$ ) debido a la reacción “*water gas shift*”.



#### **3.5.3. Ventajas y Desventajas del Proceso**

El proceso de aprovechamiento de los residuos mediante gasificación para la obtención de gas de síntesis presenta ventajas y desventajas respecto de otras tecnologías de aprovechamiento energético como la pirolisis y la incineración. A continuación se presentan las ventajas y desventajas que posee este proceso respecto de los anteriormente mencionados [29]:

#### **Ventajas:**

- El gas de síntesis obtenido presenta varios usos tales como la producción de electricidad, como combustible o bien para la producción de una amplia gama de químicos, como el metanol.
- Los productos obtenidos son fáciles de manejar, de este proceso se obtienen el gas de síntesis, vapor de agua y ácidos inorgánicos en forma vítrea (cenizas no tóxicas), que tienen utilidad como relleno en la construcción.
- Se evita la formación de compuestos nitrogenados, halogenados y sulfurados peligrosos.
- El proceso no se ve afectado por un mayor contenido de humedad del residuo.

### **Desventajas:**

- La operación de este tipo de plantas es bastante compleja, requiriendo personal especializado.
- Existen experiencias limitadas a gran escala.
- Utiliza recursos que preferentemente son utilizados para el reciclaje.
- Si bien puede utilizar material con mayor humedad, esto también implica un mayor gasto energético para el proceso.

### **3.6. Tratamiento de los RSD**

Para poder aprovechar energéticamente los residuos de manera eficiente, se requiere que los residuos pasen por un procesamiento previo, esto con la finalidad de poder separar los reciclables y los inertes del proceso asegurando una mayor eficiencia de éste. A continuación se presenta el proceso de utilizado en las plantas de tratamiento de la empresa Eco Hispánica [30].

#### **3.6.1. Proceso de Tratamiento y Separación**

##### **I. Trituración**

La trituradora cumple la función de evitar la entrada al proceso de elementos voluminosos que pudiesen entorpecer los procesos que siguen, este diseño está equipado con una criba que garantiza un tamaño de partícula máximo de 300 [mm]. Es importante mencionar que las latas de aluminio y los materiales férricos salen del proceso compactados o “arrugados”, lo cual permite su posterior separación y valorización.

##### **II. Proceso de Higienización: Waste Cleaner**

Este proceso corresponde a una tecnología propia de la empresa Eco Hispánica y por ende, su diferenciador respecto a otras empresas que ofrecen este tipo de tratamiento o solución para los RSD; es el “corazón” de esta tecnología. El *Waste Cleaner* utiliza vapor de agua de manera similar a como se aplica en la esterilización del instrumental hospitalario, donde vapor de agua entra en contacto con los residuos asegurándose de no quemarlos para no generar dioxinas y de esta manera se obtiene un producto higienizado, libre de olores, agentes

patógenos y líquidos, además de asegurar una reducción hasta del 80% en volumen de los residuos tratados.

El proceso del *Waste Cleaner* se lleva a cabo a una presión de 5 [bar] y a temperaturas inferiores a 150 [°C], con el objetivo de evitar la formación de cloro como consecuencia de la fundición de los plásticos PVC. Este proceso tiene una duración aproximada de 20 minutos y mantiene una agitación constante de los residuos; al finalizar el proceso se pueden observar los siguientes cambios o transformaciones de los RSD:

- **Materia Orgánica:** la materia orgánica se desintegra adoptando una morfología fibrosa con una granulometría inferior a 10 [mm] y con una humedad que ronda al 55%. Además de cambiar la materia orgánica su morfología, presenta una homogenización importante produciendo un proceso de gasificación más estable al tener una calidad de biomasa que ingresa más estable llamada ECO-H.



Figura 7: Fotografía de la transformación materia orgánica luego de pasar por el *Waste Cleaner* [30].

- **Papel y Cartón:** el papel y cartón se desintegran durante el proceso por la acción del vapor incorporándose a la materia orgánica (ECO-H), donde es casi imposible diferenciar las partículas que proceden del papel y cartón de las de los restos orgánicos.
- **Tetrapak:** este tipo de envases, al igual que el papel y cartón, se desintegra y pasa a formar parte de la materia orgánica, mientras que el plástico y aluminio es posible separarlos en procesos posteriores.

- **Plásticos:** los plásticos se ven afectados en distinta medida en función de la composición de éstos, los plásticos que se funden a más bajas temperaturas tienden a salir como esferas macizas mientras los que se ven menos afectados como los plásticos PET terminan aplastados. El plástico obtenido del proceso no es apto para su revalorización mediante reciclaje por los cambios que se generan en el proceso, pero sí son aptos para su aprovechamiento energético, por lo tanto este se devolverá al proceso.



Figura 8: fotografía de la transformación de los plásticos luego de pasar por el *Waste Cleaner* [30].

- **Metales:** los metales no se ven afectados en mayor medida por este proceso, sólo saliendo limpios y libres de etiqueta por lo que pueden ser reciclados.
- **Vidrios e Inertes:** como consecuencia de la agitación durante el proceso la mayoría de los envases de vidrio se rompen en trozos difíciles de separar, donde una cantidad no menor de ellos van a proceso en forma de inertes.
- **Textiles:** los textiles salen del proceso troceados, húmedos y cubiertos con biomasa.
- **Lixiviados:** los RSD suelen contener una fracción importante de líquido y durante el proceso del *Waste Cleaner* se genera un lixiviado compuesto por agua, grasas y otros componentes de los residuos, el que es llevado a la planta de tratamiento de lixiviado para así poder reutilizar el agua como agua de proceso.

### III. Proceso de Separación

El proceso de separación consta de distintas etapas que requieren distintos tipos de equipos que se presentan a continuación:

- **Trommel:** este equipo está compuesto por un tambor rotatorio con aberturas y deflectores cuya función es separar la parte orgánica del resto de los residuos. La eficiencia del proceso de separación depende de factores como el largo del cilindro, la velocidad de rotación, el tamaño de las aberturas y el número de deflectores.



Figura 9: Representación del funcionamiento de un Trommel [30].

- **Separador Magnético:** este sistema consiste en un grupo de imanes que mediante el uso de campos magnéticos atrapan los materiales ferrosos separándolos del resto de los residuos.



Figura 10: Representación del funcionamiento de un separador magnético.

- **Separador de Foucault:** este tipo de equipos de separación tienen por objetivo la separación de metales no ferrosos, mediante el uso del principio de las corrientes de Foucault. El equipo está compuesto por una banda transportadora y un tambor inductor, el cual es el responsable de la separación.

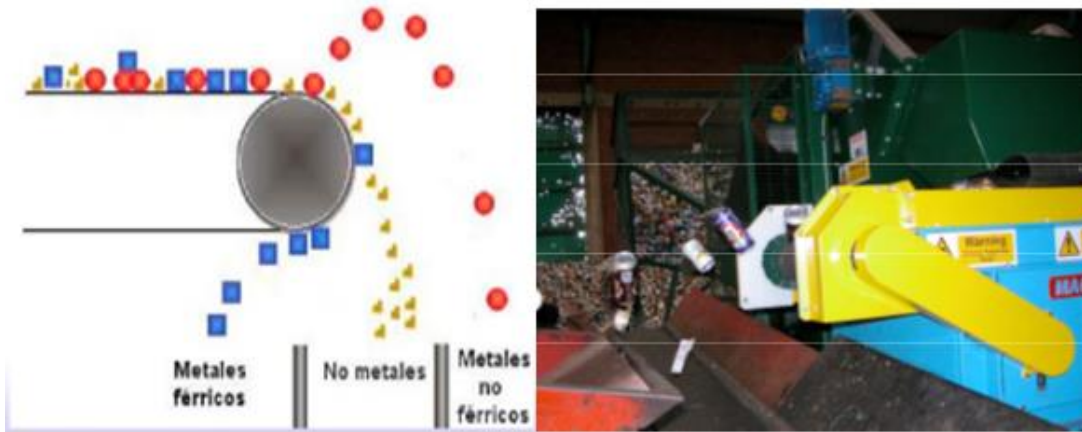


Figura 11: Representación del funcionamiento de un separador magnético.

- **Separador Óptico:** mediante el uso de este equipo se puede separar los plásticos del resto de los residuos, utilizando para esto clasificadores electroópticos que reconocen los materiales para separarlos mediante una corriente de aire comprimido; este proceso alcanza un grado de exactitud de un 98%.

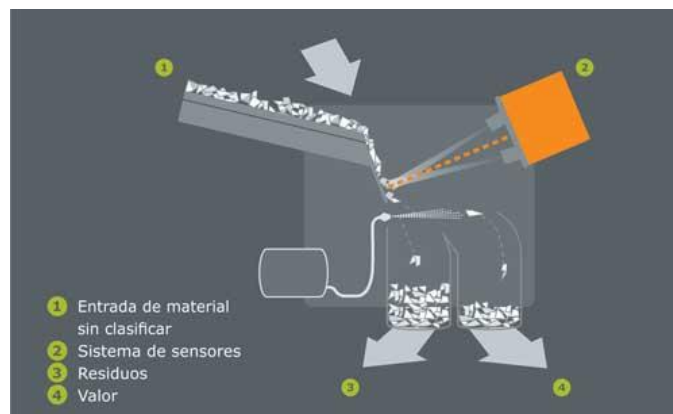


Figura 12: Representación de un separador óptico.

De esta manera, es posible obtener por un lado la materia orgánica que en conjunto con los plásticos se utilizarán para su aprovechamiento energético mediante gasificación. Por otro lado, se obtienen metales ferrosos y no ferrosos que serán compactados para su posterior valorización e inertes que serán enviados a disposición final.

#### **IV. Secado**

Luego de ser tratados y separados, los residuos sólidos pasan a una etapa de secado en pilas durante aproximadamente 2 a 3 días donde su humedad disminuye hasta un 32,5 por ciento respecto del residuo original; luego, ingresan al proceso de gasificación.

##### **3.6.2. Proceso de Gasificación**

#### **V. Gasificación**

La materia orgánica o ECO-H en conjunto con el plástico separado ingresan al gasificador que utilizará como agente gasificante aire, es aquí donde luego de una serie de reacciones La materia orgánica o ECO-H en conjunto con el plástico separado ingresan al gasificador que utilizará aire como agente gasificante; es aquí donde luego de una serie de reacciones químicas de descomposición, oxidación y reducción en cadena, bajo condiciones de alta temperatura, se obtiene un gas de síntesis que principalmente estará compuesto por hidrógeno ( $H_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), agua ( $H_2O$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ).

##### **3.6.3. Tratamiento y Acondicionamiento del Gas de Síntesis**

#### **VI. Limpieza y Acondicionamiento del Gas de Síntesis**

Es importante considerar que durante el proceso de gasificación se producen impurezas no deseadas que son arrastradas por el gas de síntesis obtenido como cenizas, *char* no consumido, alquitranes o compuestos como  $NH_3$ ,  $HCN$ ,  $H_2S$ , entre otros. Por esto se requiere de un proceso previo de depuración para ser utilizado como combustible.

La ruta tradicional y más utilizada para la limpieza del gas de síntesis implica el enfriamiento de los gases a temperatura ambiente o inferior, lo que conlleva elevados costes por el tratamiento de los efluentes que se producen y, por otro lado, pérdida en la eficiencia energética del proceso. Pese a ello, es una de las tecnologías más utilizadas en las plantas de gasificación existentes al tratarse de una tecnología probada, eficaz y de fácil diseño y aplicación [18].

A continuación se describe las fases del proceso de limpieza y acondicionamiento del gas [32], [33]:

1. En primer lugar, el gas es enviado a un ciclón en donde se separan las partículas sólidas de mayor tamaño que arrastra la corriente de gas (cenizas, *char*, y alquitranes), eliminando entre un 60% a 70% de las partículas sólidas.
2. Luego, el gas es enviado a un filtro cerámico con capacidad de aguantar temperaturas del orden de 900 [°C], con la finalidad de retener la partículas sólidas que no han podido ser retiradas en los ciclones.
3. Ya con el gas de síntesis libre de la mayor cantidad de las partículas sólidas, el gas de síntesis es enfriado hasta una temperatura de aproximadamente 250 [°C], aprovechando esta energía para generar vapor, que será utilizado en procesos internos de la planta.
4. El gas enfriado ahora debe circular por una torre de absorción alimentada con una solución de carbonato de sodio para eliminar el  $H_2S$  y  $CO_2$ , de esta operación se obtiene una corriente más fría y libre de azufre.
5. Ahora el gas pasa por un nuevo sistema de limpieza cuyo objetivo es dejar el gas libre de  $NH_3$  y trazas de los gases ácidos, para esto el gas se hace pasar por torres de absorción utilizando agua, además de bajar la temperatura de la corriente de gas a 40 [°C]. Este requerimiento es primordial, en primer lugar, para evitar la autoinflamación del gas al mezclarse con el aire, otro factor es el aumento de la densidad del gas y con ello la eficiencia volumétrica, lo que permite un mayor paso de combustible al motor y finalmente evita la condensación de los gases antes de entrar al motor.
6. El gas de síntesis obtenido queda libre de gases ácidos y a la temperatura adecuada para ser aprovechada por motores de combustión interna.

Debido a que este ítem se escapa un poco de los alcances propuestos de este trabajo de memoria, no se ha profundizado mayormente en el tratamiento del gas de síntesis por lo tanto se recomienda para trabajos futuros el indagar más en el tema.

#### 3.6.4. Aprovechamiento Energético

### VII. Aprovechamiento Energético

Existen dos vías de aprovechamiento energético propuestos por la empresa, por un lado se tiene un aprovechamiento energético utilizando calderas y turbinas de vapor y, por el otro, se propone el aprovechamiento del gas pobre en motores de combustión interna. Para el

análisis específico llevado a cabo en este trabajo de tesis, se analizará el aprovechamiento mediante esta última. Para considerar la alternativa a abordar es importante tener en cuenta las condiciones que requiere el gas para tener un uso apto para los motores de combustión interna [32]:

- El gas debe estar libre de gases ácidos y sólidos.
- El gas debe ingresar a temperaturas de  $40[^\circ\text{C}]$  o inferiores para tener una adecuada la eficiencia de conversión a energía eléctrica.
- El PCI del gas debe ser mayor a  $4,2 \text{ [MJ/Nm}^3\text{]}$ , aunque algunos motores especiales como los Jenbacher pueden funcionar con gases combustibles de  $4,2 \text{ [MJ/Nm}^3\text{]}$ .

Por otra parte, es importante destacar que parte de la energía proveniente del calor latente de los gases es aprovechada para generar vapor y precalentar corrientes de proceso [33].

3.6.5. Diagrama del Proceso

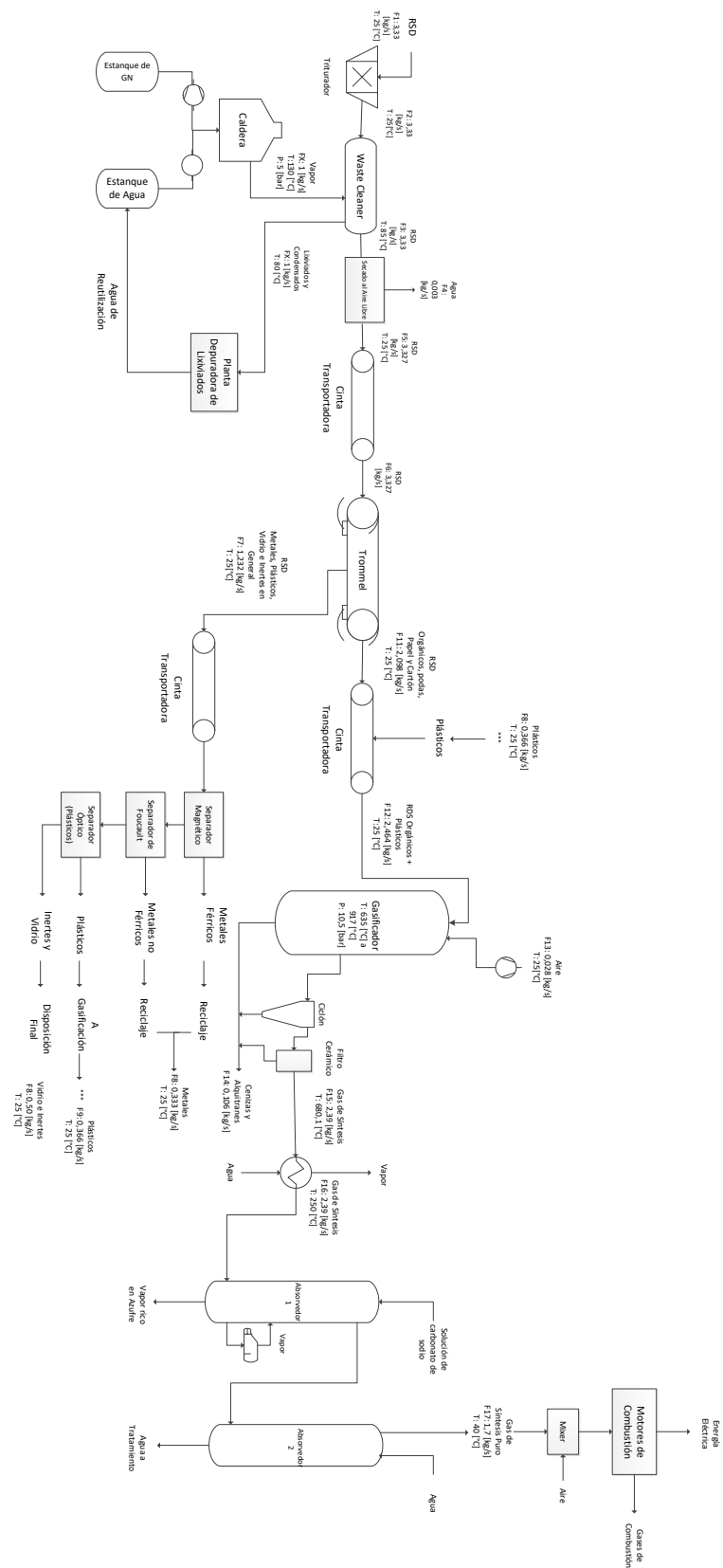


Figura 13: Ilustración de la planta de gasificación propuesta por la empresa Eco Hispánica (elaboración propia).

Diagrama: Pretratamiento, Waste Cleaner y Secado

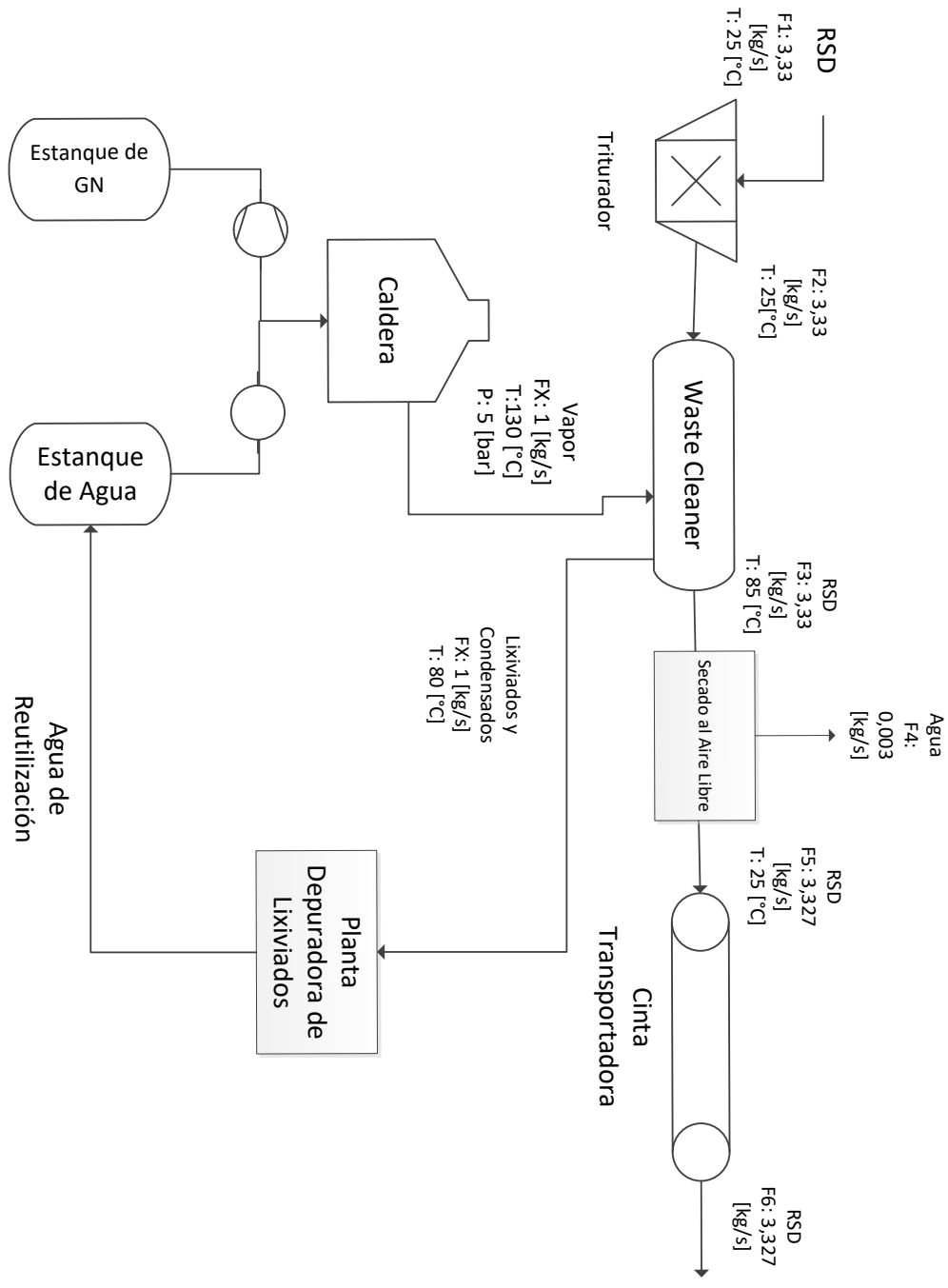


Figura 14: Zoom de la planta de pretratamiento, waste cleaner y secado en pilas.

Diagrama: Proceso de Separación de los Residuos

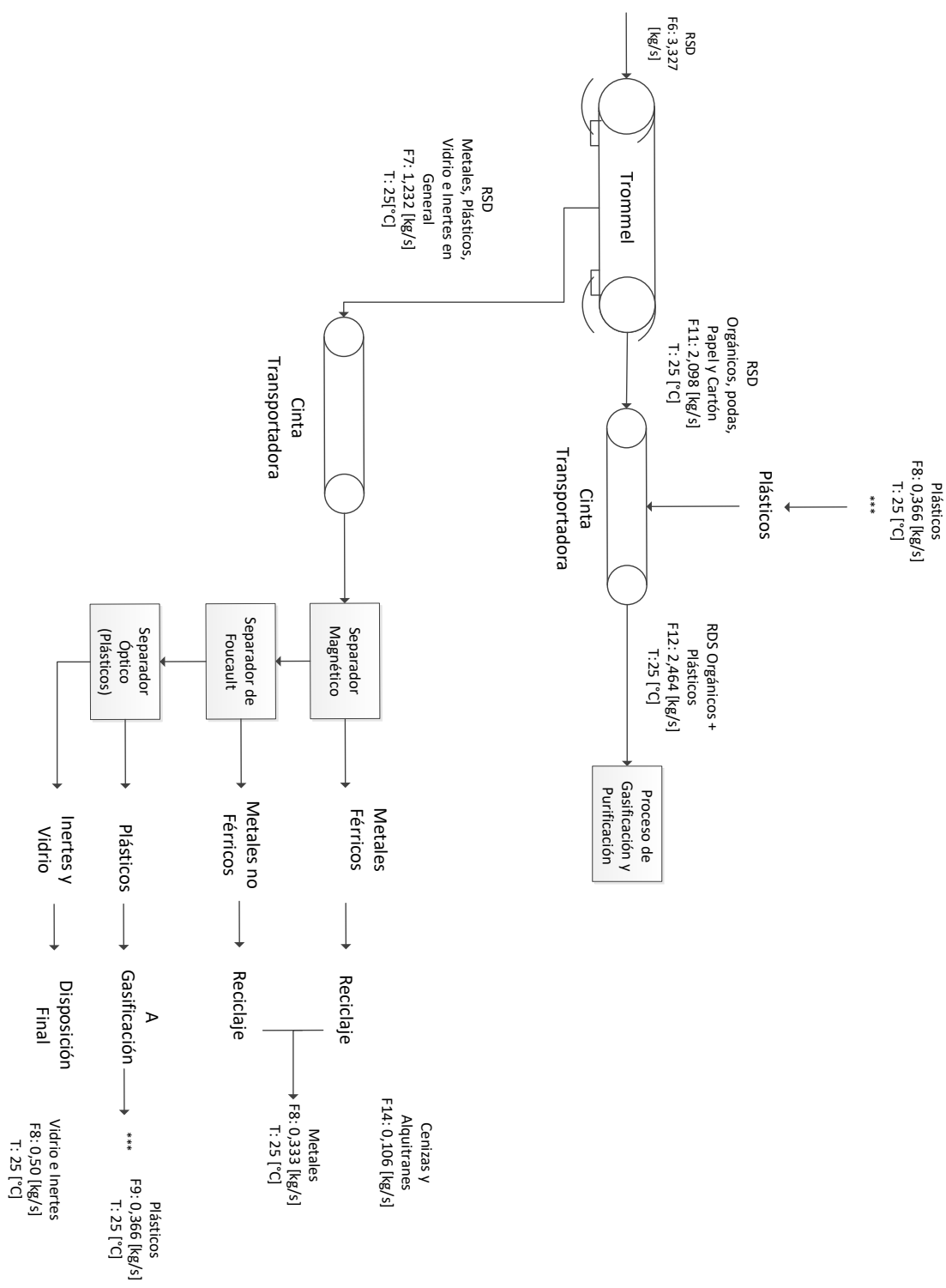


Figura 15: Zoom de la planta de Separación.

Diagrama: Proceso de Gasificación y Purificación y Rectificación

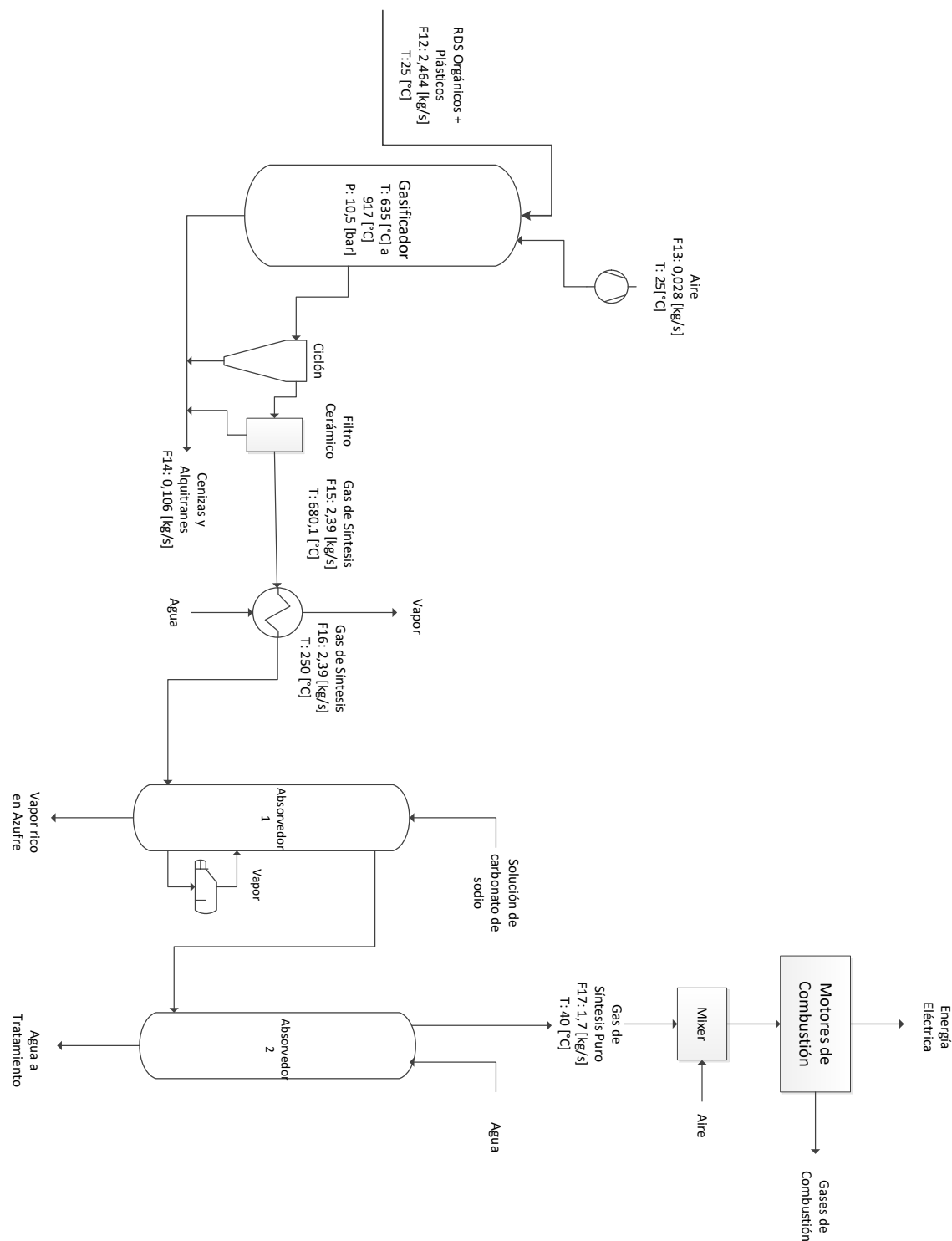


Figura 16: Zoom de la planta de gasificación, purificación y rectificación del gas de síntesis.

## 4. Modelación Matemática para un Gasificador Downdraft

La modelación y simulación matemática del proceso de gasificación es uno de los aspectos más importantes en la investigación y desarrollo de esta tecnología. Si bien ésta no es muy certera a la hora de predecir el rendimiento global del sistema, es capaz de proveer rangos reales de rendimiento y también brinda una guía cualitativa de cómo afectan al proceso las distintas variables de entrada, de diseño o las condiciones de operación del sistema. La simulación ofrece, en definitiva, una forma más económica de evaluar los riesgos y beneficios que puede ofrecer este tipo de sistemas.

No hay que olvidar que la gasificación es un proceso muy complejo que depende de numerosas y complejas reacciones dentro de las cuales se tienen reacciones de pirólisis, oxidación parcial, reacciones con conversión del *char*, reacciones agua-gas, reacciones de formación de metano entre muchas otras y que a la vez depende de una serie de factores como la calidad de la biomasa, la temperatura de operación, la presión del sistema y el tiempo de residencia, entre otras. Por esto toma importancia el poder modelar estos sistemas para evaluar los efectos de estas variables.

### 4.1. Tipos de Modelación

Los modelos de simulación del proceso de gasificación se pueden clasificar en los siguientes métodos:

- Modelos de Equilibrio Termodinámico
- Modelos Cinéticos
- Modelos de Fluido Dinámica computacional (CFD)
- Modelos por Redes Neuronales Artificiales

Cada uno de estos modelos de predicción posee diferentes utilidades y limitaciones, siendo los dos primeros modelos los más utilizados por investigadores. Si bien no son modelos del todo simples de abordar, comparativamente son mucho más simples que los últimos dos métodos de modelación. En este trabajo sólo se evaluarán como alternativas los modelos de equilibrio termodinámico y los modelos cinéticos. A continuación se presentan con mayor detalle estos modelos [19]:

#### 4.1.1. Modelo de Equilibrio Termodinámico

Los modelos de equilibrio termodinámico están basados en el equilibrio químico y termodinámico, los cuales se determinan utilizando constantes de equilibrio y minimizando la energía libre de Gibbs, considerando que dentro del equilibrio químico el sistema se encuentra en una condición estable lo que significa una maximización de la entropía y la minimización de la energía libre de Gibbs.

Es importante considerar que este tipo de modelación no tiene la capacidad de predecir la influencia de la hidrodinámica como la velocidad de fluidización o de parámetros propios del gasificador como la altura, sin embargo, estos modelos son bastante convenientes a la hora de observar la influencia de los combustibles en el sistema y predecir parámetros como la temperatura del sistema. Dentro de este tipo de modelación se pueden encontrar dos tipos de modelos distintos los estequiométricos y los no estequiométricos.

#### **Modelos de Equilibrio Estequiométricos:**

Dado que este tipo de modelos incorpora el equilibrio tanto químico como el termodinámico, puede diseñarse considerando una reacción global que abarca todo el proceso, utilizando una sola reacción, o bien puede dividirse en sub-modelos de secado, pirólisis, oxidación y reducción. A continuación se realizará una breve descripción de estos:

- **Modelo de equilibrio estequiométrico de una etapa:** este tipo de modelo engloba todas las complejas reacciones que conforman el proceso en una reacción genérica asumiendo que solo ingresa un mol de biomasa y “w” moles de agua en presencia de “a” moles de aire.
- **Modelos de equilibrio estequiométrico por sub-modelos:** Este modelo incorpora el separar el proceso en sub-modelos de secado, pirólisis, oxidación y reducción, donde la salida de un modelo se convierte en los parámetros de entrada del siguiente.

#### **Modelos de Equilibrio No-Estequiométricos:**

Este tipo de modelos se basan en la minimización de la energía libre de Gibbs y no posee una especificación de los mecanismos de reacción que se originan en el proceso; este método es útil cuando se tiene combustibles como biomasa donde no se tiene conocimiento de una fórmula química establecida.

#### **4.1.2. Modelos Cinéticos**

La incapacidad de conjugar los parámetros de diseño del gasificador con la composición del gas de síntesis revela la necesidad de contar con un modelo que pueda considerarlos; es aquí donde entran los modelos cinéticos que son capaces de modelar el comportamiento del gasificador, prediciendo la composición del gas de síntesis teniendo en consideración los parámetros de diseño del equipo como el volumen, la altura de la zona de gasificación y la temperatura.

Debido a la gran cantidad de reacciones y la dificultad de formular los caminos de reacción es que la mayoría de los investigadores realizan una separación del proceso en sub-modelos de pirólisis, oxidación y reducción.

#### **4.2. Selección de Modelo**

A la hora de seleccionar el tipo de modelo a utilizar es importante tener presente que este trabajo de tesis fue requerido por la empresas Poch by WSP y Eco Hispánica con el objetivo de poder determinar la energía que es posible generar utilizando como biomasa los residuos sólidos domiciliarios, observando el cómo afecta la composición y flujo de residuos en el proceso de gasificación. Por esto, se debe tener en consideración los parámetros de diseño del gasificador a la hora de seleccionar el modelo a utilizar para la simulación. De esta manera se propone el uso del modelo cinético, considerando dividir el proceso en las siguientes etapas:

- Secado y Pirólisis
- Oxidación
- Reducción

Donde los outputs de las etapas anteriores serán los inputs de las etapas que los siguen.

#### **4.3. Modelación Matemática Gasificador Downdraft**

En esta sección se presenta la modelación matemática y los supuestos utilizados para para realizar la simulación de gasificación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables.

#### 4.3.1. Waste Cleaner

Pese a que según el diagrama de proceso mostrado (ver figura N°13) todos los residuos ingresan al *Waste Cleaner*, para efectos prácticos de la modelación se considera una separación previa que deja de lado todo material distinto a los residuos orgánicos (alimentos), residuos de poda, plásticos, papel y cartón; éstos se consideran como una corriente de biomasa homogénea, obteniéndose los siguientes balances:

Balance de Masa:

$$M_{IN} = M_{OUT}$$

$$M_{IN} = M_{orgánicos} + M_{papel\ y\ cartón} + M_{poda} + M_{plásticos}$$

Ahora, ya con la masa que ingresa al proceso como conocida, se debe calcular la masa en base seca que ingresa al proceso con la finalidad de poder obtener el balance por componentes:

$$M_{DRY} = M_{orgánicos} * (1 - H_{org}) + M_{papel\ y\ cartón} * (1 - H_{PC}) + M_{poda} * (1 - H_{pod}) \\ + M_{plásticos} * (1 - H_{plá})$$

Dónde:

- $H_i$ : Representa el porcentaje de humedad de los materiales i en [%].
- $M_{orgánicos}$ : Corresponde a la masa de orgánicos tipo alimentos que ingresan en [kg/h].
- $M_{papel\ y\ cartón}$ : Corresponde a la masa de papel y cartón que ingresan en [kg/h].
- $M_{poda}$ : Corresponde a la masa de residuos de poda que ingresan en [kg/h].
- $M_{plásticos}$ : Corresponde a la masa de plásticos que ingresan en [kg/h].

Balance de Masa por Componente:

- Carbono Volátil:

$$M_{CV} = \sum_i^n M_{i,seca} * \%Carbono_i * \%Carbono\ Volátil_i$$

- Carbono Fijo:

$$M_{CF} = \sum_i^n M_{i,seca} * \%Carbono_i * \%Carbono Fijo_i$$

- Hidrógeno:

$$M_H = \sum_i^n M_{i,seca} * \%Hidrógeno_i$$

- Oxígeno:

$$M_O = \sum_i^n M_{i,seca} * \%Oxígeno_i$$

Dónde:

- $M_{i,seca}$ : Corresponde a la masa seca que ingresa del componente i en  $[kg/h]$ .
- $\%Carbono_i$ : Corresponde al porcentaje de carbono del componente i que ingresa [%].
- $\%Hidrógeno_i$ : Corresponde al porcentaje de hidrógeno del componente i que ingresa [%].
- $\%Oxígeno_i$ : Corresponde al porcentaje de oxígeno del componente i que ingresa [%].
- $\%Carbono Volátil_i$ : Corresponde al porcentaje de carbono volátil del componente i [%].
- $\%Carbono Fijo_i$ : Corresponde al porcentaje de carbono fijo del componente i [%].

De esta manera es posible obtener la cantidad de masa que corresponde a carbono, hidrógeno, oxígeno y agua que ingresan al proceso.

Como supuestos para la modelación del *waste cleaner*, se considera para efectos de la modelación que el proceso sólo genera la homogenización de la biomasa y una pérdida de humedad, mas no cambia su composición química u otras propiedades, este punto es importante analizar, ya que teóricamente debiese haber perdida de componentes volátiles por lo que la composición química de los residuos debería variar, por lo que se recomienda analizar en trabajos futuros.

#### 4.3.2. Formulación Química

La biomasa utilizada corresponde a una compleja mezcla de materiales orgánicos que consisten principalmente en oxígeno, hidrógeno y carbono; existen diversos métodos para determinar una formulación química aproximada. Uno de estos métodos está basado en el uso de los análisis de composición de la biomasa en base seca como el realizado para el *Waste Cleaner*, por lo tanto, se le utilizará para el cálculo de la fórmula química aproximada de la biomasa [19]:

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la fórmula típica de la biomasa tendrá la siguiente forma:  $C_c H_h O_o + w H_2 O$

Para calcular los coeficientes c, h y o se utilizó la siguiente metodología [19], la cual utiliza como base de cálculo la composición de carbono como uno:

$$c = 1$$

$$h = \frac{\%H * PM_c}{\%C * PM_h}$$

$$o = \frac{\%O * PM_c}{\%C * PM_o}$$

Dónde:

- $\%H$ : Corresponde a los porcentajes masa del hidrógeno respecto a la biomasa en base seca.
- $\%O$ : Corresponde a los porcentajes masa del oxígeno respecto a la biomasa en base seca.
- $\%C$ : Corresponde a los porcentajes masa del carbono respecto a la biomasa en base seca.
- $PM_c$ : Corresponde al peso molecular del carbono en  $[g/mol]$ .
- $PM_o$ : Corresponde al peso molecular del oxígeno en  $[g/mol]$ .
- $PM_h$ : Corresponde al peso molecular del hidrógeno en  $[g/mol]$ .

Para obtener el coeficiente w correspondiente a los moles de agua presentes en la biomasa, primero se calcula la humedad de la biomasa como se presenta a continuación:

$$\%Humedad = \frac{M_{agua}}{M_{biomasa}} = \frac{M_{agua}}{M_{biomasa\ seca} + M_{agua}}$$

Luego es posible utilizar la misma expresión anterior para obtener el coeficiente estequiométrico W:

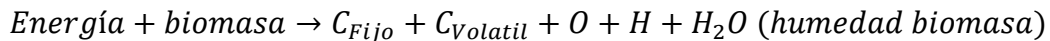
$$W = \frac{\%Humedad * PM_{biomasa}}{(1 - \%Humedad) * PM_{agua}}$$

Finalmente para estimar el peso molecular de la biomasa se utilizan los coeficientes h, o y c obtenidos anteriormente mediante la siguiente expresión:

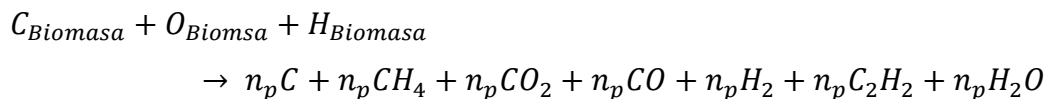
$$PM_{biomasa} = PM_c * c + PM_H * h + PM_o * o$$

#### 4.3.3. Modelación Zona de Secado y Pirólisis

Esta zona corresponde a la parte superior del reactor, donde principalmente ocurre el proceso de pirólisis, el que se puede representar mediante la siguiente reacción general:



Se debe tener en consideración que en la zona de pirolisis sólo interactúan en las reacciones y disociaciones los componentes volátiles de la biomasa, mientras que el carbono no volátil (*char*) y la humedad presentes en la biomasa quedarán sin reaccionar, pasando de forma directa a la zona N°2 o de Oxidación.



#### **Balance de Masa:**

$$C_{BV} = n_p C + n_p CH_4 + n_p CO_2 + n_p CO + 2 * n_p C_2H_2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& 2 * n_{H_2O} (\text{humedad biomasa}) + H_{BV} \\
& = 2 * n_p H_2 + 2 * n_p C_2 H_2 + 2 * n_p H_2 O + 4 * n_p CH_4 \quad (2) \\
& n_{H_2O} (\text{humedad biomasa}) + O_{BV} \\
& = 2 * n_p CO_2 + n_p CO + n_p H_2 O \quad (3)
\end{aligned}$$

Dónde:

- $n_p i$ : Corresponden a los moles generados por el proceso de pirólisis para el componente i en [mol].
- $C_{BV}$ : Corresponden al carbono volátil de la biomasa en [mol].
- $n_{H_2O}$ : Corresponden a lo moles de agua presentes en la biomasa en [mol]

Para poder resolver los balances de masa de la zona de secado y pirólisis se utilizaron los siguientes supuestos [20]:

- 40% del oxígeno de la biomasa reacciona con el carbono (volátil) para formar  $CO_2$  y  $CO$ .
- El 60% restante del oxígeno reacciona con el hidrógeno para formar  $H_2O$
- La razón de formación de moles de  $CO_2$  y  $CO$  es inversamente proporcional a sus masa moleculares:

$$\frac{n_p CO}{n_p CO_2} = \frac{44}{28}$$

- 40% del hidrógeno disponible es liberado como  $H_2$ .
- El 60% restante reacciona con el carbono (volátil) para formar  $CH_4$  y  $C_2H_2$ .
- La razón de formación de moles de  $CH_4$  y  $C_2H_2$  es inversamente proporcional a sus masas moleculares:

$$\frac{n_p CH_4}{n_p C_2 H_2} = \frac{26}{16}$$

- Existe una pérdida del 15% de la energía al ambiente respecto de la situación inicial.

- La entalpía de formación de la biomasa se obtendrá a partir de la relación de Seyler (1938):

$$H_{f,biomasa} = 0,519 * c + 1,625 * h + 0,001 * o^2 - 17,87 [MJ/kg]$$

Donde C, H y O corresponden a la cantidad de carbono, hidrógeno y oxígeno obtenidos de la fórmula de la biomasa.

Al realizar el balance de masa tomando en consideración las suposiciones propuestas se obtuvo la cantidad de cada uno de los compuestos en que se transforma la biomasa luego del proceso de pirólisis en moles.

### **Balance de Energía:**

$$n_{Biomasa} * \overline{H_{fB}} + m_{agua} * \overline{H_{fH_2O}} = n_p C * \overline{H_{fC}} + n_p CH_4 * \overline{H_{fCH_4}} + n_p CO_2 * \overline{H_{fCO_2}} + n_p CO * \overline{H_{fCO}} + n_p H_2 * \overline{H_{fH_2}} + n_p C_2H_2 * \overline{H_{fC_2H_2}} + (n_p H_2O + n_{Humedad} H_2O) * \overline{H_{fH_2O}}$$

$$\overline{H_f} = H_{f,i}^\circ + \int_{T_{ref}}^T C_p dT$$

Y además

$$C_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3$$

Donde

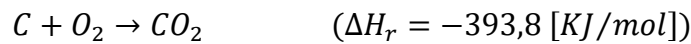
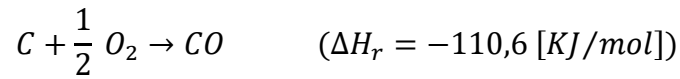
- $\overline{H_{f,i}}$ : Corresponde a la entalpía de formación de la especie i en [J/mol].
- $C_p$ : Corresponde al calor específico en [J/mol K].
- $T_{ref}$ : Corresponde a la temperatura de referencia 298 [K].
- $n_{pi}$ : Corresponden a los moles generados por el proceso de pirólisis para el componente i en [mol].
- $T$ : Corresponde a la temperatura de pirólisis en [K].

Del balance de energía se obtuvo la temperatura a la que se llevan a cabo las reacciones de pirólisis.

#### 4.3.4. Modelación Zona de Oxidación

Esta zona es representada por la sección media del gasificador y en ésta ocurren reacciones de oxidación y oxidación parcial; para esto se inyecta aire para otorgar el oxígeno a la reacción, es importante tener en cuenta que el oxígeno que ingresa al sistema está en déficit en relación con la cantidad estequiométrica requerida para una oxidación total de los componentes. A continuación se presentan las ecuaciones que toman lugar en esta zona:

Reacciones de oxidación:



En esta zona reaccionan los componentes tanto sólidos como gaseosos de la biomasa a diferencia de lo que sucedía en el proceso de pirólisis.

#### **Balance de Masa:**

$$\begin{aligned} n_{BF}C + n'_pC + n_pCH_4 + n_pCO_2 + n_pCO + 2 * n_pC_2H_2 \\ = n'_{ox}C + n'_{ox}CH_4 + n'_{ox}CO_2 + n'_{ox}CO + 2 * n'_{ox}C_2H_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 2 * n_pH_2 + 2 * n_pC_2H_2 + 2 * n_pH_2O + 4 * n_pCH_4 \\ = 2 * n_{ox}H_2 + 2 * n_{ox}C_2H_2 + 2 * n_{ox}H_2O + 4 * n_{ox}CH_4 \end{aligned} \quad (2)$$

$$2 * n_pCO_2 + n_pCO + n_pH_2O + 2a = 2 * n_{ox}CO_2 + n_{ox}CO + n_{ox}H_2O \quad (3)$$

$$2a * 3,76 = n_{ox}N_2 \quad (4)$$

$$C_{Biomasa} + O_{Biomasa} + H_{Biomasa} + b * O_2 \rightarrow c * CO_2 + d * H_2O \quad (5)$$

$$a = b * Beta \quad (6)$$

Dónde:

- $n_{ox}i$ : Corresponden a los moles generados del componente  $i$  por el proceso de oxidación parcial en [mol].
- $n_pi$ : Corresponden a los moles generados por el proceso de pirólisis para el componente  $i$  en [mol].
- $b$ : Corresponde al coeficiente estequiométrico de oxígeno para generar una oxidación total del gas de pirólisis.
- $Beta$ : Corresponde al factor que regula la cantidad de oxígeno estequiométrico.
- $a$ : Corresponde al coeficiente estequiométrico final de oxígeno a ingresar al gasificador e inferior a la cantidad estequiométrica.
- $C_{Biomasa}$ : Corresponde a la cantidad de carbono en la biomasa en [mol].
- $O_{Biomasa}$ : Corresponde a la cantidad de oxígeno en la biomasa en [mol].
- $H_{Biomasa}$ : Corresponde a la cantidad de hidrógeno en la biomasa en [mol].

Para poder resolver los balances de masa de la zona de oxidación se utilizaron los siguientes supuestos [20]:

- El  $H_2$  formado en la pirólisis es completamente oxidado para formar  $H_2O$ .
- El  $C_2H_2$  es completamente oxidado para formar  $H_2O$  y  $CO_2$ .
- El  $O_2$  remanente es utilizado en la combustión del *char* (carbono fijo).
- El razón de formación de  $CO_2$  y  $CO$  es inversamente proporcional a la exotermicidad de su reacción:

$$\frac{n_p CO}{n_p CO_2} = 3,561$$

- El  $CH_4$  formado en la zona de pirólisis es el mismo que el de la zona de oxidación.
- El  $N_2$  es considerado como un gas inerte.

- Esta zona se considera adiabática por lo que no presenta pérdidas de calor.
- El aire está compuesto por 21% por oxígeno y 79% por nitrógeno.

Al realizar el balance de masa, tomando en consideración las suposiciones propuestas, se obtuvo la cantidad de cada uno de los compuestos resultantes del proceso de oxidación parcial de los compuestos obtenidos de las reacciones de pirólisis en moles.

### **Balance de Energía:**

$$n_p C * \overline{H_{fC}} + n_p CH_4 * \overline{H_{fCH_4}} + n_p CO_2 * \overline{H_{fCO_2}} + n_p CO * \overline{H_{fCO}} + n_p H_2 * \overline{H_{fH_2}} + \\ n_p C_2H_2 * \overline{H_{fC_2H_2}} + (n_p H_2O + n_{Humedad} H_2O) * \overline{H_{fH_2O}} + 2a * 3,76 * \overline{H_{fN_2}} = n_{ox} C * \\ \overline{H_{fC}} + n_{ox} CH_4 * \overline{H_{fCH_4}} + n_{ox} CO_2 * \overline{H_{fCO_2}} + n_{ox} CO * \overline{H_{fCO}} + n_{ox} H_2 * \overline{H_{fH_2}} + n_{ox} C_2H_2 * \\ \overline{H_{fC_2H_2}} + n_{ox} H_2O * \overline{H_{fH_2O}} + n_{ox} N_2 * \overline{H_{fN_2}}$$

Donde

$$\overline{H_{f,i}} = H_{f,i}^{\circ} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT$$

Y además

$$C_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3$$

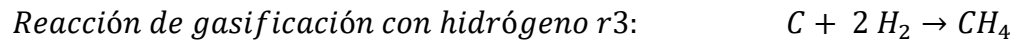
Dónde:

- $\overline{H_{f,i}}$ : Corresponde a la entalpía de formación de la especie i en [J/mol].
- $C_p$ : Corresponde al calor específico en [J/mol K].
- $T_{ref}$ : Corresponde a la temperatura de referencia 298 [K].
- $n_p i$ : Corresponden a los moles generados por el proceso de pirólisis para el componente i en [mol].
- $n_{ox} i$ : Corresponden a los moles generados del componente i por el proceso de oxidación parcial en [mol].
- $T$ : Corresponde a la temperatura de oxidación en [K].

Del balance de energía se obtuvo la temperatura a la que se llevan a cabo las reacciones de oxidación parcial de la biomasa.

#### 4.3.5. Modelación Zona de Reducción

Esta zona es representada por la sección inferior del gasificador y en ésta ocurren reacciones de reducción; en esta zona se presentan múltiples reacciones que compiten entre sí, pero existen cuatro reacciones que prevalecen sobre las demás las cuales son [21]:



Y su cinética de reacción se puede representar mediante las siguientes expresiones en función de las presiones parciales [21]:

$$r1: (CRF) * A_1 * EXP \left[ \left( \frac{-E_1}{R * Tr} \right) * \left( P_{CO_2} - \frac{P_{CO}^2}{K_{1eq}} \right) \right] \quad (1)$$

$$r2: (CRF) * A_2 * EXP \left[ \left( \frac{-E_2}{R * Tr} \right) * \left( P_{H_2O} - \frac{P_{CO} P_{H_2}}{K_{2eq}} \right) \right] \quad (2)$$

$$r3: (CRF) * A_3 * EXP \left[ \left( \frac{-E_3}{R * Tr} \right) * \left( P_{H_2}^2 - \frac{P_{CH_4}}{K_{3eq}} \right) \right] \quad (3)$$

$$r4: (CRF) * A_4 * EXP \left[ \left( \frac{-E_4}{R * Tr} \right) * \left( P_{CH_4} * P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^3 P_{CO}}{K_{4eq}} \right) \right] \quad (4)$$

Dónde:

- $CRF$ : Corresponde al factor de reactividad del *char*.
- $E_i$ : Corresponde a la energía de activación de la reacción  $i$  en  $[J/mol]$ .
- $P_i$ : Corresponde a la presión parcial del componente  $i$  en  $[Pa]$ .
- $K_{i,eq}$ : Corresponde a la constante de equilibrio de la reacción  $i$ .

- $R$ : Corresponde a la constante de los gases ideales en  $[j/mol\ K]$ .
- $T_r$ : Corresponde a la temperatura de reducción en  $[K]$ .

Donde para cada una de las reacciones se tiene:

- **Obtención  $K_{eq}$ :**

Para esta se utiliza la siguiente correlación [19]:

$$\ln(K_{eq}) = \frac{-J}{R * T_r} + \Delta A * \ln(T_r) + \frac{\Delta B}{2} * T_r + \frac{\Delta C}{6} * T_r^2 + \frac{\Delta D}{2 * T_r^2} + I \quad (5 - 8)$$

Dónde:

- $J, \Delta A, \Delta B, \Delta C, \Delta D$  e  $I$ : Corresponden a constantes termodinámicas particulares para los mecanismos de reacción (ver ANEXO A).
- $R$ : Corresponde a la constante de los gases ideales en  $[j/mol\ K]$ .

- **Presiones Parciales:**

$$P_i = \frac{n_{ri} * R * T_r}{V_{gasificador}} \quad (9 - 14)$$

Presión en la Zona de Gasificación:

$$P = P_{CO_2} + P_{CO} + P_{H_2} + P_{CH_4} + P_{H_2O} + P_{N_2} \quad (15)$$

Dónde:

- $n_{ri}$ : Corresponde a los moles del componente  $i$  en  $[mol]$ .
- $R$ : Corresponde a la constante de los gases ideales en  $[j/mol\ K]$ .
- $V_{gasificador}$ : Corresponde al volumen del gasificador en  $[m^3]$ .
- $T_r$ : Corresponde a la temperatura de reducción en  $[K]$ .

- **El Coeficiente de Reactividad del Char (CRF) :**

El coeficiente de reactividad se aproxima de manera experimental a los siguiente [20]:

$$CRF = 100 \quad (16)$$

Finalmente, al conocer los parámetros de las cinéticas se procede a realizar los balances de masa y energía del sistema como se presenta a continuación:

### **Balances de Masa:**

$$n_{ox,N_2} = n_{r,N_2} \quad (17)$$

$$\frac{dn'_c}{dz} = \frac{1}{v} * \left( R_c - n'_c \frac{dv}{dz} \right) \quad (18)$$

$$\frac{dn'_{co}}{dz} = \frac{1}{v} * \left( R_{co} - n'_{co} \frac{dv}{dz} \right) \quad (19)$$

$$\frac{dn'_{co_2}}{dz} = \frac{1}{v} * \left( R_{co_2} - n'_{co_2} \frac{dv}{dz} \right) \quad (20)$$

$$\frac{dn'_{H_2}}{dz} = \frac{1}{v} * \left( R_{H_2} - n'_{H_2} \frac{dv}{dz} \right) \quad (21)$$

$$\frac{dn'_{H_2O}}{dz} = \frac{1}{v} * \left( R_{H_2O} - n'_{H_2O} \frac{dv}{dz} \right) \quad (22)$$

$$\frac{dn'_{CH_4}}{dz} = \frac{1}{v} * \left( R_{CH_4} - n'_{CH_4} \frac{dv}{dz} \right) \quad (23)$$

Dónde

- $n'_i$ : Corresponde a la concentración del componente i en  $[mol/m^3]$ .
- $R_i$ : Corresponde a la tasa de generación de moles de la especie i en  $[mol/m^3 \text{ s}]$ .
- $v$ : Corresponde a la velocidad del gas en el gasificador en  $[m/s]$ .

### **Balance de Energía:**

$$\frac{dT_r}{dz} = \frac{1}{v * \sum n'_i C_i} * \left[ \sum r_i \Delta H r_i + v * \frac{dP}{dz} + P * \frac{dv}{dz} + \sum R_i C_i * T_r \right] \quad (24)$$

Con el diferencial de la presión y la velocidad representados como:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{P - P_0}{Z_{gas}} \quad (25)$$

$$\frac{dv}{dz} = \frac{v - v_0}{Z_{gas}} \quad (26)$$

Dónde

- $P$ : Corresponde a la presión del gasificador en [Pa].
- $P_0$ : Corresponde a la presión del gasificador en el nodo anterior en [Pa].
- $v$ : Corresponde a la velocidad del gas en el gasificador en [m/s].
- $v_0$ : Corresponde a la velocidad del gas en el gasificador en el nodo anterior en [m/s].

Para representar la caída de presión dentro del gasificador utilizaremos la ecuación de Ergun modificada según resultados experimentales obtenidos [21]:

$$\frac{dP}{dz} = 1.183 * \left( \rho_{gas} \frac{v^2}{\rho_{aire}} \right) + 388,19 * v - 79.896 \quad (27)$$

Dónde:

- $\rho_{gas}$ : Corresponde a la densidad del gas de síntesis en [kg/m<sup>3</sup>].
- $\rho_{aire}$ : Corresponde a la densidad del aire de síntesis en [kg/m<sup>3</sup>].
- $v$ : Corresponde a la velocidad del gas en el gasificador en [m/s].

Mientras que las densidades del aire y del gas fueron calculadas mediante la siguiente metodología:

- **Densidad del aire:** para ésta se supone que el aire está compuesto por nitrógeno; esta suposición se basa en que el 79% de éste es nitrógeno y se desprecia las otras especies.

$$\rho_{aire} = \frac{P_{N_2}}{R * T_r} \quad (28)$$

Dónde:

- $P_{N_2}$ : Corresponde a la presión parcial del nitrógeno en [Pa].

- $R$ : Corresponde a la constante de los gases ideales en  $[J/mol\ K]$ .
- $T_r$ : Corresponde a la temperatura de reducción en  $[K]$ .

• **Densidad del gas de síntesis:**

$$\rho_{gas} = \sum_i^n n'_i * PM_i \quad (29)$$

Dónde:

- $n'_i$ : Corresponden a los moles de la especie  $i$  que forma parte del gas de síntesis en  $[mol/m^3]$ .
- $PM_i$ : Corresponde a el peso molecular de la especie  $i$  que forma parte de gas de síntesis en  $[g/mol]$ .

**Cambio de Velocidad:**

$$\frac{dv}{dz} = \frac{1}{\sum n'_i C_i + R * n_{Totales}} * \left[ \frac{\sum n'_i C_i * \sum R_i}{n_{Totales}} - \frac{\sum r_i \Delta H r_i}{T_r} - \sum R_x C_x - \frac{dP}{dz} * \left( \frac{v}{T} + \frac{v}{P} * \sum n'_i C_i \right) \right] \quad (30)$$

Dónde:

- $n'_i$ : Corresponde a la concentración del componente  $i$  en  $[mol/m^3]$ .
- $R_i$ : Corresponde a la tasa de generación de moles de la especie  $i$  en  $[mol/m^3\ s]$ .
- $v$ : Corresponde a la velocidad del gas en el gasificador en  $[m/s]$ .
- $z$ : Corresponde a la altura del gasificador en  $[m]$ .
- $r_i$ : Corresponde al velocidad de la reacción en  $[mol/m^3\ s]$ .
- $\Delta H r_i$ : Corresponde a la entalpía de reacción en  $[J/mol]$ .
- $T_r$ : Corresponde a la temperatura de reducción en  $[K]$ .
- $C_x$ : Corresponde al calor específico molar en  $[J/mol\ K]$ .
- $\rho_{gas}$ : Corresponde a la densidad del gas de síntesis en  $[kg/m^3]$ .

- $\rho_{aire}$ : Corresponde a la densidad del aire de síntesis en  $[kg/m^3]$ .
- $Z_{gas}$ : Corresponde a la altura de la zona de gasificación en  $[m]$ .
- $P$ : Corresponde a la presión del gasificador en  $[Pa]$ .

Para poder resolver los balances de masa de la zona de oxidación se utilizaron los siguientes supuestos [20]:

- Se considera que los gases se comportan como gases ideales.
- Se considera que el coeficiente de reactividad del *char* es constante a lo largo de la zona de gasificación, tomando un valor igual al cien.

Al resolver el sistema de ecuaciones que modelan la zona de gasificación, se obtuvo la temperatura de la zona de reducción y la composición molar del gas de síntesis generado del proceso.

#### 4.3.6. Potencia Eléctrica

Para obtener la potencia eléctrica generada se transformaron los moles obtenidos de cada uno de los componentes a masa, mediante la siguiente expresión:

$$m'_i = n'_i * PM_i$$

Luego, se obtuvo el porcentaje másico de cada uno de los componentes, mediante la siguiente expresión:

$$\% \text{ Másico}_i = \frac{m'_i}{m'_{Total}}$$

Dónde:

- $n'_i$ : Corresponde a la concentración del componente i en  $[mol/m^3]$ .
- $m'_i$ : Corresponde a la concentración del componente i en  $[kg/m^3]$ .
- $m'_{Total, Base Seca}$ : Corresponde a la suma de la masa de todos los componentes del gas de síntesis.
- $\% \text{ Másico}_i$ : Corresponde al porcentaje másico del componente i del gas de síntesis en  $[\%]$ .

Ahora, es necesario obtener el flujo másico que efectivamente se transformará en gas de síntesis y para esto se debe restar la masa de cenizas generadas, humedad y Flujo de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) retirados en la depuración del gas. A continuación se presenta la expresión con que se obtiene el flujo:

$$F_{gasificador} = F_{in} * \%_{organicos} + F_{in} * \%_{podas} + F_{in} * \%_{plástico} + F_{in} * \%_{papel\ y\ cartón}$$

$$F_{cenizas} = F_{gasificador} * \sum \%_{cenizas,i}$$

$$F_{efectivo\ de\ gas} = F_{gasificador} - F_{cenizas} - F_{CO_2} - F_{H_2O}$$

Dónde:

- $F_{in}$ : Corresponde flujo másico que ingresa al proceso de separación en  $[kg/s]$ .
- $F_{gasificador}$ : Corresponde al flujo másico que efectivamente ingresa al proceso de gasificación luego de la separación en  $[kg/s]$ .
- $F_{cenizas}$ : Corresponde al flujo másico de las cenizas formadas en el proceso de gasificación en  $[kg/s]$ .
- $F_{CO_2}$ : Corresponde al flujo másico de dióxido de carbono retirado en el tratamiento y acondicionamiento del gas  $[kg/s]$ .
- $F_{H_2O}$ : Corresponde al flujo másico de agua retirada en el tratamiento y acondicionamiento del gas  $[kg/s]$ .
- $\%_{cenizas,i}$ : Corresponde al porcentaje de cenizas por componente i en [%].
- $F_{efectivo\ de\ gas}$ : Corresponde al flujo que efectivamente se convertirá en gas de síntesis en  $[kg/s]$ .

Ya con el flujo de efectivo de gas de síntesis generado, es necesario obtener el PCI del gas. A continuación se presenta la expresión para la obtención de este:

$$PCI_{gas} = \sum \%_{Másico_i} * PCI_i \quad [31]$$

Finalmente, para obtener la potencia, se obtuvo la masa de cada uno de los componentes del gas de síntesis y se multiplicó por su poder calorífico inferior, como se presenta a continuación:

$$\text{Potencia Eléctrica MCI} = F_{\text{efectivo de gas}} * PCI_{\text{gas}} * \eta_{\text{Motor}}$$

Dónde:

- $F_{\text{efectivo}}$ : Corresponde al flujo que efectivamente se convertirá en gas de síntesis en  $[kg/s]$ .
- $F_{\text{gasificación},i}$ : Corresponde a el flujo másico de cada componente del gas de síntesis en  $[kg/s]$ .
- $\% \text{ Másico}_i$ : Corresponde al porcentaje másico del componente i del gas de síntesis en  $[\%]$ .
- $PCI_i$ : Corresponde al poder calorífico inferior del componente i del gas en  $[MJ/kg]$ .
- $PCI_{\text{gas}}$ : Corresponde al poder calorífico inferior del gas de síntesis en  $[MJ/kg]$ .
- $\eta_{\text{Motor}}$ : Corresponde a la eficiencia de conversión eléctrica del motor.
- $\text{Potencia Eléctrica MCI}$ : Corresponde a la potencia generada por el motor de combustión interna bajo las condiciones de entrada en  $[MW]$ .

#### 4.3.7. Aprovechamiento Energético Calor Sensible de la Corriente de Gases

Como se menciona en la sección 3.6.4 del presente trabajo, es posible aprovechar el calor sensible de la corriente de gases. En general, diversos autores plantean el aprovechamiento de esta corriente para precalentar otras corrientes del proceso con la finalidad de hacer más eficiente y sustentable el proceso. A continuación se presentan los balances para determinar la masa de gas, considerando este tipo de aprovechamiento.

Primero, se requiere obtener el calor disponible, que corresponde a cuánto calor se debe traspasar para que la corriente de gases baje desde la temperatura de gasificación a temperaturas cercanas a 250  $^{\circ}\text{C}$ :

$$Q_{\text{disponible}} = (F_{\text{gasificador}} - F_{\text{cenizas}}) * Cp_{\text{gas de síntesis}} * (T_{\text{gasificación}} - T_{\text{gas frío}})$$

Luego, con el calor disponible se debe calcular cuánto flujo de vapor saturado es posible generar a partir de este calor para ser utilizado en procesos de la planta, mediante el siguiente balance:

$$Q_{disponible} = F_{vapor} * (Cp_{agua} * (T_{sat} - T_{amb}) + \lambda)$$

$$F_{vapor} = \frac{Q_{disponible}}{(Cp_{agua} * (T_{sat} - T_{amb}) + \lambda)}$$

Donde:

- $F_{gasificador}$ : Corresponde al flujo másico que efectivamente ingresa al proceso de gasificación luego de la separación en  $[kg/s]$ .
- $F_{cenizas}$ : Corresponde al flujo másico de las cenizas formadas en el proceso de gasificación en  $[kg/s]$ .
- $Cp_{agua}$ : Corresponde al calor específico del agua a las condiciones ambientales en  $[KJ/Kg\ K]$ .
- $F_{vapor}$ : Corresponde al flujo másico de vapor  $[kg/s]$ .
- $\lambda$ : Corresponde a la energía de cambio de fase en  $[KJ/Kg]$ .
- $Q_{disponible}$ : Corresponde al calor disponible para ser aprovechado en generar vapor  $[kJ/s]$ .

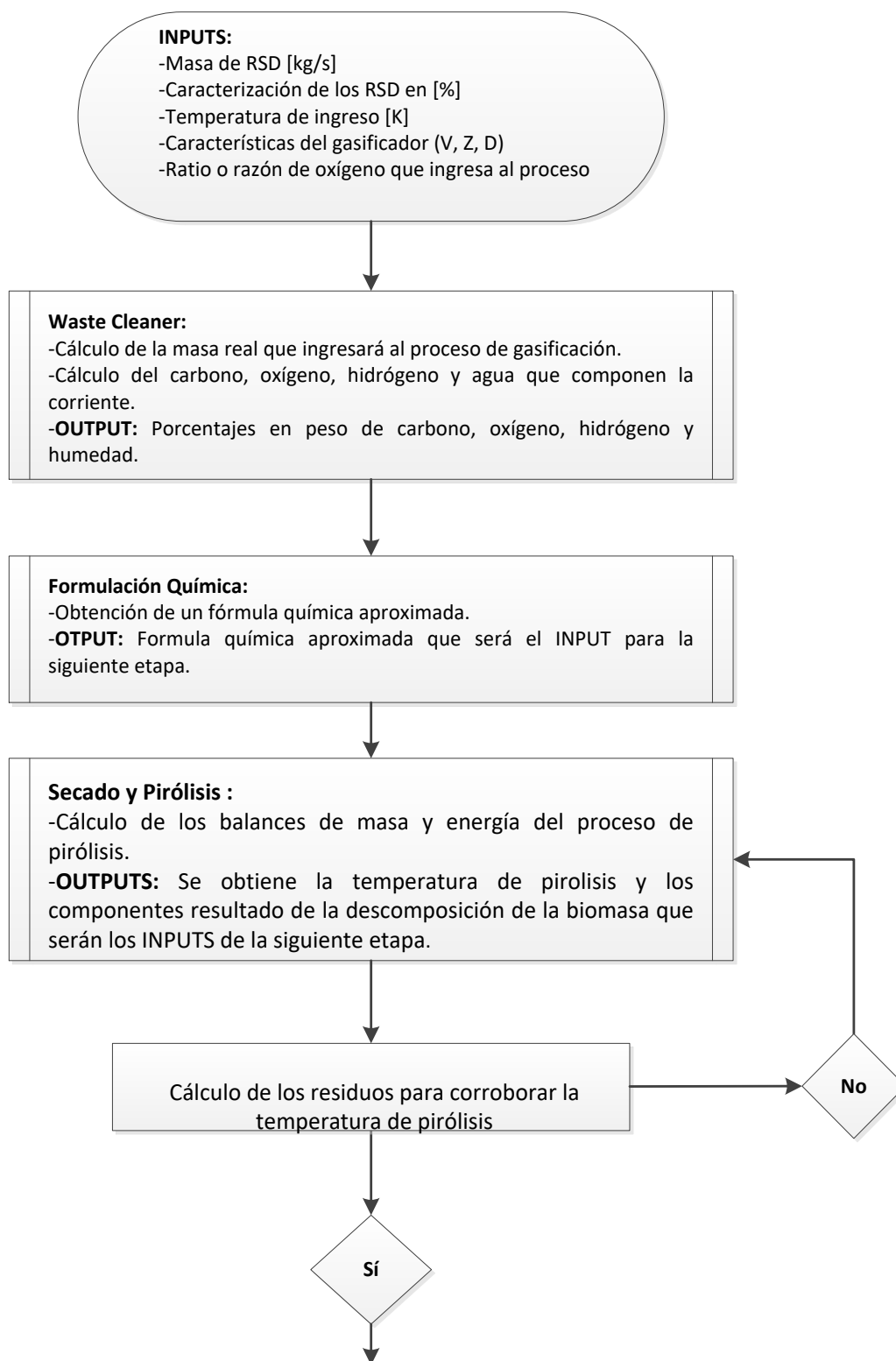
Se debe considerar que este aprovechamiento energético puede también ser utilizado para generar energía eléctrica, pero para efectos de esta memoria no se abordará esta posibilidad.

## 5. Modelación Computacional

Para realizar la modelación computacional se utilizó el software Matlab, que utiliza algoritmos de cálculo iterativos. En particular, se utilizó el método de Newton-Raphson para resolver los sistemas de ecuaciones no lineales y Runge Kutta 4 para resolver los sistemas de ecuaciones diferenciales. A continuación se presenta el algoritmo de resolución utilizado.

### 5.1. Algoritmo de Resolución

A continuación se presenta un esquema del algoritmo de resolución utilizado para obtener la composición y la potencia eléctrica del proceso:



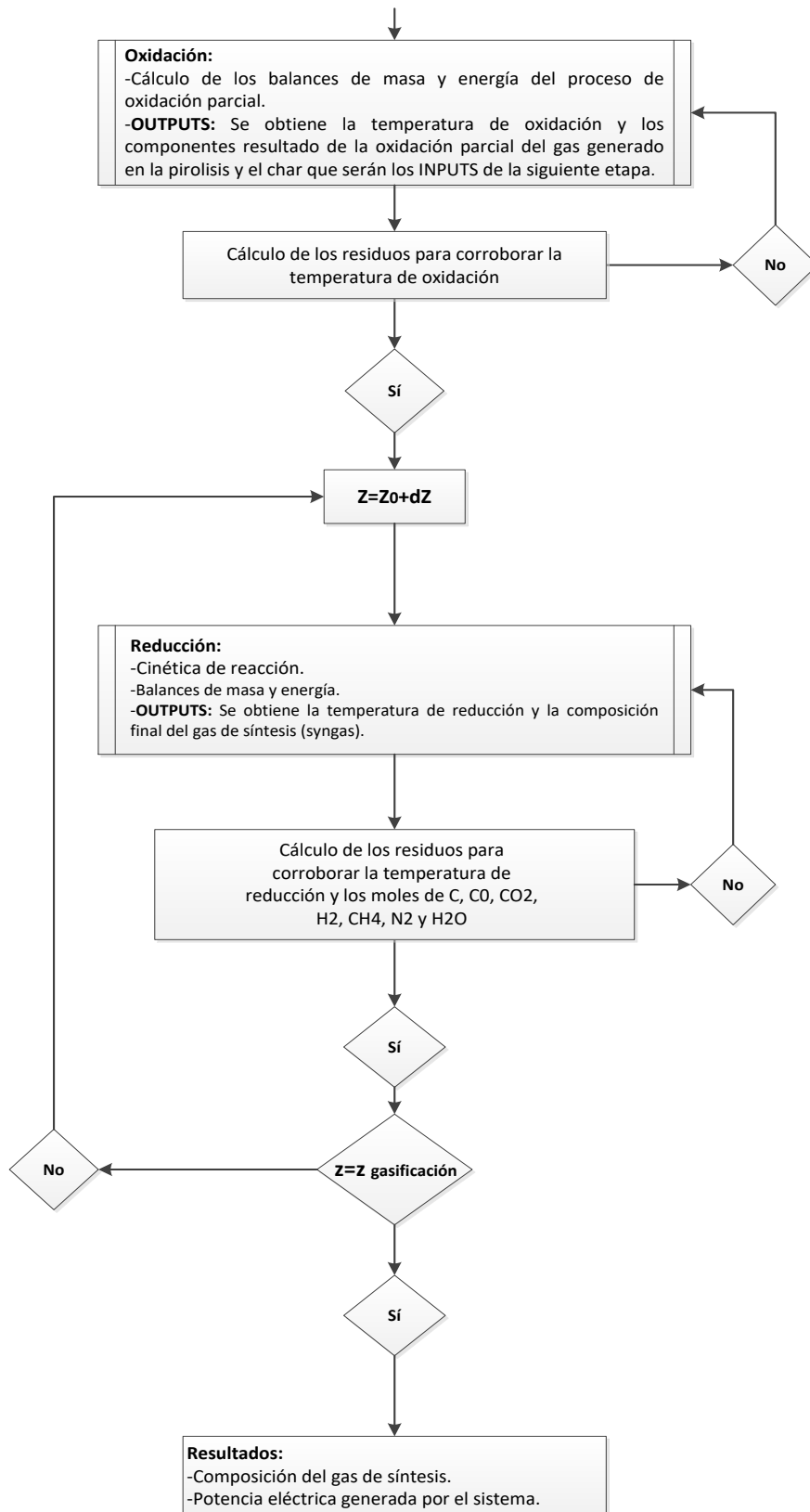


Figura 17: Algoritmo de resolución iterativo (elaboración propia).

## 5.2. Interfaz Excel-Matlab

A continuación, se exhibe la interfaz del programa que utiliza una sinergia entre los software Excel y Matlab, donde se presenta un breve instructivo de uso, con énfasis en el cómo ingresar de los datos y las distintas formas en cómo se muestran los resultados obtenidos.

### 1. Ingreso de Inputs del Proceso

Los inputs requeridos se deben ingresar al archivo Excel “GasificaciónEcoHispanica.xls”, en la pestaña “Datos”. A continuación se presenta en la figura N°18 la interfaz para el ingreso de datos:

| G10                                                                                                                        | : | X                                                  | ✓            | $f_x$         |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|----------------------------------------------------|--------------|---------------|---|
|                                                                                                                            | A | B                                                  | C            | D             | E |
| 1                                                                                                                          |   |                                                    |              |               |   |
| 2                                                                                                                          |   | <b>Datos del Gasificador</b>                       |              |               |   |
| 3                                                                                                                          |   | <b>Ítem</b>                                        | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b> |   |
| 4                                                                                                                          |   | Volúmen                                            | 19           | m³            |   |
| 5                                                                                                                          |   | Altura del Gasificador                             | 6            | m             |   |
| 6                                                                                                                          |   | Diámetro del Gasificador                           | 2            | m             |   |
| 7                                                                                                                          |   |                                                    |              |               |   |
| 8                                                                                                                          |   |                                                    |              |               |   |
| 9                                                                                                                          |   | <b>Parámetros de Entrada</b>                       |              |               |   |
| 10                                                                                                                         |   | <b>Ítem</b>                                        | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b> |   |
| 11                                                                                                                         |   | Ratio de Oxígeno (0,15-0,45)                       | 0,45         | -             |   |
| 12                                                                                                                         |   | Flujo de Residuos                                  | 12000        | kg/s          |   |
| 13                                                                                                                         |   | Temperatura de Ingreso                             | 298          | K             |   |
| 14                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 15                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 16                                                                                                                         |   | <b>Caracterización de los Residuos</b>             |              |               |   |
| 17                                                                                                                         |   | <b>Tipo Residuo</b>                                | <b>Valor</b> | <b>unidad</b> |   |
| 18                                                                                                                         |   | Porcentaje de Plástico                             | 11           | %             |   |
| 19                                                                                                                         |   | Porcentaje de Podas                                | 5            | %             |   |
| 20                                                                                                                         |   | Porcentaje de Orgánicos (alimentos principalmente) | 48           | %             |   |
| 21                                                                                                                         |   | Porcentaje de Metales                              | 11           | %             |   |
| 22                                                                                                                         |   | Porcentaje de Papel y Cartón                       | 10           | %             |   |
| 23                                                                                                                         |   | Porcentaje de Vidrio                               | 7            | %             |   |
| 24                                                                                                                         |   | Porcentaje de Otros                                | 8            | %             |   |
| 25                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 26                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 27                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 28                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 29                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 30                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 31                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| 32                                                                                                                         |   |                                                    |              |               |   |
| <div> <span>←</span> <span>→</span> <span>Datos</span> <span>Resultados</span> <span>Diagrama</span> <span>+</span> </div> |   |                                                    |              |               |   |

Figura 18: Interfaz de ingreso de datos en Excel (elaboración propia).

Luego cerrar Excel, es importante este paso ya que de lo contrario el software Matlab no podrá enviar los resultados a la planilla, produciendo un fallo en el funcionamiento del software al bloquearse el archivo Excel.

## 2. Ejecución del Programa

Para ejecutar el programa abrir Matlab y pinchar el programa “MainTesis.m”, abriéndose el Main o programa de ejecución, es aquí en donde se enlazan todos los subprogramas creados para poder resolverse al unísono. A continuación se presenta en la figura N°19 la vista del programa Main:

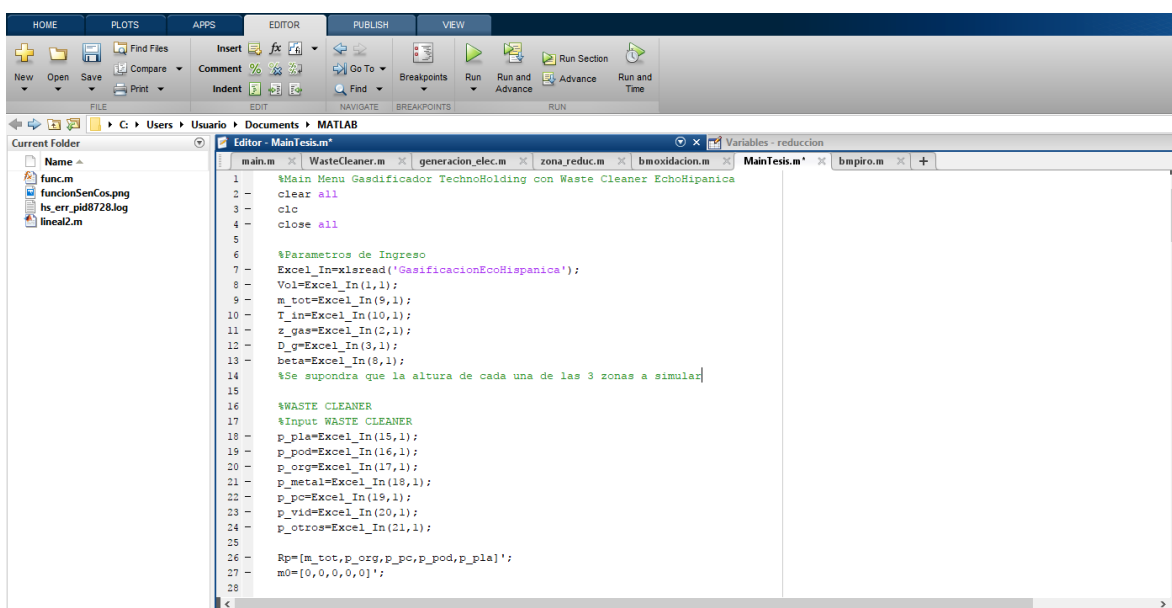


Figura 19: Interfaz Main Matlab (elaboración propia).

Luego, para empezar a ejecutar el programa debe presionar el botón Run en la parte Superior, ubicada en la pestaña de “EDITOR”, como se presenta en la figura N°20:

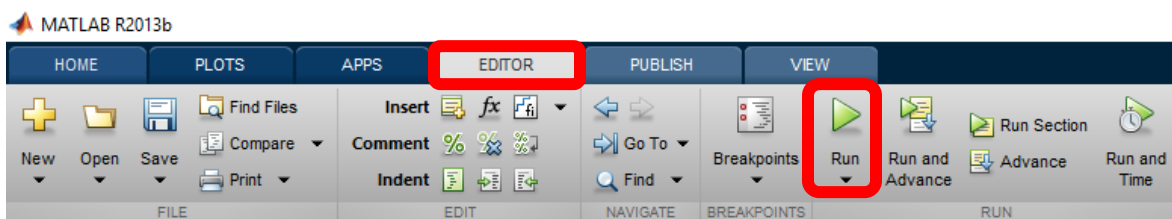


Figura 20: Ubicación del botón Run en Matlab (elaboración propia).

En caso de aparecer el mensaje “MainTesis.m is not found in the current folder to the MATLAB path”, presionar la opción “Change Folder” como se presenta en la figura N°21:

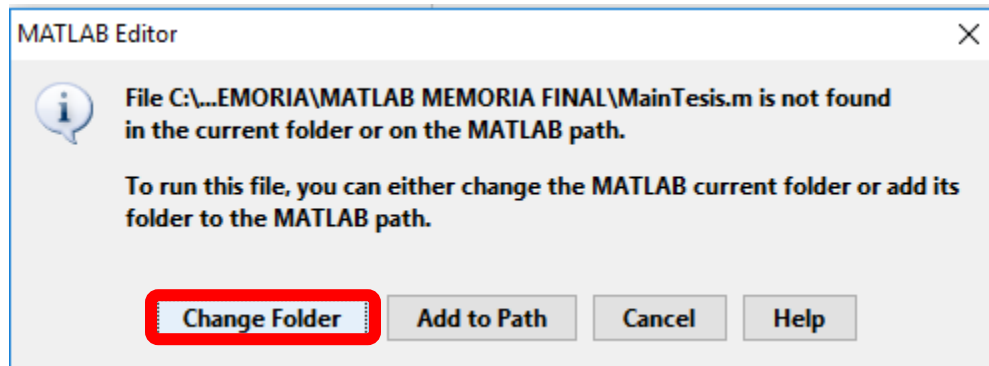


Figura 21: Cambio de locación de carpeta en Matlab (elaboración propia).

En caso contrario el programa se ejecutará sin mostrar ningún mensaje generando los resultados.

### 3. Resultados

Los resultados se entregan de tres diferentes formas:

#### En Interfaz Matlab

Los resultados entregados por la interfaz de Matlab corresponden a las gráficas de la composición másica y molar del gas de síntesis, tanto en base seca como en base húmeda., Además de la potencia que es capaz de entregar el sistema considerando el aprovechamiento del gas de síntesis en un motor de combustión interna. A continuación se presenta en la figura N°22 como se presentan los resultados:

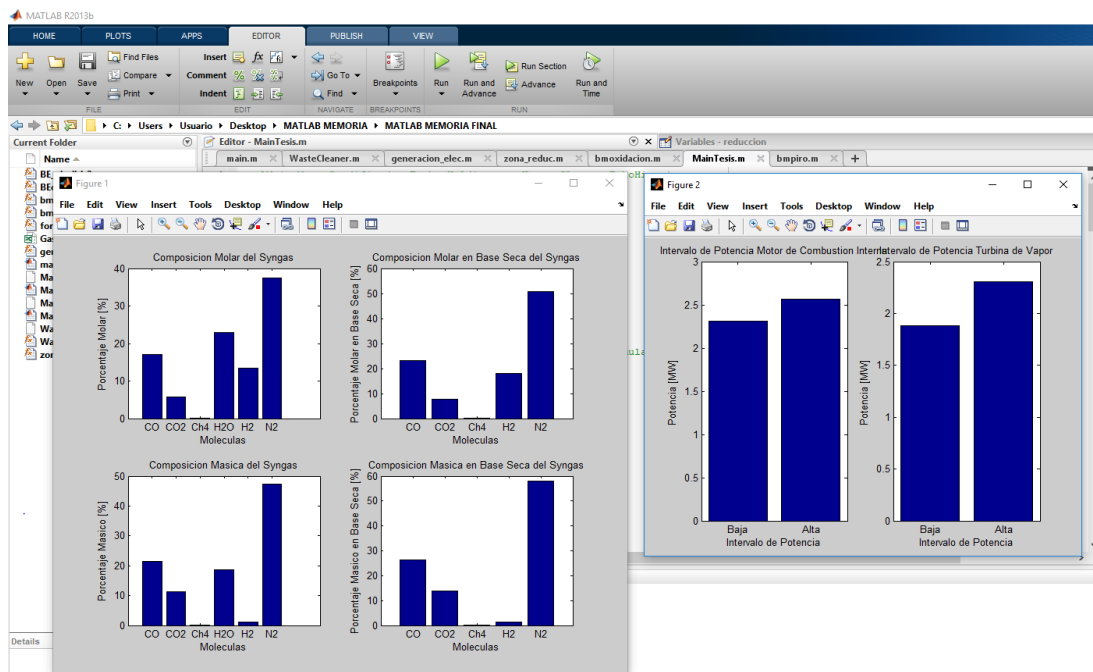


Figura 22: Cambio de locación de carpeta en Matlab (elaboración propia).

## En Interfaz Excel

En la interfaz Excel se presentan los resultados de dos formas diferentes, primero abrir el archivo “GasificacionEcoHispanica.xls” e ir a la pestaña “Resultados” de la planilla, donde se presentan los resultados tabulados y graficados de la composición del gas de síntesis en base másica y molar, además de los rangos de potencia al aprovechar el gas de síntesis mediante motores de combustión interna y turbinas de vapor, como se presenta en la figura N°23:

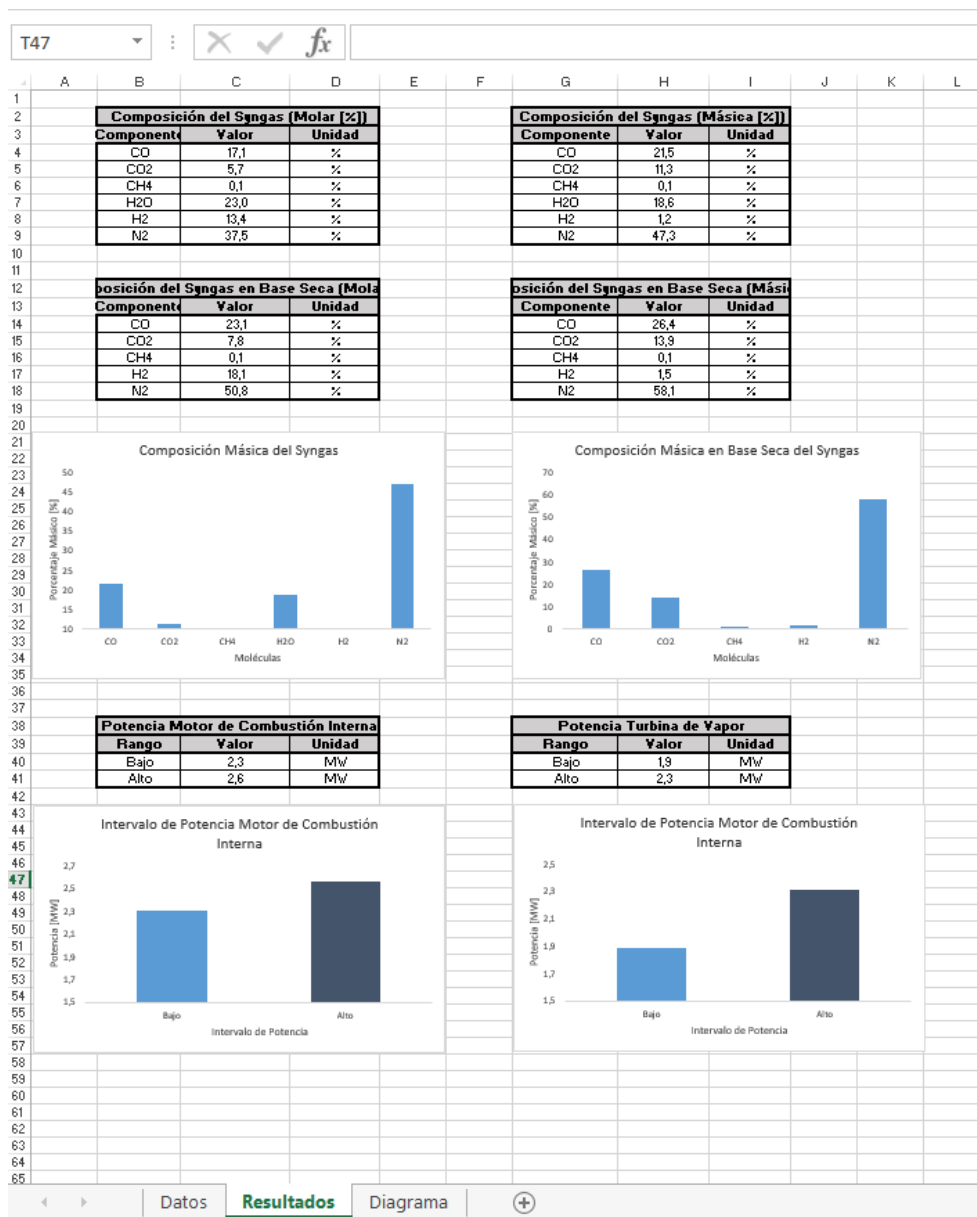


Figura 23: Resultados de la modelación entregados en Excel en la pestaña "Resultados" (elaboración propia).

Con el objetivo de facilitar la comprensión, es que se entregan los datos de manera más grafica en la pestaña "Diagrama" del archivo "GasificacionEcoHispanica.xls", aquí se presenta un diagrama resumido del proceso, donde se presentan las principales corrientes y el cómo evoluciona el porcentaje máscico de cada uno de los componentes del gas de síntesis a lo largo del gasificador en las distintas zonas (Secado y pirólisis, Oxidación y Reducción), además de la potencia al aprovechar el gas de síntesis mediante motores de combustión interna y turbinas de vapor. A continuación en la figura N°24 y 25 se puede visualizar como se entregan los resultados:

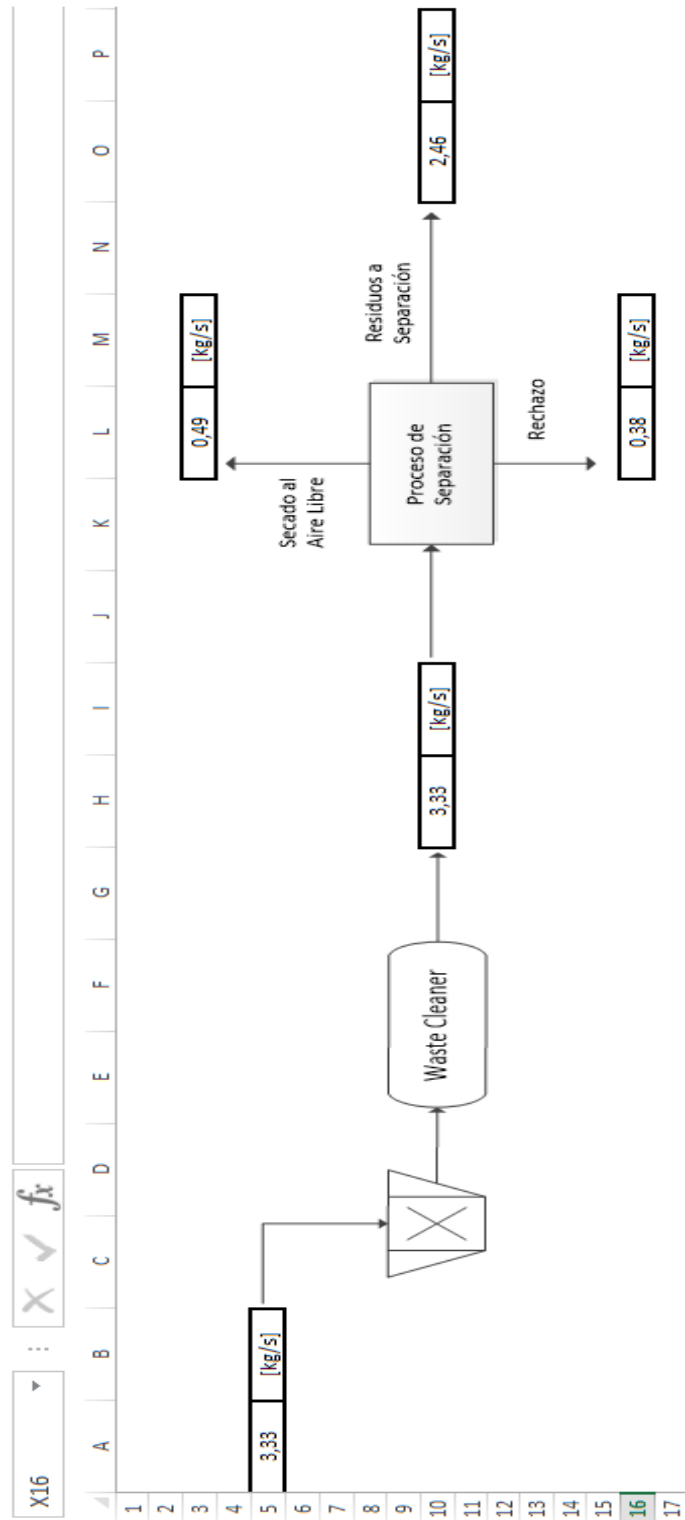


Figura 24: Resultados de la modelación entregados en Excel en la pestaña "Diagrama" (elaboración propia).

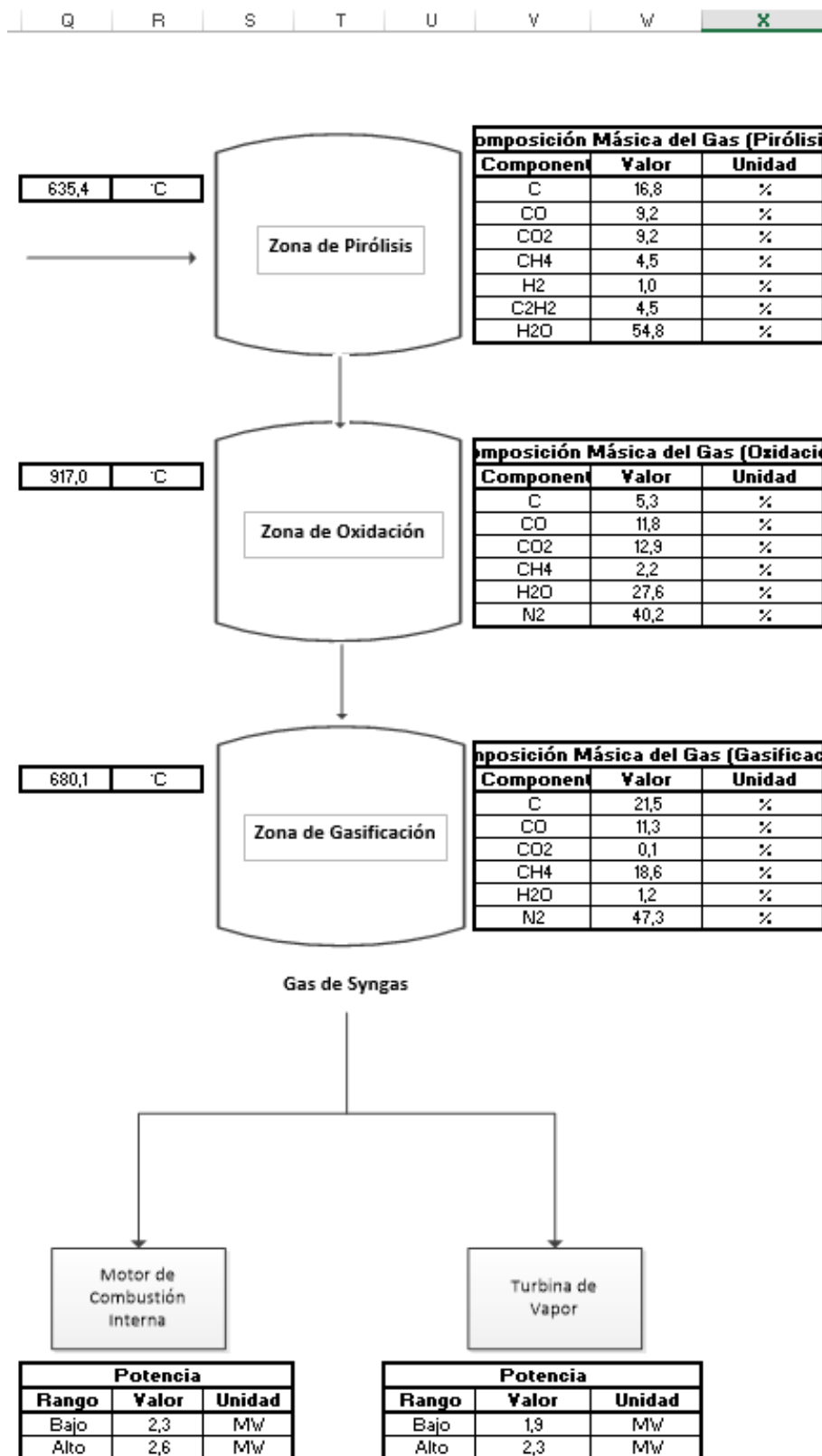


Figura 25: Resultados de la modelación entregados en Excel en la pestaña "Diagrama" (elaboración propia).

## Notas de Funcionamiento

- Debe tener instalados en su computador tanto el software Matlab como Excel.
- Los archivos de Matlab (MainTesis.m, WasteCleaner.m, formula.m, bmpiro.m, BE\_pirolisis3.m, bmoxidacion.m, BEoxi2.m, zona\_reduc.m y generación\_elec.m) así como el archivo Excel “GasificacionEcoHispanica.xls”, deben encontrarse en una carpeta común, en caso contrario el software no podrá ejecutarse al no poder acceder a todos los archivos.
- El programa solo puede ejecutarse desde el programa MainTesis, ya que este cumple la función de ser el enlace de todos los programas pequeños y por lo tanto se trata del programa de ejecución.
- El archivo “GasificacionEcoHispanica.xls” se sobre escribe cada vez que es ejecutado por lo tanto no es necesario limpiar los campos que no correspondan a los inputs en la ventana “Datos”.
- No debe borrar ni modificar el código o cambiar en el archivo Excel el lugar donde se encuentran las tablas y otros.

## 6. Resultados de la Modelación

Se utilizaron los siguientes inputs, similares a la realidad nacional según los datos de CONAMA en 2008 para probar el simulador diseñado:

**Tabla 6: Parámetros de ingreso para la simulación (elaboración propia).**

| Input                        | Valor  | Unidad            |
|------------------------------|--------|-------------------|
| Volumen                      | 19     | [m <sup>3</sup> ] |
| Flujo Másico                 | 12.000 | [kg/h]            |
| Temperatura Ambiente         | 298    | [K]               |
| Altura del Gasificador       | 6      | [m]               |
| Diámetro del Gasificador     | 2      | [m]               |
| Ratio de Oxígeno (Beta)      | 0,45   | [-]               |
| Caracterización de los RSD   |        |                   |
| Porcentaje de Plástico       | 11     | [%]               |
| Porcentaje de Podas          | 5      | [%]               |
| Porcentaje de Orgánicos      | 48     | [%]               |
| Porcentaje de Metales        | 11     | [%]               |
| Porcentaje de Papel y Cartón | 10     | [%]               |
| Porcentaje de Vidrio         | 7      | [%]               |
| Porcentaje de Otros          | 8      | [%]               |

De la caracterización presentada y en base a los datos de las tablas N°2, N°3 y N°4 presentadas en el capítulo 3.2.1 de la presente memoria, es posible obtener la caracterización de los residuos en función del porcentaje másico del carbono, hidrógeno, oxígeno y agua presentes en la biomasa.

**Tabla 7: Porcentajes másicos de la biomasa utilizada para la simulación (elaboración propia).**

| Elemento o compuesto | Porcentaje [%] |
|----------------------|----------------|
| Carbono              | 33,9           |
| Hidrógeno            | 4,5            |
| Oxígeno              | 28,5           |

|      |      |
|------|------|
| Agua | 33,1 |
|------|------|

A partir de estos se obtuvieron los siguientes resultados de la simulación:

### 6.1. Resultados del Proceso de Secado y Pirólisis

Del proceso de secado y pirólisis, y considerando los inputs anteriores, se obtuvieron los siguientes resultados de la simulación:

**Tabla 8: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de secado y pirólisis (elaboración propia).**

| Especies       | $C$  | $CO$ | $CO_2$ | $CH_4$ | $H_2$ | $C_2H_2$ | $H_2O$ |
|----------------|------|------|--------|--------|-------|----------|--------|
| $n_i$ [mol]    | 0,57 | 0,11 | 0,07   | 0,10   | 0,17  | 0,06     | 1,02   |
| $y_i$          | 0,27 | 0,05 | 0,03   | 0,05   | 0,08  | 0,03     | 0,49   |
| Porcentaje [%] | 27,0 | 5,3  | 3,4    | 4,6    | 8,0   | 2,8      | 49,0   |

De esta simulación también se obtuvo la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso de pirólisis, la cual se presenta a continuación:

**Tabla 9: Temperatura de pirólisis resultado de la simulación (elaboración propia).**

| Proceso   | Temperatura [K] | Temperatura [°C] |
|-----------|-----------------|------------------|
| Pirólisis | 908,5           | 635,4            |

### 6.2. Resultados del Proceso de Oxidación

Al considerar los resultados del proceso de secado y pirólisis como inputs para el proceso de oxidación, se obtuvo los siguientes resultados de la simulación:

**Tabla 10: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de oxidación (elaboración propia).**

| Especies             | $C$  | $CO$ | $CO_2$ | $CH_4$ | $H_2O$ | $N_2$ |
|----------------------|------|------|--------|--------|--------|-------|
| $n_i$ [mol]          | 0,31 | 0,30 | 0,21   | 0,10   | 1,09   | 1,02  |
| $y_i$                | 0,10 | 0,10 | 0,07   | 0,03   | 0,36   | 0,34  |
| Porcentaje molar [%] | 10,3 | 9,9  | 6,9    | 3,2    | 36,0   | 33,7  |

Y al igual que para la simulación de la zona de secado y pirólisis también se obtuvo la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso de oxidación parcial, la cual se presenta continuación:

Tabla 11: Temperatura de oxidación resultado de la simulación (elaboración propia).

| Proceso   | Temperatura [K] | Temperatura [°C] |
|-----------|-----------------|------------------|
| Oxidación | 1.190,2         | 917,1            |

### 6.3. Resultados del Proceso de Reducción o Gasificación

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de la zona de oxidación como inputs, se obtuvo los siguientes resultados para la composición de las especies formadas en este proceso de reducción o gasificación. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 12: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción (elaboración propia).

| Especies              | $CO$  | $CO_2$ | $CH_4$ | $H_2O$ | $H_2$ | $N_2$ |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| $n_i$ [mol]           | 0,46  | 0,16   | 0,003  | 0,62   | 0,36  | 1,02  |
| $y_i$                 | 0,18  | 0,06   | 0,001  | 0,23   | 0,14  | 0,39  |
| Porcentaje Molar [%]  | 17,6  | 5,9    | 0,1    | 23,7   | 13,8  | 38,8  |
| $m_i$ [g]             | 12,97 | 6,84   | 0,04   | 11,21  | 0,73  | 28,48 |
| Porcentaje Másico [%] | 21,5  | 11,3   | 0,1    | 18,6   | 1,2   | 47,3  |

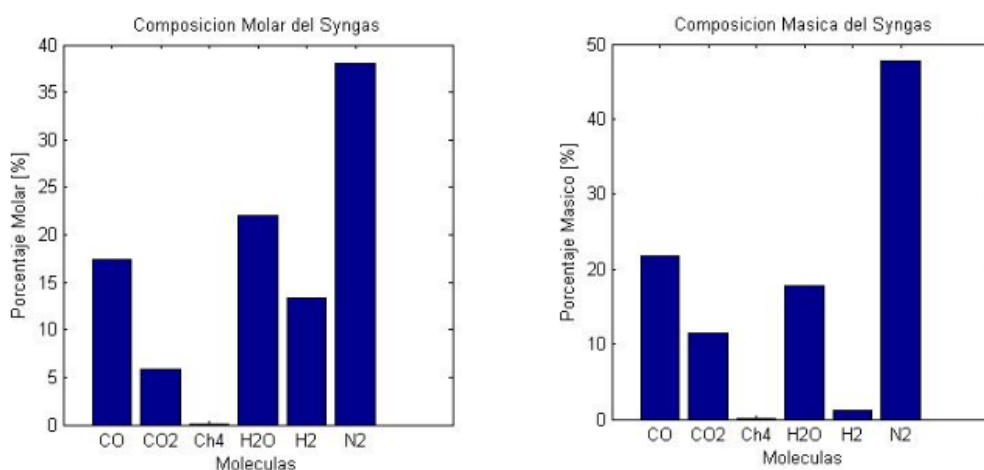


Gráfico 4: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción obtenidas de la modelación (elaboración propia).

Luego de realizar la condensación del agua presente en el gas, se obtiene la siguiente composición en base seca:

**Tabla 13: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción en base seca (elaboración propia).**

| Especies              | $CO$   | $CO_2$ | $CH_4$ | $H_2$  | $N_2$  |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $n_i$ [mol]           | 0,4632 | 0,1554 | 0,0027 | 0,3632 | 1,0173 |
| $y_i$                 | 0,2314 | 0,0776 | 0,0014 | 0,1814 | 0,5082 |
| Porcentaje Molar [%]  | 23,1   | 7,8    | 0,1    | 18,1   | 50,8   |
| $m_i$ [g]             | 12,97  | 6,84   | 0,04   | 0,73   | 28,48  |
| Porcentaje Másico [%] | 26,4   | 13,9   | 0,1    | 1,5    | 58,1   |

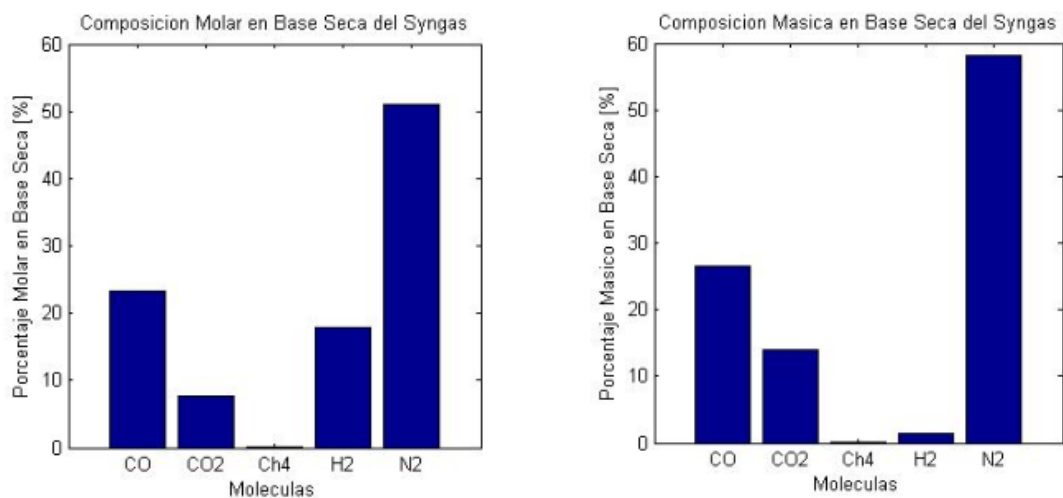


**Gráfico 5: Composiciones de las especies resultado de la simulación de la zona de reducción en base seca obtenidas de la modelación (elaboración propia).**

A continuación, se presenta la temperatura del proceso de reducción o gasificación que se obtuvo de la simulación:

**Tabla 14: Temperatura de oxidación resultado de la simulación (elaboración propia).**

| Proceso   | Temperatura [K] | Temperatura [°C] |
|-----------|-----------------|------------------|
| Reducción | 953,23          | 680,1            |

También es importante tener en cuenta el poder calorífico del gas obtenido (PCI) en  $MJ/kg$  y  $MJ/Nm^3$ . A continuación se presenta el valor obtenido de la simulación para el PCI del gas:

**Tabla 15: PCI del gas de síntesis resultado de la simulación.**

| <b>Proceso</b>   | <b>PCI [<math>MJ/kg</math> ]</b> | <b>PCI [<math>MJ/Nm^3</math>]</b> |
|------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Reducción</b> | 5,22                             | 5,74                              |

Finalmente, para obtener la potencia eléctrica que podría generar una planta con la tecnología de la empresa Eco Hispánica, se considera el aprovechamiento del gas de síntesis por medio de un motor de combustión interna. A continuación se presenta la eficiencia eléctrica estimada para la opción propuesta [32]:

**Tabla 16: Eficiencia de generación eléctrica de los motores de combustión interna [32]**

| <b>Opciones de Generación Eléctrica</b> | <b>Eficiencia Baja [%]</b> | <b>Eficiencia Alta [%]</b> |
|-----------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>Motor de Combustión Interna</b>      | 25                         | 28                         |

Teniendo en consideración las eficiencias, una alimentación de 12.000 [kg/h] y la caracterización expuesta en la sección 6 del documento, se obtuvieron las siguientes potencias para cada una de las opciones de aprovechamiento:

**Tabla 17: Potencia obtenida de la simulación (elaboración propia).**

| <b>Opciones de Generación Eléctrica</b> | <b>Eficiencia Baja [MWh]</b> | <b>Eficiencia Alta [MWh]</b> |
|-----------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>Motor de Combustión Interna</b>      | 2,14                         | 2,39                         |

Al graficar los resultados presentados en la tabla N° 17, se obtiene el gráfico 6 que muestra de manera más simple la diferencia existente entre los distintos tipos de aprovechamiento propuestos:

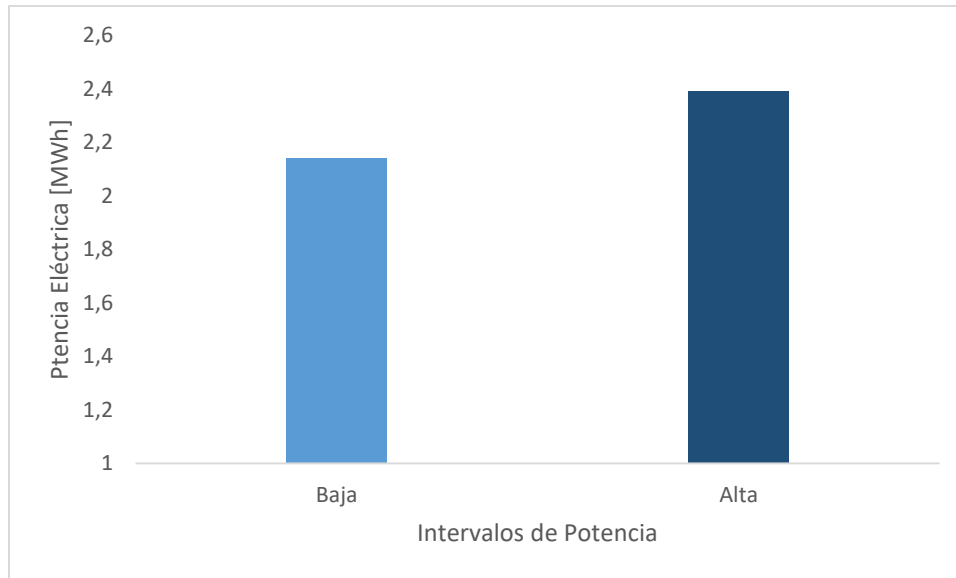


**Gráfico 6: Potencia eléctrica de las opciones presentadas (elaboración propia).**

De la gráfica N°6 es posible apreciar la potencia generada producto del aprovechamiento energético del gas de síntesis en el motor de combustión interna. Es importante destacar que ésta es la energía eléctrica que genera solamente el uso del motor, ya que la energía térmica se aprovechará para la obtención de vapor y precalentar corrientes de proceso.

## 7. Análisis de los Resultados y Validación

### 7.1. Validación de la Composición del Gas de Síntesis

Debido a la falta de datos experimentales de gasificación de residuos sólidos por parte de Eco Hispánica, se hace imposible el poder comparar los resultados entregados por el modelo para su validación. Por esto se realiza una adaptación de la modelación para que acepte una alimentación de chips de madera de pino con 18,5% de humedad y con los datos obtenidos experimentalmente por Giltrap, D. (2002) se procede a realizar una validación del modelo. Pese a utilizar un tipo de biomasa distinto, el modelo diseñado para la predicción de la composición del gas de síntesis sólo requiere de parámetros como la humedad y composición química de la biomasa a gasificar para realizar esta evaluación.

Además, se realiza una comparación entre los resultados con los obtenidos de la modelación realizada por Budhathoki, R. (2013), que pretende modelar la composición del gas de síntesis a partir de madera de caucho o “*Rubberwood*”. Para esto al igual que para el caso anterior se adaptó el modelo para recibir la misma base en composición química de los residuos y humedad presentada por el autor; es importante recalcar que aquí la comparación fue realizada con el modelo más no los datos experimentales. Por lo tanto, podría considerarse un punto de partida para analizar el que el orden de magnitud de los resultados esté acorde. Los resultados se muestran en la tabla N°17:

Tabla 18: Comparación entre modelos y datos experimentales para la composición molar del gas de síntesis en base seca (elaboración propia a partir de los datos en [19], [22] y modelados).

| Medición                                                                                  | $CO$       | $CO_2$        | $CH_4$        | $H_2$          | $N_2$          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>Predicción Modelo Porcentaje Molar [%]</b>                                             | 21,4       | 8,4           | 0,7           | 15,6           | 53,8           |
| <b>Modelación Budhathoki, R., 2013 [19]<br/>Porcentaje molar [%]</b>                      | 21,6       | 9,2           | 1,6           | 14,2           | 53,4           |
| <b>Resultados Experimentales [22]<br/>Giltrap, D., 2002 [%]</b>                           | $22 \pm 1$ | $9,1 \pm 0,2$ | $1,1 \pm 0,5$ | $13,6 \pm 0,2$ | $54,4 \pm 0,9$ |
| <b>Error Porcentual Respecto al Modelo de Budhathoki, R., 2013 [%]</b>                    | 0,9        | 8,7           | 56,3          | 9,9            | 0,7            |
| <b>Error Porcentual Respecto a los resultados Experimentales de Giltrap, D., 2002 [%]</b> | 2,7        | 7,7           | 36,4          | 14,7           | 1,1            |

Para poder visualizar de mejor manera, a continuación se presenta el gráfico N°7, que muestra la diferencia entre los componentes del gas de síntesis generado en base seca presentados en la tabla N°18:

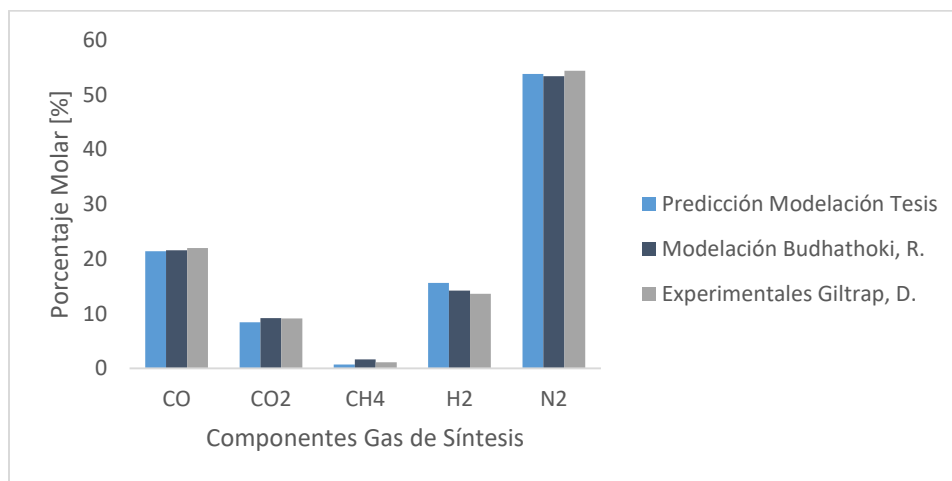


Gráfico 7: Comparación entre modelos y datos experimentales para la composición molar del gas de síntesis (elaboración propia).

De los resultados expuestos en la tabla N°18 y el gráfico N°7 se puede apreciar que el modelo posee una predicción razonable con respecto a su uso con chips de madera de pino, con errores bajo el 15% para todos los componentes del gas de síntesis, con la excepción del metano cuyo error se dispara a un 36,4%. Estos errores se deben principalmente a que el modelo, por un lado, no considera todas las reacciones de reducción que se presentan en la gasificación de biomasa, sólo tomando en cuenta las reacciones que según diversos autores se consideran las más relevantes, además de los supuestos realizados para las zonas de pirólisis y oxidación. Para el caso particular de esta modelación, la composición de metano está subestimada. Cabe destacar que la baja precisión a la hora de modelar el contenido de metano en el gas es un problema común en este tipo de modelación, donde no se realiza el modelo cinético para cada una de las zonas [22].

De la misma manera, al comparar los datos obtenidos de la modelación realizada por Budhadthoki para madera de caucho (*Hevea brasiliensis*) se obtienen diferencias inferiores al 10%, con excepción del metano donde el error se dispara a un 56,3%. Este error se explica por la diferencias de metodología de modelación al utilizar distintos supuestos para las zonas de pirólisis y oxidación que inciden en el resto de la modelación. Si bien la comparación se realiza con biomasa distintas a residuos sólidos urbanos, los resultados obtenidos al simular el proceso de gasificación para otras biomasa sirven como una referencia de que el modelo entrega datos cercanos a lo estimado, más aun cuando este tipo de modelos están diseñados para poder ser utilizados con cualquier tipo de biomasa al conocer su composición química.

## 7.2. Perfil de Temperaturas

Analizando las temperaturas obtenidas de la simulación del proceso se obtiene lo siguiente:

Tabla 19: Perfil de temperaturas de las zonas del gasificador obtenidas de la modelación (elaboración propia).

| Zona                      | Temperatura Modelo [°C] | Rangos para la Zona [°C] |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| <b>Secado y Pirólisis</b> | 635,4                   | 300 - 1100               |
| <b>Oxidación</b>          | 917,1                   | 700 - 1200               |
| <b>Reducción</b>          | 680,1                   | 600 - 1000               |

Como se puede apreciar de la tabla N°19, las temperaturas obtenidas de la modelación se encuentran todas dentro de los rangos establecidos, es más, al analizar la temperatura de la zona de pirólisis se encuentra alrededor de la temperatura ideal de pirólisis (600 [°C]), y de esta forma maximiza la posterior reactividad del *char*.

### 7.3. Análisis del Aprovechamiento energético del Gas

Es necesario antes de realizar cualquier tipo de análisis respecto a la potencia generada o cómo afectan diversos parámetros de operación y condiciones iniciales de la biomasa a la potencia generada, el determinar si el gas de síntesis cumple con los requerimientos mínimos para poder ser utilizado como combustibles de un motor de combustión interna.

Para efectos de la simulación se supone que la corriente de gas viene sin sólidos arrastrados, quedando todos en el *char* y alquitranes retirados, además supone el ingreso de la corriente a un proceso de tratamiento y acondicionamiento, donde se retiran los gases ácidos, representado por el retiro del dióxido de carbono  $CO_2$ . Finalmente, sólo queda demostrar que el gas posee el contenido energético mínimo para ser utilizado en motores de combustión interna; para esto compararemos el poder calorífico obtenido de la mezcla de gases con uno de similar composición obtenido de bibliografía [32], para tener referencia respecto del orden de magnitud. A continuación, en la tabla N° 20, se presenta el gas de síntesis obtenido y con el que se realizará la comparación:

Tabla 20: Validación del PCI del gas de síntesis.

| Especies                          | $CO$ | $CO_2$ | $CH_4$ | $H_2$ | $N_2$ | PCI [ $MJ/Nm^3$ ] |
|-----------------------------------|------|--------|--------|-------|-------|-------------------|
| Porcentaje Molar Simulación [%]   | 23,1 | 7,8    | 0,1    | 18,1  | 50,8  | 5,21              |
| Porcentaje Molar Bibliografía [%] | 23,9 | 18,6   | 1,2    | 7,7   | 48,6  | 5,53              |

De la tabla N° 20 se puede sacar en limpio que el valor obtenido del poder calorífico tiene sentido. Pese a que el gas comparado no es el mismo, tiene una composición bastante similar, pero con mayor porcentaje de gases combustibles, por ende, su poder calorífico es mayor. En los resultados se informa de un gas con un PCI de 5,74 [ $MJ/Nm^3$ ], con lo que hay que recordar que se retira el dióxido de carbono al tratarse de un gas ácido y sin aporte energético, lo que tiene como consecuencia el mejoramiento energético del gas.

Finalmente, al analizar si el gas es apto para su uso en motores de combustión interna se compara su PCI que es de  $5,74 [MJ/Nm^3]$  con los  $4,2 [MJ/Nm^3]$  que es el mínimo admitido por los motores corrientes; se tiene que éste es apto para este tipo de aprovechamiento y de aquí en adelante se analizará esta opción de generación.

#### 7.4. Análisis de la Variación del PCI con la Composición de los Residuos

Para realizar este análisis es necesario variar la composición de los residuos de entrada, para esto se realizó un aumento de un 15% de la fracción de residuo a analizar, mientras el porcentaje del resto de las fracciones de residuos se disminuyó de manera equivalente en un 2,5%. A continuación se muestran los resultados obtenidos, considerando el caso base de un gas con un poder calorífico de  $5,7376 [MJ/Nm^3]$ :

**Tabla 21: Variación del PCI del gas con la composición de RSD.**

| <b>Fracción de Residuos</b> | <b>Aumento [%]</b> | <b>PCI [<math>MJ/Nm^3</math>]</b> | <b>Cambio Porcentual [%]</b> |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| <b>Residuos Orgánicos</b>   | 15                 | 5,7363                            | -0,02                        |
| <b>Plásticos</b>            | 15                 | 5,1327                            | -11,00                       |
| <b>Podas</b>                | 15                 | 5,8296                            | 1,08                         |
| <b>Papel y Cartón</b>       | 15                 | 5,9978                            | 4,00                         |

De la tabla N°21 es posible determinar que un aumento en la fracción de podas y de papel y cartón causara un aumento en el PCI del gas de síntesis, mientras que un aumento porcentual de la fracción orgánica genera una disminución despreciable, manteniendo el PCI casi invariante. Al analizar el caso del plástico, éste genera un descenso no menor en el PCI del gas de síntesis, llegando a una disminución de 11%. Es posible determinar que la relación H/C de la biomasa a gasificar juega un papel importante en el poder calorífico final del gas, ya que mientras mayor sea ésta se favorece la producción de hidrógeno ( $H_2$ ) y de monóxido de carbono (CO), ambos gases combustibles. Al utilizar los datos de la tabla N°3 con respecto a las composiciones químicas de las diversas fracciones que ingresan al gasificador, se obtiene que la relación H/C del papel y cartón es de 0,137, los residuos de podas es de 1,26, mientras que la de los plásticos es de 0,120.

Por lo tanto, es posible afirmar que el poder calorífico del gas de síntesis aumenta al ingresar residuos con mejor relación H/C y, en específico, un aumento de la fracción papel y cartón generará un aumento en el PCI del gas.

Ahora bien, el análisis anterior se realiza netamente en función del poder calorífico del gas obtenido, ya que el uso de plásticos visto desde el punto de vista del balance energético de la planta es positivo, por lo que se recomienda para futuros proyectos el realizar un análisis de como incide el plástico en el balance energético de la planta y contrastarlo con la baja en el poder calorífico del gas de síntesis a modo de optimizar la operación.

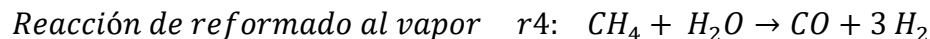
## 7.5. Variación en el Porcentaje de Humedad

Para analizar cómo afecta una variación en la humedad de la biomasa, se simuló distintos valores para el porcentaje de humedad de la muestra inicial presentada en el capítulo 6, mas no de la composición elemental de ésta. A partir de esta variación se obtuvieron los siguientes resultados para la composición del gas de síntesis en base seca.

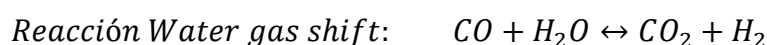
Tabla 22: Composición del gas de síntesis en base seca a distintas humedades iniciales (elaboración propia).

| Humedad [%] | Medición              | CO   | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> |
|-------------|-----------------------|------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| 24,0        | Porcentaje Molar [%]  | 22,0 | 8,2             | 0,5             | 16,6           | 52,7           |
|             | Porcentaje Másico [%] | 24,7 | 14,5            | 0,3             | 1,3            | 59,2           |
| 33,1        | Porcentaje Molar [%]  | 23,1 | 7,8             | 0,1             | 18,1           | 50,8           |
|             | Porcentaje Másico [%] | 26,4 | 13,9            | 0,1             | 1,5            | 58,1           |
| 38,8        | Porcentaje Molar [%]  | 24,3 | 7,37            | 0,03            | 19,3           | 49,0           |
|             | Porcentaje Másico [%] | 28,2 | 13,4            | 0,02            | 1,6            | 56,78          |

Al comparar los resultados presentados en la tabla N°22, se puede apreciar un aumento de los moles de hidrógeno (H<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO), mientras que para el caso del de metano (CH<sub>4</sub>) existe una notoria disminución; este cambio en la composición del gas de síntesis se debe a las reacciones agua-gas y reformado del vapor:



Donde es posible apreciar que un aumento de la cantidad de agua o humedad de la muestra, genera un desplazamiento de la reacción hacia la generación de hidrógeno ( $H_2$ ) y monóxido de carbono ( $CO$ ). No obstante, es importante considerar que teóricamente debiese generarse un aumento de hidrógeno ( $H_2$ ) y dióxido de carbono  $CO_2$ , mientras existe una disminución de monóxido de carbono ( $CO$ ) producto de la reacción “water gas shift” [23]:



Aun así, el comportamiento concuerda con los datos experimentales obtenidos por Gil y col. (1999) , donde a mayor porcentaje de humedad de la biomasa se aprecia un aumento en los moles de hidrógeno, siendo la variación de éste la más sensible a la hora de determinar la potencia a generar por el aprovechamiento de gas de síntesis. A continuación se presenta la variación en la potencia predicha por el modelo:

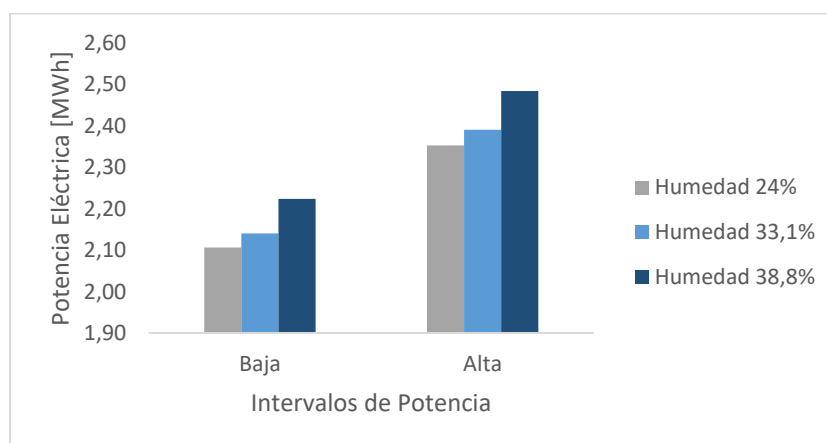


**Gráfico 8: Cambio de potencia por variación de la humedad para el aprovechamiento por motores de combustión interna (elaboración propia).**

Al analizar el gráfico N°8 se puede observar un incremento de entre un 1,6% a un 5,6% respecto a la potencia, tomando como base la muestra con una humedad del 24% y como tope una humedad de un 38,8%. Al analizar estos resultados se puede decir que a mayor humedad existe una mejora del poder calorífico del gas de síntesis, generando una mayor potencia con la misma cantidad de biomasa. Lo anterior hace pensar que a mayor humedad la planta será más eficiente al obtener un gas de síntesis enriquecido en hidrógeno y con mejor poder calorífico que generará una mayor potencia al aprovecharlo, pero es de suma importancia considerar cómo afecta esta humedad en otras zonas del proceso. La cantidad de energía requerida en la zona de secado y pirólisis para que el proceso pueda llevarse a cabo

incrementará mientras mayor sea la humedad inicial de la biomasa, haciendo a la larga que el proceso no sea rentable económicamente a humedades más altas, pese a obtener un gas de síntesis de mayor calidad. Por esto, en general, la biomasa utilizada con el fin de generar energía eléctrica no supera el 30% a 35% de humedad.

## 7.6. Variación en el Flujo de Oxígeno

Para analizar cómo afecta un cambio en el flujo de oxígeno, se realizó una variación en el factor “Beta” del simulador, el que está encargado de controlar la cantidad de oxígeno que ingresa sobre el sistema tomando como base el oxígeno estequiométrico, es decir, la cantidad de oxígeno requerida para una oxidación total. Para esto se varió el factor Beta tomando tres niveles 0,3, 0,4 y 0,45, obteniéndose los siguientes gráficos que ilustran los resultados obtenidos en cuanto a la generación eléctrica para el aprovechamiento del gas de síntesis por motores de combustión interna:

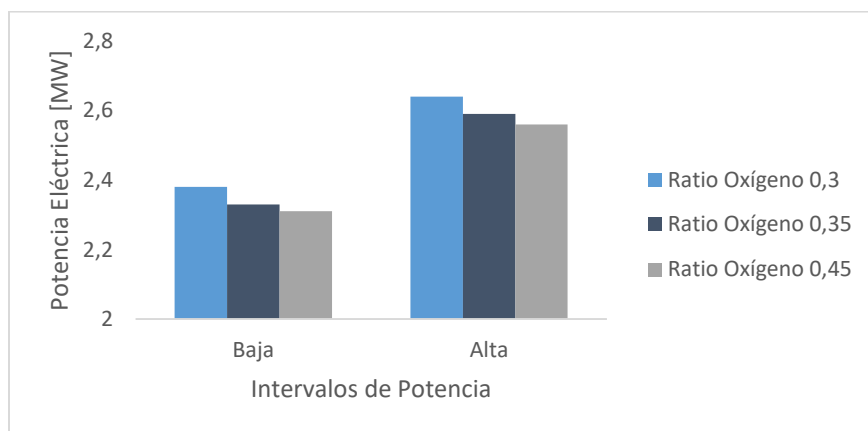


**Gráfico 9: Cambio de potencia por variación del ratio de oxígeno para el aprovechamiento por motores de combustión interna (elaboración propia).**

Como se puede apreciar de las gráficas N°9, a mayor *ratio* de oxígeno se registra una disminución de la potencia generada, lo que se debe a que a mayores cantidades de oxígeno favorecen las reacciones de oxidación, generando un mayor volumen de dióxido de carbono ( $CO_2$ ); esto, a su vez, provoca una disminución del volumen de los gases de combustibles que se generan en la etapa de reducción ( $CH_4$ ,  $H_2$  y  $CO$ ), causando una disminución en el poder calorífico del gas de síntesis. Finalmente, se traduce en una menor generación de energía con su uso y, por ende, una menor potencia.

## 8. Conclusiones y Recomendaciones

A partir del análisis realizado, fue posible concluir que el modelo es capaz de predecir la composición másica del gas de síntesis con errores de entre 1,1% a 14,7% utilizando chips de madera de pino como biomasa de referencia para su validación. Esto se cumple con excepción del caso del metano donde se observa un error de un 36,4 %, más del doble del segundo mayor error porcentual percibido. Estos errores se deben, por un lado, a que sólo se considera en la modelación las cuatro reacciones con mayor influencia, dejando de lado otras relaciones, además de las suposiciones de idealidad en que se basa el modelo de la zona de reducción, tales como que los gases se comportan como gases ideales y el hecho de no considerar factores que afectan la cinética de reacción tales como la porosidad o el tamaño de partículas en la modelación. Las suposiciones empíricas utilizadas para modelar las zonas de pirólisis y oxidación son las que autores como Budhathoki, R. (2013) señalan como una de las principales razones por las que el modelo posee una menor exactitud a la hora de modelar la composición del metano obtenido del proceso de gasificación, al considerar en la zona de oxidación que todo el hidrógeno se consume afectando a la reacción de gasificación con hidrógeno encargada de formar metano y, en general, a las composiciones del gas de síntesis final. Estos errores de composición, han sido posibles de disminuir al realizar una modelación de cada una de las zonas utilizando sus respectivas cinéticas como el modelo presentado por Sharma A. [24].

Al analizar la potencia que es capaz de generar el sistema al simular una alimentación de chips de madera de pino, se tiene que debido a la variación existente en las composiciones se genera un error aproximado de un 12,2% respecto de la potencia experimental, siendo las calculadas por el modelo mayores que las experimentales. Esto permite concluir que el modelo es capaz de aproximar e informar de manera aproximada la potencia que puede generar el sistema de gasificación para chips de madera de pino, pero no ha podido ser validado para la gasificación de residuos sólidos urbanos. Como se ha mencionado anteriormente este tipo de modelos se pueden adaptar a diversos tipos de biomasa al conocer su composición química, por lo que se espera que los errores respecto de la composición del gas y potencia obtenidos de manera experimental no diverjan mucho de los ya informados.

Es importante recalcar que este modelo no tiene la capacidad de informar sobre la potencia definitiva generada por la planta, pero sí de informar al usuario sobre los intervalos aproximados de la potencia que puede generar el sistema de gasificación. Ésta varía según las especificaciones de los parámetros de entrada, el cual es el objetivo principal de este trabajo de tesis que consta de estimar la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de la caracterización y flujo de residuos a manejar.

Finalmente, para analizar cómo afecta la variación en las fracciones de residuos en el poder calorífico del gas de síntesis se realizaron diversas variaciones en las corrientes, que evidencian cómo estos cambios en las fracciones de residuos afectan en el PCI del gas. Se obtuvo como resultado que un aumento de un 15% de la fracción de plásticos genera una disminución de un 11% en el poder calorífico del gas, mientras que un aumento en un 15% de la fracción de papel y cartón genera un aumento de un 4% en el PCI de la corriente del gas. Debido a esto es posible concluir que uno de los parámetros más importantes a considerar es la razón hidrógeno/carbono (H/C), ya que mientras mayor valor posea esta proporción mayor será el contenido de monóxido de carbono ( $CO$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ) que son los principales gases combustibles de la corriente de gas; esto se cumple teniendo el papel una razón de 0,137, la más alta dentro de las fracciones, y la del plástico de 0,12, la más baja.

Como recomendación a futuras investigaciones en este campo, es necesaria una validación de la herramienta de simulación a partir de resultados empíricos de distintas combinaciones de residuos sólidos urbanos y asimilables; de esta manera se podrá tener certeza absoluta de la utilidad de la herramienta a la hora de calcular la potencia de una planta de gasificación con residuos sólidos urbanos como biomasa.

Por otro lado se recomienda realizar un análisis de cómo afecta el uso del plástico al balance energético de la planta, con la finalidad de poder contrastar si la disminución del poder calorífico del gas de síntesis se condice con el ahorro generado en los procesos de la planta por su uso y por ende si su uso en las plantas de gasificación es o no recomendable.

Finalmente, se recomienda actualizar el análisis elemental con respecto a los residuos orgánicos representados por los restos de comida presentados en la tabla N°3 según la realidad del país donde se vaya a utilizar la herramienta de simulación, ya que esta

composición en específico se refiere a la realidad brasileña y es sabido que el tipo de residuos orgánicos está estrictamente ligado a la zona debido a las costumbres, productos específicos de la zona, poder adquisitivo, entre otros factores y además analizar cómo afecta el uso del *Waste cleaner* en la composición química de la biomasa respecto a la pérdida de los componentes volátiles.

## 9. Bibliografía

- [1] Adimark. (2015). Reciclaje. 2017, de GFK Sitio web: <https://www.adimark.cl/es/estudios/documentos/reciclaje%20en%20chile.pdf>
- [2] EFE. (2016). Chile lidera generación de basura per cápita en Sudamérica. 2017, de Diario La Tercera Sitio web: <http://www.latercera.com/noticia/chile-lidera-generacion-basura-per-capita-sudamerica/>
- [3] CONAMA. (2010). Residuos. 2017, de Gobierno de Chile Sitio web: [http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016\\_Capitulo\\_3.pdf](http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_Capitulo_3.pdf)
- [4] SEREMI del Medio Ambiente RM. (2014). Reporte sobre la gestión de residuos sólidos 2014 en la región metropolitana. 2017, de Ministerio de Medio Ambiente Sitio web: <http://www.santiagorecicla.cl/wp-content/uploads/2017/10/REPORTE-SOBRE-LA-GESTION-DE-RESIDUOS-SOLIDOS-2014-RM1.pdf>
- [5] Systep. (2017). Alternativas de venta y perspectivas de costos marginales futuros: desafíos para la mini hidro. 2017, de Systep Sitio web: <http://www.systep.cl/documents/Systep-%20APEMEC%20Junio%202017>
- [6] Deloitte. (2017). Estudio "Sector energético en Chile 2016". 2017, de Deloitte Sitio web: <https://www2.deloitte.com/cl/es/pages/energy-and-resources/articles/estudio--sector-energetico-chile-2016.html>
- [7] Climática. (2017). Camino del cierre de los ciclos del petróleo y del gas natural. 2017, de Climática Sitio web: <http://unidades.climantica.org/es/unidades/02/crise-enerxetica-e-cambio-climatico/o-esgotamiento-dos-combustibles-fosiles-e-o-cambio-climatico/1>
- [8] Ministerio de Energía. (2013). Ley 20.698. 2017, de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile Sitio web: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1055402&idParte=0>
- [9] Romenro, J. et al. (2003). "Residuos Urbanos y Asimilables. España, Andalucía: Comunidad Europea Fondo Europeo de Cohesión.

- [10] Ministerio de Medio Ambiente. (2016). Ley 20.920. 2017, de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile Sitio web: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1090894>
- [11] AULAGA. (2015). Propiedades Físicas, Químicas y Biológicas de los RSU. 2017, de AULAGA Sitio web: [https://aulagaasociacion.files.wordpress.com/2015/03/4\\_propiedades\\_rsu.pdf](https://aulagaasociacion.files.wordpress.com/2015/03/4_propiedades_rsu.pdf)
- [12] Intendencia Región Metropolitana. (2015). Información Geográfica. 2017, de Gobierno de Chile Sitio web: [http://www.intendenciametropolitana.gov.cl/informacion\\_geografica\\_2.html](http://www.intendenciametropolitana.gov.cl/informacion_geografica_2.html)
- [13] Green Lab UC. (2013). Proyección Escenario Línea Base 2013 y Escenarios de Mitigación del Sector Residuos Antrópicos. 2017, de Maps Chile Sitio web: <http://www.greenlabuc.cl/wp-content/uploads/2016/04/2013-MAPSRES-Informe-Final.pdf>
- [14] Bioware. (2016). PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN PARA BIOMASA Y OTROS RESIDUOS. 2017, de Bioware Sitio web: <https://www.bioware.com.br/pirolisis-y-gasificacion>
- [15] Henrich, E., Burkle, S., Meza-Renken, Z. & Rumpel, S.. (1999). Combustion and gasification kinetics of pyrolysis chars from waste and biomass. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 49, 221–241. 2017, De Sciencedirect Base de datos.
- [16] Sánchez, I.. (2014). Análisis comparativo de las tecnologías de valorización de residuos basadas en la gasificación. CONAMA.
- [17] UNIZAR. (2010). Procesos Termoquímicos. 2017, de Universidad de Zaragoza Sitio web: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>
- [18] E. Ruiz & J.M. Sánchez. (2014). Purificación y acondicionamiento del gas de gasificación de biomasa. CIEMAT, 33, 15-19. 2017, De Google Scholar Base de datos.

- [19] Budhathoki, R. (2013). Three zone modelin of Downdraft biomass Gasification: Equilibrium and finite Kinetic Approach (tesis de Master). University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finlandia.
- [20] Thakare, S. & Nandi, S.. (2015). Study on Potential of Gasification Technology for Municipal Solid Waste (MSW) in Pune City. Energy Procedia, 90, 509-512. 2017, De Sciencedirect Base de datos.
- [21] Centeno, F., Mahkamov, K., Silva, E. & Andrade, R.. (2012). Theoretical and experimental investigations of a dowdraft biomass gasfier-spark ignition engine power system. Renewable Energy, 37, 97-108. 2017, De Science Direct Base de datos.
- [22] Giltrap, D. (2002). Investigating Downdraft Gasification of Biomass (Tesis doctoral). Massey University, Palmerston North, New Zealand.
- [23] Gil, J., Corella, J., Aznar, M. & Cabellero, M.. (1999). Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution. Biomass and Bioenergy, 17, 389-403. 2017, De Sciencedirect Base de datos.
- [24] Sharma A.. (2011). Modeling and simulation of a downdraft biomass gasifier 1. Model development and validation. Energy Conversion and Management, 52, 1386-1396. 2017, De Sciencedirect Base de datos.
- [25] Chinniwala S. & Parikh P.. (2002). A Unified Correlation for Estimating HHV of Solid, Liquid and Gaseous Fuels. Fuel, 81, 1051-1063. 2017, De Sciencedirect Base de datos.
- [26] Castello A., 2014. Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa (tesis de pregrado). Universidad de chile, Chile.
- [27] Lima A.. (2012). Geração térmica . 2017, de faculda de engenharia da uerj sitio web: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>
- [28] GESCAM. (2012). ANEXO C: análisis de las alternativas tecnológicas de tratamiento de rsd. en estudio acerca de la industrialización de residuos y de la forma de

desarrollar una política de estado para el tema (9-126). Santiago, Chile: Subsecretaria De Desarrollo Regional Y Administrativo Gobierno De Chile.

- [29] Steinvorth, A.. (2014). Aprovechamiento energético de residuos sólidos municipales mediante el uso de tratamientos térmicos de avanzada. *Éxito Empresarial*, 253, 1-4. 2017], De GoogleScholar Base de datos.
- [30] ]Eco Hispánica. (2013). Tratamiento de rsu de eco hispánica. en proceso de higienización ecohispánica para residuos sólidos urbanos (4-8). madrid, españa.
- [31] Textos Científicos . (2015). COMBUSTIBLES GASEOSOS. 2017, de Textos Científicos Sitio web: <https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/gaseosos>.
- [32] Fonseca, N. (2003). Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa en motores de combustión interna alternativos (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- [33] Shehzad, A., Bashir, M. & Sethupathi, S.. (2016). System analysis for synthesis gas production in Pakistan from municipal solid waste gasification using a circulating fluidized bed gasifier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1302-1311. 2017, De ScienceDirect Base de datos.

## ANEXOS

### ANEXO A: Tablas y Datos Para Modelación

#### Propiedades Termodinámicas

Se presentan las propiedades termodinámicas los los compuestos forman parte del proceso de gasificación:

Tabla 23: Propiedades termodinámicas de los componentes de gas de síntesis [19].

| Especie  | Fase | PM en<br>[kJ/kmol] | G° a 298[k]<br>[kJ/kmol] | H° a<br>298[k]<br>[kJ/kmol] | $T_{max}$ | a     | b         | c         | d         |
|----------|------|--------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|
| $H_2O$   | g    | 18,0153            | -228.572                 | -241.818                    | 1800      | 32.34 | 1.92E-03  | 1.06E-05  | -3.60E-09 |
| $H_2O$   | l    | 18,0153            | -237.129                 | -285.830                    | -         | -     | -         | -         | -         |
| $CO_2$   | g    | 44,01              | -394.359                 | -393.509                    | 1800      | 22.26 | 5.98E-02  | -3.50E-05 | 7.47E-09  |
| $CO$     | g    | 28,01              | -137.169                 | -110.525                    | 1800      | 28.16 | 1.68E-03  | 5.37E-06  | -2.22E-09 |
| $CH_4$   | g    | 16,042             | -50.460                  | -74.520                     | 1500      | 19.89 | 5.02E-02  | 1.27E-05  | -1.10E-08 |
| $H_2$    | g    | 2,0159             | 0                        | 0                           | 1800      | 29.11 | -1.92E-03 | 4.00E-06  | -8.70E-10 |
| $O_2$    | g    | 31,9998            | 0                        | 0                           | 1800      | 25.48 | 1.52E-02  | -7.16E-06 | 1.31E-09  |
| $N_2$    | g    | 28,0134            | 0                        | 0                           | 1800      | 28.9  | -1.57E-03 | 8.08E-06  | -2.87E-09 |
| $C_2H_2$ | g    | 26,038             | 209.170                  | 226.730                     | 1500      | 21.8  | 9.214E-02 | -6.52E-05 | 1.82E-08  |

Las constantes a, b, c y d antes mencionadas, se utilizan para el cálculo de la capacidad calorífica considerando la siguiente correlación:

$$C_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^3$$

Por otra parte para estimar el poder calorífico superior (PCS) o HHV de la biomasa se utilizan correlaciones basadas en el análisis de la composición química de la biomasa. A continuación se presentan algunas de las correlaciones más utilizadas:

Tabla 24: Correlaciones para obtener el PCS de la biomasa [25].

| Investigador   | Correlación                                   | Unidad  | Precisión   |
|----------------|-----------------------------------------------|---------|-------------|
| Seyler (1938)  | $HHV = 0,519 C + 1,625 H + 0,001 O^2 - 17,87$ | [MJ/kg] | 1% de error |
| Tillman (1978) | $HHV = 0,4373 C - 1,6701$                     | [MJ/kg] | 5% de error |
| Jenkins (1985) | $HHV = -0,763 + 0,301 C + 0,525 H + 0,064 O$  | [MJ/kg] | 7% de error |

Tomando en consideración la precisión de la correlación como el parámetro a considerar a la hora de seleccionar la correlación a utilizar, es que se determinó el uso de la correlación propuesta por Seyler para su uso en la modelación.

## Reacciones de Gasificación y Parámetros Cinéticos

A continuación se presentan los parámetros cinéticos para las reacciones de gasificación que intervienen en el modelo:

Tabla 25: Reacciones de gasificación y parámetros cinéticos [26].

| Reacción                             | Velocidad de Reacción [ $mol/m^3 s$ ]                                                                                                           | $A$ [1/s] | $E$ [kJ/mol] |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|
| $C + CO_2 \rightarrow 2 CO$          | $r1: (CRF) * A_1 * EXP \left[ \left( \frac{-E_1}{R * Tr} \right) * \left( P_{CO_2} - \frac{P_{CO}^2}{K_{1eq}} \right) \right]$                  | 3,616E01  | 77,39        |
| $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$      | $r2: (CRF) * A_2 * EXP \left[ \left( \frac{-E_2}{R * Tr} \right) * \left( P_{H_2O} - \frac{P_{CO} P_{H_2}}{K_{2eq}} \right) \right]$            | 1,517E04  | 121,62       |
| $C + 2 H_2 \rightarrow CH_4$         | $r3: (CRF) * A_3 * EXP \left[ \left( \frac{-E_3}{R * Tr} \right) * \left( P_{H_2}^2 - \frac{P_{CH_4}}{K_{3eq}} \right) \right]$                 | 4,189E-03 | 19,21        |
| $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 H_2$ | $r4: (CRF) * A_4 * EXP \left[ \left( \frac{-E_4}{R * Tr} \right) * \left( P_{CH_4} P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^3 P_{CO}}{K_{4eq}} \right) \right]$ | 7,301E-02 | 36,15        |

## Equilibrio de las Reacciones de Gasificación

Para la obtención de las constantes de equilibrio de las reacciones se utiliza la siguiente correlación [19]:

$$\ln(K_{eq}) = \frac{-J}{R * T_r} + \Delta A * \ln(T_r) + \frac{\Delta B}{2} * T_r + \frac{\Delta C}{6} * T_r^2 + \frac{\Delta D}{2 * T_r^2} + I$$

Dónde  $J$ ,  $\Delta A$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta D$  e  $I$  corresponden a constantes termodinámicas particulares para los mecanismos de reacción. A continuación, en la tabla N°23, se presentan estas constantes para las reacciones del modelo:

Tabla 26: Propiedades termodinámicas para las reacciones de gasificación [19].

| Reacción | $\Delta A$ | $\Delta B$ | $\Delta C$ | $\Delta D$ | $J$ [kJ/kmol] | $I$ [kJ/kmol] |
|----------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|
| R1       | -0,476     | -7,04E-04  | 0          | 1,96E05    | 179.370,16    | 25,656        |
| R2       | 1,384      | -1,24E-03  | 0          | 7,98E04    | 130.546,57    | 7,642         |
| R3       | -6,567     | 7,46E-03   | -2,16E-06  | 7,01E04    | -58.886,80    | 32,541        |
| R4       | 7,951      | 8,70E-03   | 2,16E-06   | 9,70E03    | 189.433,31    | -24,899       |

Por lo que finalmente la constante de equilibrio de la reacción se expresa como una función de la temperatura de reacción.

## Cálculo del Ratio de Formación de las Especies Gaseosas en la Gasificación

El cálculo del ratio o velocidad de formación de especies durante las reacciones de gasificación ( $R_i$ ) son estimadas a partir de las reacciones en donde se ven implicados los compuestos. A continuación se presenta en la tabla N°24 el resumen para el cálculo de la velocidad de formación [26]:

Tabla 27: Velocidad de formación de las especies gaseosas durante la gasificación [26].

| Especie | $R_i$ [ $mol/m^3 s$ ]     |
|---------|---------------------------|
| $H_2$   | $r_2 - 2 * r_3 + 3 * r_4$ |
| $CO$    | $2 * r_1 + r_2 + r_4$     |
| $CO_2$  | $-r_1$                    |
| $CH_4$  | $r_3 - r_4$               |
| $H_2O$  | $-r_2 - r_4$              |
| $N_2$   | 0                         |

## Poder Calorífico de las Especies Gaseosas

A continuación se presenta el poder calorífico inferior (PCI) utilizados en el modelo para el cálculo de la potencia:

Tabla 28: PCI de las especies gaseosas que componen el gas de síntesis [27].

| Especie | PCI [ $kcal/kg$ ] |
|---------|-------------------|
| $H_2$   | 28.642            |
| $CO$    | 2.412             |
| $CO_2$  | 0                 |
| $CH_4$  | 11.940            |
| $H_2O$  | 0                 |
| $N_2$   | 0                 |

## ANEXO B: Código Matlab

A continuación se presenta al código utilizado con el objetivo de crear la herramienta para el cálculo de la potencia eléctrica de una eventual planta de gasificación con la tecnología de la empresa Eco Hispánica.

### Main (MainTesis.m)

```
%Main Menu Gasificador TechnoHolding con Waste Cleaner EchoHipanica
clear all
clc
close all

%Parametros de Ingreso
Excel_In=xlsread('GasificacionEcoHispanica');
Vol=Excel_In(1,1);
m_tot=Excel_In(9,1);
T_in=Excel_In(10,1);
z_gas=Excel_In(2,1);
D_g=Excel_In(3,1);
beta=Excel_In(8,1);
%Se supondrá que la altura de cada una de las 3 zonas a simular

%WASTE CLEANER
%Input WASTE CLEANER
p_pla=Excel_In(15,1);
p_pod=Excel_In(16,1);
p_org=Excel_In(17,1);
p_metal=Excel_In(18,1);
p_pc=Excel_In(19,1);
p_vid=Excel_In(20,1);
p_otros=Excel_In(21,1);

Rp=[m_tot,p_org,p_pc,p_pod,p_pla]';
m0=[0,0,0,0,0]';

wcm =fsolve(@WasteCleaner,m0,[],Rp);

%Luego de la solucion trnasformar de masa a [kmol/s]
wcn=zeros(5,1);
wcn(1,1)=wcm(1,1)/12;%moles carbono volatil [kmol/s]
wcn(2,1)=wcm(2,1)/12;%moles carbono fijo [kmol/s]
wcn(3,1)=wcm(3,1)/1;%moles hidr?geno H (VOLATIL) [kmol/s]
wcn(4,1)=wcm(4,1)/16;%moles ox?geno O (VOLATIL) [kmol/s]
wcn(5,1)=wcm(5,1)/18;%moles de agua por humedad [kmol/s]

%formula biomasa
nf=formula(wcm);

%BALANCE DE MASA ZONA PIROLISIS
nps=bmpiro(nf);
```

```

%BALANCE DE ENERGIA PIROLISIS
m_RSG=wcm(1,1)+wcm(2,1)+wcm(3,1)+wcm(4,1);
m_h2o=wcm(5,1);
npcf=wc(2,1);
P=[m_RSG,m_h2o,npcf]';
T0=T_in;
T=873;%[K]

TP3=fsolve(@BE_pirolisis3,T,[],T0,P,nps,Rp,nf);

%BALANCE DE MASA ZONA DE OXIDACION
S=[wc(5,1),wc(2,1)]';
nos=bmoxidacion(nps,S,beta);

%BALANCE DE ENERGIA ZONA DE OXIDACION
clear T0;
clear T;
T0=TP3;%[K]
T=1173;%[K]

T02=fsolve(@BEoxi2,T,[],T0,nos,nps,S,beta);

%ZONA DE REDUCCION
%BALANCE DE MASA Y ENERGIA ZONA DE REDUCCION
clear T
clear T0
T0=T02;
R=8.314;
zg=z_gas/3;
pi=3.14;
U=[Vol,z_gas,D_g]';
P0=(nos(1,1)+nos(2,1)+nos(3,1)+nos(4,1)+nos(5,1)+nos(6,1))*R*T0/(Vol);%[Pa]
Ve0=(wcm(1,1)+wcm(2,1)+wcm(3,1)+wcm(4,1)+wcm(5,1))*1.8/(pi*D_g);
nr0=[nos(1,1),nos(2,1),nos(3,1),nos(4,1),nos(5,1),0];%[mol]
G0=[nr0(1),nr0(2),nr0(3),nr0(4),nr0(5),nr0(6),T0,P0,Ve0]';
I0=[P0,Ve0,T0]';
dz=0.001;

[z,nrs]=ode23t(@ (z,G) zona_reduc(G,U,nos,I0,z),[0.01 zg],G0);

%vector del carbono positivo
[f,c]=size(nrs);
i=1;
vector=zeros(f,1);
reduccion=zeros(1,6);
for j=1
for i=1:f;
    if nrs(i,j)>0
        vector(i,1)=nrs(i,j);
    else
        nrs(i,j)=100;
    end
i=i+1;

```

```

end
end

min_valor_c_pos=min(vector);
posiscion_min=find(vector==min_valor_c_pos);
%encontrar el vector solucion
j=1;
for j=1:(c-2)
    for i=posiscion_min
        reduccion(1,j)=nrs(posiscion_min,j);
    end
    j=j+1;
end
%Grafica Porcentaje Molar
figure(1)
solucion=[reduccion(1,1),reduccion(1,2),reduccion(1,3),reduccion(1,4),reduccion(1,5),reduccion(1,6),nos(6),reduccion(1,7)]';%C,CO,CO2,CH4,H2O,H2,N2,T[K]
suma=sum(solucion(1:7));
porcentajes_molar=(100/suma)*solucion(2:7);
composiciones={'CO','CO2','CH4','H2O','H2','N2'};

subplot(2,2,1),bar(porcentajes_molar),title('Composicion Molar del Syngas');
set(gca,'XTickLabel',composiciones);
xlabel('Moleculas');
ylabel('Porcentaje Molar [%]');
%Grafica Porcentaje Molar en Base Seca
solucion_molar_dry=[solucion(2),solucion(3),solucion(4),solucion(6),solucion(7)]';
suma_molar_dry=solucion(2)+solucion(3)+solucion(4)+solucion(6)+solucion(7);
porcentajes_molar_dry=(100/suma_molar_dry)*solucion_molar_dry(1:5);
composiciones_molar_dry={'CO','CO2','CH4','H2','N2'};
subplot(2,2,2),bar(porcentajes_molar_dry),title('Composicion Molar en Base Seca del Syngas');
set(gca,'XTickLabel',composiciones_molar_dry);
xlabel('Moleculas');
ylabel('Porcentaje Molar en Base Seca [%]');

%Porcentajes Masicos
m_CO=solucion(2)*28*10^-3;%[kg]
m_CO2=solucion(3)*44*10^-3;
m_CH4=solucion(4)*16*10^-3;
m_H2O=solucion(5)*18*10^-3;
m_H2=solucion(6)*2*10^-3;
m_N2=solucion(7)*28*10^-3;
solucion_masa=[m_CO,m_CO2,m_CH4,m_H2O,m_H2,m_N2]';
suma_masa=m_CO+m_CO2+m_CH4+m_H2+m_H2O+m_N2;
porcentajes_masa=solucion_masa*(100/suma_masa);

%Grafico Porcentaje Masa
composiciones_masa={'CO','CO2','CH4','H2O','H2','N2'};
subplot(2,2,3),bar(porcentajes_masa),title('Composicion Masica del Syngas');
set(gca,'XTickLabel',composiciones_masa);

```

```

xlabel('Moleculas');
ylabel('Porcentaje Masico [%]');

%Grafico Porcentajes Molares en Base Seca
solucion_masa_dry=[m_CO,m_CO2,m_CH4,m_H2,m_N2]';
suma_masa_dry=m_CO+m_CO2+m_CH4+m_H2+m_N2;
porcentajes_masa_dry=solucion_masa_dry*(100/suma_masa_dry);
composiciones_masa_dry={'CO','CO2','Ch4','H2','N2'};
subplot(2,2,4),bar(porcentajes_masa_dry),title('Composicion Masica en
Base Seca del Syngas');
set(gca,'XTickLabel',composiciones_masa_dry);
xlabel('Moleculas');
ylabel('Porcentaje Masico en Base Seca [%]');

%Generacion electrica
elec=generacion_elec(nf,nps,S,Rp,beta,porcentajes_masa);

figure(2)
motor_combustion=elec(1:2);
subplot(1,2,1),bar(motor_combustion),title('Intervalo de Potencia Motor
de Combustion Interna');
potencia={'Baja','Alta'};
set(gca,'XTickLabel',potencia);
xlabel('Intervalo de Potencia');
ylabel('Potencia [MW]');

turbina_vapor=elec(3:4);
subplot(1,2,2),bar(turbina_vapor),title('Intervalo de Potencia Turbina de
Vapor');
potencia={'Baja','Alta'};
set(gca,'XTickLabel',potencia);
xlabel('Intervalo de Potencia');
ylabel('Potencia [MW]');

%Exportar Datos a Excel
A = [porcentajes_molar];
B= [porcentajes_molar_dry];
C= [porcentajes_masa];
D= [porcentajes_masa_dry];
SUMA_Ex=sum(wcm(1:5));
AGUA=wcm(5)/0.625*(1-0.625);
nps_masa=[nps(1,1)*12,nps(2,1)*28,nps(3,1)*44,nps(4,1)*16,nps(5,1)*2,nps(
6,1)*26,nps(7,1)*18]';
SUMA_nps=sum(nps_masa(1:7));
Porcentajes_piro=(100/SUMA_nps)*nps_masa;
nos_masa=[nos(1,1)*12,nos(2,1)*28,nos(3,1)*44,nos(4,1)*16,nos(5,1)*18,nos
(6,1)*28]';
SUMA_nos=sum(nos_masa(1:6));
Porcentajes_oxi=(100/SUMA_nos)*nos_masa;
TP=TP3-273.15;
TO=TO2-273.15;
TR=reduccion(7)-273.15;
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',A,2,'C4:C9');
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',B,2,'C14:C18');
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',C,2,'H4:H9');
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',D,2,'H14:H18');

```

```
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',SUMA_Ex,3,'O10:O10');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',AGUA,3,'L3:L3');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',Porcentajes_piro,3,'W7:W13');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',Porcentajes_oxi,3,'W20:W25');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',C,3,'W33:W38');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',TP,3,'Q7:Q7');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',TO,3,'Q19:Q19');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',TR,3,'Q32:Q32');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',motor_combustion,3,'R60:R61');  
xlswrite('GasificacionEcoHispanica',turbina_vapor,3,'V60:V61');
```

## Waste Cleaner (WasteCleaner.m)

```
% Waste Cleaner
function wcm=WasteCleaner(m,Rp)
m0=m;
%Datos
m_tot=Rp(1); %[kg/h]
p_org=Rp(2)/100; %porcentaje organico
p_pc=Rp(2)/100; %porcentaje papel y cart?n
p_pod=Rp(4)/100; %podas y madera
p_pla=Rp(5)/100; %pl?sticos mezclados

%Variables a Iterar
m_CV=m0(1);
m_CF=m0(2);
m_H=m0(3);
m_O=m0(4);
m_h2o=m0(5);

%porcentajes en base seca
ps_org=p_org*0.3; %masa residuos organico, el 0.3 es para quedar en base
seca (70% humedad)
ps_pc=p_pc*0.923;
ps_pod=p_pod*0.635;
ps_pla=p_pla*0.998;

%Masa en base seca
m_org=m_tot*ps_org;
m_pc=m_tot*ps_pc;
m_pod=m_tot*ps_pod;
m_pla=m_tot*ps_pla;

m_RSG=m_org+m_pc+m_pod+m_pla; %masa de residuos gasificables en base seca

p_CV=0.48*0.935*ps_org+0.438*0.815*ps_pc+0.6*0.967*ps_pla+0.478*0.789*ps_
pod; %porcentaje carbono volatil
p_CF=0.48*0.065*ps_org+0.438*0.185*ps_pc+0.6*0.033*ps_pla+0.478*0.211*ps_
pod; %porcentaje carbono fijo
p_H=0.064*ps_org+0.06*ps_pc+0.072*ps_pla+0.06*ps_pod; %porcentaje de
hidr?geno
p_O=0.376*ps_org+0.443*ps_pc+0.228*ps_pla+0.427*ps_pod; %porcentaje de
ox?geno

%BALANACE DE MASA WASTE CLEANER
wcm=zeros(1,5)';
wcm(1,1)=m_RSG*p_CV/3600-m_CV; %balance de masa carbono volatil [kg/s]
wcm(2,1)=m_RSG*p_CF/3600-m_CF; %balance de masa carbono fijo [kg/s]
wcm(3,1)=m_RSG*p_H/3600-m_H; %balance de masa hidr?geno [kg/s]
wcm(4,1)=m_RSG*p_O/3600-m_O; %balance de masa oxgeno [kg/s]
wcm(5,1)=(m_tot*(p_org+p_pc+p_pod+p_pla)-m_RSG)/3600)*0.625-
m_h2o; %balance de masa agua [kg/s], el 0,625 es la correccion por secado
al dejarlo en el ambiente.

end
```

## Formula Química (formula.mat)

```
function nf=formula(wcm)
%porcentajes
Masa_wc=wcm(1)+wcm(2)+wcm(3)+wcm(4)+wcm(5);
p_c=(wcm(1)+wcm(2))/Masa_wc;
p_h=wcm(3)/Masa_wc;
p_o=wcm(4)/Masa_wc;
p_w=wcm(5)/Masa_wc;
%carbono volatil
PCV=wcm(1)/(wcm(1)+wcm(2));
%pesos molecular
PM_c=12;
PM_h=1;
PM_o=16;
PM_h2o=18;
%formula biomasa
c=1;
h=(p_h*PM_c)/(p_c*PM_h);
o=(p_o*PM_c)/(p_c*PM_o);
%peso molecular estimado de la biomasa
PM_bio=c*PM_c+h*PM_h+o*PM_o;
%calculo de agua
w=(p_w*PM_bio)/(PM_h2o*(1-p_w));
%carbono fijo y volatil
cv=c*PCV;
cf=c*(1-PCV);
nf=[c,h,o,w,PM_bio,cv,cf]';
end
```

## Balance de Masa Zona de Pirólisis y Secado (bmpiro.m)

```
function nps=bmpiro(nf)
%con funcion formula
%Formacion de agua
o_agua=0.6*nf(3);
h_agua=2*o_agua;
%Hidrogeno restante
h_restante=nf(2)-h_agua;
%Agua total
n_h2o=o_agua+nf(4);
%Oxigeno consumido para formar CO y CO2
o_coco2=0.4*nf(3);
%Formacion de CO y CO2
n_co=o_coco2*44/100;
n_co2=(o_coco2-n_co)/2;
%Carbono consumido
c_consumido1=n_co+n_co2;
%Consumo del hidrogeno restante para formar CH4 y C2H2
n_h2=0.4*h_restante/2;
n_ch4=0.6*h_restante*13/68;
n_c2h2=(0.6*h_restante-4*n_ch4)/2;
%Consumo de carbono
c_consumido2=n_ch4+2*n_c2h2;
%Carbono consumido total
c_consumido_total=c_consumido1+c_consumido2;
%carbono remanente
n_cv=nf(6)-c_consumido_total;
nps=[n_cv,n_co,n_co2,n_ch4,n_h2,n_c2h2,n_h2o]';
return
```

## Balance de Energía Zona de Pirólisis y Secado (BE\_pirolisis3.m)

```

unction TP3=BE_pirolisis3(T,T0,P,nps,Rp,nf)
%Datos
T0=T0;%temperatura de entrada de la biomasa
m_RSG=P(1);%masa residuos a gasificar
m_h2o=P(2);%masa de agua en la biomasa
npcf=nf(7);%masa de carbono fijo
T_ref=298;%temperatura de referencia
T_eb=373;%temperatura de ebullicion

npcv=nps(1);%moles de carbono volatil del balance de masa pirolisis
npco=nps(2);%moles de CO del balance de masa pirolisis
npco2=nps(3);%moles de CO2 del balance de masa pirolisis
npch4=nps(4);%moles de CH4 del balance de masa pirolisis
nph2=nps(5);%moles de H2 del balance de masa pirolisis
npc2h2=nps(6);%moles de C2H2 del balance de masa pirolisis
nph2o=nps(7);%moles de H2O del balance de masa pirolisis (son los
generados no considera el agua de la biomasa inicial)

%Variabes a iterar
T_p=T;

%FUNCIONES NIDO
function H_Biomasa
%Parametros
%Variables a iterar
T_p=T(1);
c_formula=nf(1);
h_formula=nf(2);
o_formula=nf(3);
hf_bio=-(0.519*c_formula+1.625*h_formula+0.001*(o_formula)^2-
17.87)*1000*nf(5)*4; %entalpia de formaci?n en [kJ/kg]

%calor espec?fico
cp_bio=((0.1031+(T0-T_ref))+0.003867/2*(T0^2-T_ref^2))*nf(5);% este es
para madera se deberia obtener una para el ECO-H HUMEDO

%Ecuacion
h_biomasa=hf_bio+cp_bio;%[kJ/kmol]

end
function H_C

%Parametros
R=8.314;%[J/mol k]
a=1.771;
b=0.771*10^3;
c=0;
d=-0.867*10^-5;
T0=T0(1);%temperatura de entrada de la biomasa
h0_c=0;%[J/mol]
%variables a iterar
T_p=T(1);%[k]

```

```

%Entalpia

    h_c=h0_c+R*(a*(T_p-T_ref)+b/2*(T_p^2-T_ref^2)-d*(T_p^-1-T_ref^-
1))/1000;%con esto se obitnene la entalpia en [kJ/kmol]
end
function H_C2H2
%Parametros
T0=T0(1);
a=21.8;
b=9.21*10^-2;
c=-6.527*10^-5;
d=1.831*10^-8;
h0_c2h2=226730;%[kJ/kmol]

%Variables a iterar
T_p=T(1);%[k]

%Entalp?a
h_c2h2=h0_c2h2+(a*(T_p-T0)+b/2*(T_p^2-T0^2)+c/3*(T_p^3-T0^3)+d/4*(T_p^4-
T0^4));%con esto se obitnene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function H_O2
%Parametros
R=8.314;%[J/mol k]
a=25.48;
b=1.52*10^-2;
c=-7.16*10^-6;
d=1.31*10^-9;
T0=T0(1);%temeperatura de entrada de la biomasa
h0_o2=0;%[J/mol]

T_p=T(1);%[k]

%Entalp?a
h_o2=h0_o2+(a*(T_p-T_ref)+b/2*(T_p^2-T_ref^2)+c/3*(T_p^3-
T_ref^3)+d/4*(T_p^4-T_ref^4));%con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_N2

%Parametros
R=8.314;%[J/mol k]
a=28.9;
b=-1.57*10^-3;
c=8.08*10^-6;
d=-2.87*10^-9;
T0=T0(1);%temeperatura de entrada de la biomasa
h0_n2=0;%[J/mol]

T_p=T(1);%[k]
%Entalp?a
h_n2=h0_n2+(a*(T_p-T_ref)+b/2*(T_p^2-T_ref^2)+c/3*(T_p^3-
T_ref^3)+d/3*(T_p^4-T_ref^4));%con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]

```

```

end
function H_H2

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=29.11;
b=0; %-1.92*10^-3;
c=0; %4.0*10^-6;
d=0; %8.7*10^-10;
T0=T0(1); %temeperatura de entrada de la biomasa
h0_h2=0; %[J/mol]

%Variable
T_p=T(1); %[k]

%Entalp?a
h_h2=h0_h2+(a*(T_p-T_ref)+b/2*(T_p^2-T_ref^2)+c/3*(T_p^3-
T_ref^3)+d/3*(T_p^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_CO2

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=22.26;
b=5.98*10^-2;
c=-3.5*10^-5;
d=7.47*10^-9;
T0=T0(1); %temeperatura de entrada de la biomasa
h0_co2=-393509; %[J/mol]

T_p=T(1); %[k]

%Entalp?a
h_co2=h0_co2+(a*(T_p-T_ref)+b/2*(T_p^2-T_ref^2)+c/3*(T_p^3-
T_ref^3)+d/4*(T_p^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_CO

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=28.16;
b=1.68*10^-3;
c=5.37*10^-6;
d=-2.22*10^-9;
T0=T0(1); %temeperatura de entrada de la biomasa
h0_co=-110525; %[J/mol]

T_p=T(1); %[k]

%Entalp?a
h_co=h0_co+(a*(T_p-T_ref)+b/2*(T_p^2-T_ref^2)+c/3*(T_p^3-
T_ref^3)+d/4*(T_p^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]

```

```

end
function H_CH4

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=19.89;
b=5.02*10^-2;
c=1.27*10^-5;
d=-1.1*10^-8;
T0=T0(1); %temeperatura de entrada de la biomasa
h0_ch4=-74520; %[J/mol]

T_p=T(1); %[k]

%Entalp?a
h_ch4=h0_ch4+(a*(T_p-T_ref)+b/2*(T_p^2-T_ref^2)+c/3*(T_p^3-
T_ref^3)+d/4*(T_p^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]J/kmol]
end
function H_H2O_liquida

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=0;
b=0;
c=0;
d=0;

T0=T0(1); %temeperatura de entrada de la biomasa
h0_h2ol=-285830; %[J/mol]

T_p=T(1); %[k]

%Entalp?a
h_h2ol=h0_h2ol+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_H2O_gas

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=32.34;
b=0;
c=0;
d=0;
T0=T0(1); %temeperatura de entrada de la biomasa
h0_h2og=-241818; %[kJ/kmol]

%Variables a iterar
T_p=T(1); %[k]

%Entalpia

```

```

h_h2og=h0_h2og+(a*(T_p-T_eb)+b/2*(T_p^2-T_eb^2)+c/3*(T_p^3-
T_eb^3)+d/4*(T_p^4-T_eb^4));%con esto se obtiene la entalpia en [kJ/kmol]
end

```

```

%Balance de Energia
%Supuesto: se consideran perdidas del 15%.
%IN (masa)
H_Biomasa;
h_bio_in=m_RSG*h_biomasa;%[kJ/s]
h_bio_in=h_biomasa;%[kJ/s]
H_H2O_liquida;
h_h2o_in=m_h2o/18*h_h2ol;
h_h2o_in=nf(4)*h_h2ol;

%Out (mol)
H_C;
h_c_out=(npcv+npcf)*h_c;%[kJ/s]main definir mcf, ver si es T o T_p lo de
adentro
H_CO;
h_co_out=npco*h_co;
H_CO2;
h_co2_out=npco2*h_co2;
H_CH4;
h_ch4_out=npch4*h_ch4;
H_H2;
h_h2_out=nph2*h_h2;
H_C2H2;
h_c2h2_out=npc2h2*h_c2h2;
H_H2O_gas;
h_h2o_out=(nph2o+nf(4))*h_h2og;

%Balance de Energia
TP3=-
1*(h_bio_in+h_h2o_in)*0.85+(h_c_out+h_co_out+h_co2_out+h_ch4_out+h_h2_out
+h_c2h2_out+h_h2o_out);

```

```

End

```

## Balance de Masa Zona de Oxidación (bmoxidacion.m)

```
function nos=bmoxidacion(nps,S,beta)

%Datos
npcv=nps(1);
npco=nps(2);
npco2=nps(3);
npch4=nps(4);
nph2=nps(5);
npc2h2=nps(6);
nph2o=nps(7);
npcf=S(1);

% "a" corresponde a la cantidad de aire estequiometrico multiplicado por
un
% factor que lo deja en menor proporcion a la requerida para una
oxidacion
% completa
a=(nph2)+(2*npcv+2*npcf)*beta;

npo=a;%moles de oxigeno que entran
nnp2=(79/21*a)/2;%moles de N2 que ingresan considera 79% de hidrogeno y
21% de oxigeno

%OXIDACION DE H2
o_h2o=nph2;%oxigeno necesario para una oxidacion completa del h2
%OXIDACION DE C2H2
o_c2h2=5/2*npc2h2;%o2 necesario para oxidar todo el c2h2
co2_c2h2=4/2*npc2h2;%co2 generado de oxidar todo el c2h2
h2o_c2h2=2/2*npc2h2;%h2o generado de oxidar todo el c2h2
%OXIGENO REMANENTE
o_remanente=npo-o_h2o-o_c2h2;
%OXIGENO REMANENTE ES CONSUMIDO EN LA OXIDACION DEL CHAR
co2_char=(o_remanente-co2_c2h2)/(2+3.56);
co_char=o_remanente-2*co2_char;%no deja o2 remanente
%MOLES FINALES
noc=(npcv+npcf)-(co2_char+co_char);
noco=co_char+npco;
noco2=co2_char+co2_c2h2+npco2;
noh2o=nph2o+h2o_c2h2;
noch4=npch4;
non2=nnp2;
nos=[noc;noco;noco2;noch4;noh2o;non2];
end
```

## Balance de Energía Zona de Oxidación (BEoxi2.m)

```
function TO2=BEoxi2(T,T0,nos,nps,S,beta)

%Datos
T0=T0(1);%temeperatura de entrada de la biomasa
npcf=S(1);
nw=S(2);
T_ref=298;%temperatura de referencia
T_eb=373;%temperatura de ebullici?n del agua

%moles provenientes de la pirolisis
npcv=nps(1);%moles de carbono volatil del balance de masa pirolisis
npco=nps(2);%moles de CO del balance de masa pirolisis
npco2=nps(3);%moles de CO2 del balance de masa pirolisis
npch4=nps(4);%moles de CH4 del balance de masa pirolisis
nph2=nps(5);%moles de H2 del balance de masa pirolisis
npc2h2=nps(6);%moles de C2H2 del balance de masa pirolisis
nph2o=nps(7);%moles de H2O del balance de masa pirolisis (son los
generados no considera el agua de la biomasa inicial)

%moles resultantes de la oxidacion
noc=nos(1);
noco=nos(2);
noco2=nos(3);
noch4=nos(4);
noh2o=nos(5);
non2=nos(6);

%corriente de aire adicionada
A=((nph2)+(2*npcv+2*npcf))*beta;%revisar

npo2=A;%moles de oxigeno que entran
nnp2=79/21*A;%moles de N2 que ingresan considera 79% de hidrogeno y 21%
de oxigeno

%Variabes a iterar
T_O=T(1);

%FUNCIONES NIDO IN
function H_Biomasa_in
%Parametros
%Variables a iterar
T_p=T(1);
m_tot=Rp(1)/3600;%masa en kg/s
p_org=Rp(2)/100;%porcentaje organico
p_pc=Rp(3)/100;%porcentaje papel y cart?n
p_pod=Rp(4)/100;%podas y madera
p_pla=Rp(5)/100;%pl?sticos mezclados

%formulaci?n empirica de la molecula de Eco-H
c_formula=(6*(p_pod+p_pc)+10*p_pla)/(p_pla+p_pod+p_pc); %carbono en la
molecula de Eco-H
```

```

h_formula=(10*(p_pod+p_pc)+8*p_pla)/(p_pla+p_pod+p_pc); %hidrogeno en la
molecula de Eco-H
o_formula=(5*(p_pod+p_pc)+4*p_pla)/(p_pla+p_pod+p_pc); %hidrogeno en la
molecula de Eco-H

hf_bio=(0.519*c_formula+1.625*h_formula+0.001*(o_formula)^2-
17.87)*1000*10; %entalpia de formaci?n en [kj/kg]

%calor especifico
cp_bio=((0.1031+(T0-T_ref))+0.003867/2*(T0^2-T_ref^2));

%Ecuacion
h_biomasa_in=hf_bio+cp_bio;%[kj/s]

end
function H_C_in

%Parametros
R=8.314;%[J/mol k]
a=1.771;
b=0.771*10^3;
c=0;
d=-0.867*10^-5;
h0_c=0;%[J/mol]

%Entalpia

h_c_in=h0_c+R*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)-d*(T0^-1-T_ref^-
1))/1000;%con esto se obitnene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function H_C2H2_in
%Parametros
a=21.8;
b=9.21*10^-2;
c=-6.527*10^-5;
d=1.831*10^-8;
h0_c2h2=226730;%[kJ/kmol]

%Entalpia
h_c2h2_in=h0_c2h2+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4));%con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_O2_in
%Parametros
R=8.314;%[J/mol k]
a=25.48;
b=1.52*10^-2;
c=-7.16*10^-6;
d=1.31*10^-9;
h0_o2=0;%[J/mol]

%Entalpia
h_o2_in=h0_o2+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4));%con esto se obtiene la entalpia en [kJ/kmol]

```

```

end
function H_N2_in

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=28.9;
b=-1.57*10^-3;
c=8.08*10^-6;
d=-2.87*10^-9;
h0_n2=0; %[J/mol]

%Entalp?a
h_n2_in=h0_n2+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_H2_in

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=29.11;
b=0; %-1.92*10^-3;
c=0; %4.0*10^-6;
d=0; %8.7*10^-10;
h0_h2=0; %[J/mol]

%Entalp?a
h_h2_in=h0_h2+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_CO2_in

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=22.26;
b=5.98*10^-2;
c=-3.5*10^-5;
d=7.47*10^-9;
h0_co2=-393509; %[J/mol]

%Entalp?a
h_co2_in=h0_co2+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_CO_in

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=28.16;
b=1.68*10^-3;
c=5.37*10^-6;
d=-2.22*10^-9;
h0_co=-110525; %[J/mol]

```

```

%Entalp?a
h_co_in=h0_co+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4));%con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_CH4_in

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=19.89;
b=5.02*10^-2;
c=1.27*10^-5;
d=-1.1*10^-8;
h0_ch4=-74520; %[J/mol]

%Entalp?a
h_ch4_in=h0_ch4+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4));%con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]J/kmol]
end
function H_H2O_liquida_in

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=0;
b=0;
c=0;
d=0;
h0_h2ol=-285830; %[J/mol]

%Entalp?a
h_h2ol_in=h0_h2ol+(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-
T_ref^3)+d/4*(T0^4-T_ref^4));%con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_H2O_gas_in

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=32.34;
b=0;%1.92*10^-3;
c=0;%1.06*10^-5;
d=0;%-3.6*10^-9;
h0_h2og=-241818; %[kJ/kmol]

%Entalp?a
h_h2og_in=h0_h2og+(a*(T0-T_eb)+b/2*(T0^2-T_eb^2)+c/3*(T0^3-
T_eb^3)+d/4*(T0^4-T_eb^4));%con esto se obitnene la entalp?a en [kJ/kmol]
end

%FUNCIONES NIDO OUT
function H_Biomasa_out
%Parametros
%Variables a iterar

```

```

T_O=T(1);
m_tot=Rp(1)/3600;%masa en kg/s
p_org=Rp(2)/100;%porcentaje organico
p_pc=Rp(3)/100;%porcentaje papel y carton
p_pod=Rp(4)/100;%podas y madera
p_pla=Rp(5)/100;%pl?sticos mezclados

%formulacion empirica de la molecula de Eco-H
c_formula=(6*(p_pod+p_pc)+10*p_pla)/(p_pla+p_pod+p_pc); %carbono en la
molecula de Eco-H
h_formula=(10*(p_pod+p_pc)+8*p_pla)/(p_pla+p_pod+p_pc); %hidrogeno en la
molecula de Eco-H
o_formula=(5*(p_pod+p_pc)+4*p_pla)/(p_pla+p_pod+p_pc); %hidrogeno en la
molecula de Eco-H

hf_bio=(0.519*c_formula+1.625*h_formula+0.001*(o_formula)^2-
17.87)*1000*10;%entalpia de formaci?n en [kJ/kg]

%calor especifico
cp_bio=((0.1031+(T_O-T_ref))+0.003867/2*(T_O^2-T_ref^2));% este es para
madera se deberia obtener una para el ECO-H HUMEDO

%Ecuacion
h_biomasa_out=hf_bio+cp_bio;%[kJ/s]

end
function H_C_out

%Parametros
R=8.314;%[J/mol k]
a=1.771;
b=0.771*10^3;
c=0;
d=-0.867*10^-5;
h0_c=0;%[J/mol]

%Entalp?a

h_c_out=h0_c+R*(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)-d*(T_O^-1-T_ref^-
1))/1000;%con esto se obitnene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function H_C2H2_out
%Parametros
T0=T0(1);
a=21.8;
b=9.21*10^-2;
c=-6.527*10^-5;
d=1.831*10^-8;
h0_c2h2=226730;%[kJ/kmol]

%Entalp?a
h_c2h2_out=h0_c2h2+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4));%con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end

```

```

function H_O2_out
%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=25.48;
b=1.52*10^-2;
c=-7.16*10^-6;
d=1.31*10^-9;
h0_o2=0; %[J/mol]

%Entalp?a
h_o2_out=h0_o2+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_N2_out

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=28.9;
b=-1.57*10^-3;
c=8.08*10^-6;
d=-2.87*10^-9;
h0_n2=0; %[J/mol]

%Entalp?a
h_n2_out=h0_n2+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4)); %con esto se obitnene la entalp?a en
[kJ/kmol]
end
function H_H2_out

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=29.11;
b=0;
c=0;
d=0;
h0_h2=0; %[J/mol]

%Entalpia
h_h2_out=h0_h2+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4)); %con esto se obtiene la entalpia en
[kJ/kmol]
end
function H_CO2_out

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=22.26;
b=5.98*10^-2;
c=-3.5*10^-5;
d=7.47*10^-9;
h0_co2=-393509; %[J/mol]

%Entalpia

```

```

h_co2_out=h0_co2+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4));%con esto se obtiene la entalpia en
[kJ/kmol]
end
function H_CO_out

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=28.16;
b=1.68*10^-3;
c=5.37*10^-6;
d=-2.22*10^-9;
h0_co=-110525; %[J/mol]

%Entalp?a
h_co_out=h0_co+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4));%con esto se obtiene la entalpia en
[kJ/kmol]
end
function H_CH4_out

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=19.89;
b=5.02*10^-2;
c=1.27*10^-5;
d=-1.1*10^-8;
h0_ch4=-74520; %[J/mol]

%Entalp?a
h_ch4_out=h0_ch4+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4));%con esto se obtiene la entalpia en
[kJ/kmol]J/kmol]
end
function H_H2O_liquida_out
%Parametros
a=0;
b=0;
c=0;
d=0;
h0_h2ol=-285830; %[J/mol]

%Entalp?a
h_h2ol_out=h0_h2ol+(a*(T_O-T_ref)+b/2*(T_O^2-T_ref^2)+c/3*(T_O^3-
T_ref^3)+d/4*(T_O^4-T_ref^4));%con esto se obtiene la entalpia en
[kJ/kmol]
end
function H_H2O_gas_out

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=32.34;
b=0;
c=0;
d=0;
h0_h2og=-241818; %[kJ/kmol]

```

```

%Entalp?a
h_h2og_out=h0_h2og+(a*(T_O-T_eb)+b/2*(T_O^2-T_eb^2)+c/3*(T_O^3-
T_eb^3)+d/4*(T_O^4-T_eb^4));%con esto se obtiene la entalpia en [kJ/kmol]
end

%Balance de Energia
%Supuesto: se consideran perdidas nulas de energia (Qloss oxi=0);
%IN(kmol)
H_C_in;
h_c_IN=(npcv+npcf)*h_c_in; %[kj/s]
H_CO_in;
h_co_IN=npco*h_co_in;
H_CO2_in;
h_co2_IN=npco2*h_co2_in;
H_CH4_in;
h_ch4_IN=npch4*h_ch4_in;
H_H2_in;
h_h2_IN=nph2*h_h2_in;
H_C2H2_in;
h_c2h2_IN=npch2*h_c2h2_in;
H_H2O_gas_in;
h_h2o_IN=(nph2o+nw)*h_h2og_in;
H_O2_in;
h_o2_IN=npo2*h_o2_in;
H_N2_in;
h_n2_IN=npn2*h_n2_in;

%OUT(kmol)
H_C_out;
h_c_OUT=noc*h_c_out;
H_CO_out;
h_co_OUT=noco*h_co_out;
H_CO2_out;
h_co2_OUT=noco2*h_co2_out;
H_CH4_out;
h_ch4_OUT=noch4*h_ch4_out;
H_H2O_gas_out;
h_h2o_OUT=noh2o*h_h2og_out;
H_N2_out;
h_n2_OUT=non2*h_n2_out;

%Balance de Energia
TO2=-
(h_c_IN+h_co_IN+h_co2_IN+h_ch4_IN+h_h2_IN+h_c2h2_IN+h_o2_IN+h_n2_IN+h_h2o
_IN)+(h_c_OUT+h_co_OUT+h_co2_OUT+h_ch4_OUT+h_n2_OUT+h_h2o_OUT);
end

```

## Balance de Masa y Energía Zona de Reducción (zona\_reduc.m)

```
function nrs=zona_reduc(G0,U,nos,I0,z)
%ZONA DE REDUCCION
%Datos
V=U(1); %volumen en [m^3]
T0=I0(3);
T_ref=298;
T_eb=373;
non2=nos(6);
zg=U(2); %altura del gasificador en [m]
D=U(3); %diametro

%cineticas
E1=77.39; %[kJ/mol]
E2=121.62;
E3=19.21;
E4=36.15;

A1=3.616*10; %[1/s]
A2=1.517*10^4;
A3=4.189*10^-3;
A4=7.301*10^-2;

R=8.314; %[j/mol k]

deltaA1=-0.476;
deltaA2=1.384;
deltaA3=-6.567;
deltaA4=7.951;

deltaB1=-7.04*10^-4;
deltaB2=-1.24*10^-3;
deltaB3=7.46*10^-3;
deltaB4=-8.70*10^-3;

deltaC1=0;
deltaC2=0;
deltaC3=-2.16*10^-6;
deltaC4=2.16*10^-6;

deltaD1=1.96*10^5;
deltaD2=7.98*10^4;
deltaD3=7.01*10^4;
deltaD4=9.70*10^3;

J1=179370.16; %[kJ/kmol]
J2=130546.57;
J3=-58886.80;
J4=189433.31;

I1=25.656; %[kJ/kmol]
I2=7.642;
I3=32.541;
```

```

I4=-24.899;

%Variables a Iterar
Tr=G0(7);
vel=G0(9);
P=G0(8);

nrc=G0(1)/V;%[kmol/m3]
nrco=G0(2)/V;
nrco2=G0(3)/V;
nrch4=G0(4)/V;
nrh2o=G0(5)/V;
nrh2=G0(6)/V;

%no reactividad del nitrogeno
nrn2=non2/V;

%K de equilibrio
k1eq=exp(-
J1/(R*Tr)+deltaA1*log(Tr)+deltaB1*Tr/2+deltaC1*Tr^2/6+deltaD1/(2*Tr^2)+I1
);
k2eq=exp(-
J2/(R*Tr)+deltaA2*log(Tr)+deltaB2*Tr/2+deltaC2*Tr^2/6+deltaD2/(2*Tr^2)+I2
);
k3eq=exp(-
J3/(R*Tr)+deltaA3*log(Tr)+deltaB3*Tr/2+deltaC3*Tr^2/6+deltaD3/(2*Tr^2)+I3
);
k4eq=exp(-
J4/(R*Tr)+deltaA4*log(Tr)+deltaB4*Tr/2+deltaC4*Tr^2/6+deltaD4/(2*Tr^2)+I4
);

%Presiones Parciales
Pco=nrco*R*Tr;%[Pa]
Pco2=nrco2*R*Tr;
Pch4=nrch4*R*Tr;
Ph2o=nrh2o*R*Tr;
Ph2=nrh2*R*Tr;
Pn2=nrn2*R*Tr;
Pt=Pco+Pco2+Pch4+Ph2o+Ph2+Pn2;

%Condiciones Iniciales
P0=I0(1);
vel0=I0(2);

%Factor de reactividad del Char
CRF=100;

%Reacciones
R1=8.314*10^-3;%[kJ/mol]
r1=CRF*A1*exp(-E1/(R1*Tr))*((Pco2/Pt)-((Pco/Pt)^2)/k1eq));
r2=CRF*A2*exp(-E2/(R1*Tr))*((Ph2o/Pt)-((Pco/Pt)*(Ph2/Pt)/k2eq));
r3=CRF*A3*exp(-E3/(R1*Tr))*((Ph2/Pt)^2-((Pch4/Pt)/k3eq));
r4=A4*exp(-E4/(R1*Tr))*((Pch4/Pt)*(Ph2o/Pt)-
((Pco/Pt)*(Ph2/Pt)^3)/k4eq));

%tasa de formacion de especies [mol/s*m^3]

```

```

R_c=(-r1-r2-r3);
R_co=(2*r1+r2+r4);
R_co2=-r1;
R_ch4=(r3-r4);
R_h2o=(-r2-r4);
R_h2=(r2-2*r3+3*r4);

%delta H de reaccion
dH1=172.459; %[kJ/mol]
dH2=131.293;
dH3=-74.520;
dH4=205.813;

%capacidad calorifica molar [kJ/mol k]
function c_C

%Parametros
R=8.314*10^3; %[kJ/mol k]
a=1.771;
b=0.771*10^3;
c=0;
d=-0.867*10^-5;

%Entalp?a
    c_c=10^3*R*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)-d*(T0^-1-T_ref^-
1))/1000; %con esto se obtiene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function c_N2

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=28.9;
b=-1.57*10^-3;
c=8.08*10^-6;
d=-2.87*10^-9;

%Entalp?a
c_n2=10^3*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-T_ref^3)+d/4*(T0^4-
T_ref^4)); %con esto se obtiene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function c_H2

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=29.11;
b=0; %-1.92*10^-3;
c=0; %4.0*10^-6;
d=0; %8.7*10^-10;

%Entalp?a
c_h2=10^3*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-T_ref^3)+d/4*(T0^4-
T_ref^4)); %con esto se obtiene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function c_CO2

```

```

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=22.26;
b=5.98*10^-2;
c=-3.5*10^-5;
d=7.47*10^-9;

%Entalp?a
c_co2=10^3*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-T_ref^3)+d/4*(T0^4-
T_ref^4));%con esto se obtiene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function c_CO

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=28.16;
b=1.68*10^-3;
c=5.37*10^-6;
d=-2.22*10^-9;

%Entalp?a
c_co=10^3*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-T_ref^3)+d/4*(T0^4-
T_ref^4));%con esto se obtiene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
function c_CH4

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=19.89;
b=5.02*10^-2;
c=1.27*10^-5;
d=-1.1*10^-8;

%Entalp?a
c_ch4=10^3*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-T_ref^3)+d/4*(T0^4-
T_ref^4));%con esto se obtiene la entalp?a en [kJ/kmol]J/kmol]
end
function c_H2O

%Parametros
R=8.314; %[J/mol k]
a=32.34;
b=0;
c=0;
d=0;

%Entalp?a
c_h2o=10^3*(a*(T0-T_ref)+b/2*(T0^2-T_ref^2)+c/3*(T0^3-T_ref^3)+d/4*(T0^4-
T_ref^4));%con esto se obtiene la entalp?a en [kJ/kmol]
end
c_C;
c_N2;
c_H2;
c_CO;

```

```

c_CO2;
c_CH4;
c_H2O;
% Sumatorias de ecuaciones
n=nrc+nrcO+nrcO2+nrcH4+nrcH2O+nrcH2;%+nrcn2;%[kmol/m3]
sum_nc=nrc*c_c+nrcO*c_co+nrcO2*c_co2+nrcH4*c_ch4+nrcH2O*c_h2O+nrcH2*c_h2+nrcn2*c_n2;
sum_R=R_c+R_co+R_co2+R_ch4+R_h2O+R_h2;
sum_Rc=c_c*R_c+c_co*R_co+c_co2*R_co2+c_ch4*R_ch4+c_h2O*R_h2O+c_h2*R_h2;
sum_rdH=r1*dH1+r2*dH2+r3*dH3+r4*dH4;

%BALANCES
nrs=zeros(10,1);

%Balance de moles (masa)
nrs=zeros(9,1);
nrs(1,1)=(1/vel)*(R_c-nrc*((vel-vel0)/z));%dnCDz
nrs(2,1)=(1/vel)*(R_co-nrcO*((vel-vel0)/z));%dnCOdz
nrs(3,1)=(1/vel)*(R_co2-nrcO2*((vel-vel0)/z));%dnCO2dz
nrs(4,1)=(1/vel)*(R_ch4-nrcH4*((vel-vel0)/z));%dnCH4dz
nrs(5,1)=(1/vel)*(R_h2O-nrcH2O*((vel-vel0)/z));%dnH2Odz
nrs(6,1)=(1/vel)*(R_h2-nrcH2*((vel-vel0)/z));%dnH2dz

%Balance de energia
nrs(7,1)=(1/(vel*sum_nc))*(-sum_rdH-P*((vel-vel0)/z)-vel*((P-P0)/z)-sum_Rc*Tr);%dTdz

%Caída de presión por ecuación de Ergun
nrs(8,1)=1183*1.1*vel^2+388.19*vel-79.896;
nrs(8,1)=1183*((Pn2*28/(R*Tr))*vel^2)/(nrc*12+nrcO*28+nrcO2*44+nrcH4*16+nrcH2O*18+nrcH2*2)+388.19*vel-79.896;%dpdz

%cambio de velocidad del gas en el gasificador
nrs(9,1)=(1/(sum_nc+R*n))+((sum_R*sum_nc/n)-(sum_rdH/Tr)-sum_Rc-((P-P0)/z))*((vel/Tr)+(vel*sum_nc/P));%dvdz

end

```

## Obtención Potencia Eléctrica (generación\_elec.m)

```
function elec=generacion_elec(nf,nps,S,Rp,beta,porcentajes_masa)
%porcentajes materiales que entran al proceso
p_org=Rp(2)/100;
p_pc=Rp(3)/100;
p_pod=Rp(4)/100;
p_pla=Rp(5)/100;
%cenizas por material entrante en base humeda
c_org=5/100;
c_pc=5.5/100;
c_pod=4.5/100;
c_pla=10/100;
%Porcentajes syngas, char y cenizas
p_co=porcentajes_masa(1)/100;
p_co2=porcentajes_masa(2)/100;
p_ch4=porcentajes_masa(3)/100;
p_h2o=porcentajes_masa(4)/100;
p_h2=porcentajes_masa(5)/100;
p_n2=porcentajes_masa(6)/100;
p_char=1-(p_co+p_co2+p_ch4+p_h2o+p_h2+p_n2);
p_ash=p_org*c_org+p_pc*c_pc+p_pod*c_pod+p_pla*c_pla;
%Masa de biomasa que entra al proceso
M_bio=(Rp(1)*(p_org+p_pc+p_pod+p_pla))/3600; %[kg/s]
PM_bio=nf(5);
n_cf=S(1);
n_cv=nps(1);
n_h2=nps(5);
PM_O2=32;
PM_N2=28;
%Peso molecular aire
PM_aire=0.21*PM_O2+0.79*PM_N2;
%Calculo de moles de O2 y N2 que entran al sistema por cada mol de
biomasa
n_o2=(n_h2+2*n_cv+2*n_cf)*beta/2;
n_n2=n_o2*3.76/2;
%Moles de biomasa IN
n_bio=M_bio/PM_bio; %[kmol/s]
%moles de aire IN
n_aire=(n_o2+n_n2)*n_bio; %[kmol/s]
%Masa de aire IN
M_aire=n_aire/PM_aire;
%Masa ceniza OUT
M_ash=p_ash*M_bio;
%Masa Char OUT
M_char=p_char*(M_bio+M_aire);
%Masa de agua OUT
M_h2o=p_h2o*(M_bio+M_aire);
%Masa de gas OUT
M_gas=(M_bio+M_aire)-(M_ash+M_char+M_h2o);
%Nuevos porcentajes quitando el agua y char
tot=p_co+p_co2+p_ch4+p_h2+p_n2;%nuevo 100%
pn_co=p_co/tot;
pn_co2=p_co2/tot;
pn_ch4=p_ch4/tot;
pn_h2=p_h2/tot;
```

```

pn_n2=p_n2/tot;
%PCI gases se considerab CO2 y N2 como inertes o PCI=0
PCI_h2=28642*4.184; %[kj/kg]
PCI_co=2414*4.184;
PCI_ch4=11940*4.184;
%PCI_mix para el gas de sintesis
PCI_syngas=PCI_co*pn_co+PCI_h2*pn_h2+PCI_ch4*pn_ch4; %[kj/kg]
%energia total syngas
E=PCI_syngas*M_gas; %[kW]
%Efieciencia del motor de combustion
eficiencia_motor_comb_baja=0.27;
eficiencia_motor_comb_alta=0.30;
MC_b=E*eficiencia_motor_comb_baja*10^-3; %[MW]
MC_a=E*eficiencia_motor_comb_alta*10^-3;
%Eficiencia de la caldera y turbina de vapor
eficiencia_cald_turbvap_baja=0.22;
eficiencia_cald_turbvap_alta=0.27;
CTV_b=E*eficiencia_cald_turbvap_baja*10^-3;
CTV_a=E*eficiencia_cald_turbvap_alta*10^-3;
elec=[MC_b,MC_a,CTV_b,CTV_a]';
end

```