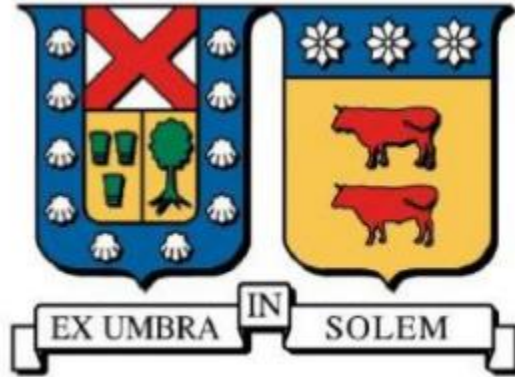


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
VALPARAÍSO-CHILE



**“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DE UN  
GASIFICADOR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS”**

**OSCAR PATRICIO ROBLES HERNANDEZ**

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.  
PROFESOR CORREFERENTE: ING. RAFAEL MENA Y.

*Dedicatoria*

*“La mente es como un paracaídas, solo funciona cuando la tenemos abierta”*

Albert Einstein

*“Como es arriba es abajo”*

Hermes Trismegisto

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecido de la vida por las oportunidades que me ha dado. Agradezco a mi familia, polola y amigos por estar conmigo y hacer de esta etapa una hermosa experiencia. Agradezco a la gente de GasBas, por la confianza, el aprendizaje y los buenos momentos.

## RESUMEN

En el marco del proyecto FIC-R 2017 “*Reducción de residuos sólidos urbanos con recuperación energética: valorización distribuida, tecnología y desarrollo comunitario*”, se desarrolló la tecnología de un gasificador rotatorio inclinado de medios porosos inertes, el cual, utilizando residuos sólidos urbanos como combustible, y buscando dar soluciones a grandes problemáticas ambientales y sociales que afectan hoy en día a diversas localidades del país, como lo es el tratamiento de residuos.

En un contexto de pandemia, se trabajó en finalizar el montaje, la puesta en marcha y operación del gasificador rotatorio inclinado utilizando plástico tipo HDPE y PET, algodón, cartón y papel blanco como combustible. Se variaron diversos parámetros de operación, como lo es la rotación, la inclinación, los flujos de premezcla y la composición de la carga, estudiando como afectaba cada uno de estos a la operación del gasificador, y su influencia en los perfiles térmicos registrados, la velocidad del frente de llama y el comportamiento de la presión en las diferentes líneas a lo largo de los ensayos. Se observaron los desechos producidos por cada uno de los materiales gasificados.

Dentro de todos los ensayos, las mayores temperaturas, y las más estables, se alcanzaron al gasificar HDPE, con una velocidad de filtración de 40 [cm/s]. En general, el HDPE demostró ser un combustible, teniendo un comportamiento idóneo, desde el momento de la trituración hasta la generación eléctrica. Sin embargo, sus inconvenientes son los desechos que genera, ya que parte del material decanta en estado líquido hacia el fondo del gasificador, para posteriormente solidificarse y cohesionar las esferas. En el análisis de cromatografía se observaron trazas de hidrógeno y monóxido de carbono, lo cual comprueba la generación de Syngas, el cual fue posteriormente puesto a prueba al acoplar el gasificador rotatorio inclinado a una unidad de generación eléctrica.

**Palabras claves:** Gasificador rotatorio inclinado, Syngas, Residuos Sólidos Urbanos.

## ABSTRACT.

Within the project FIC-R 2017 “*Municipal solid waste reduction with energy recover: distribute valorization, technology and communal development*”, the technology of rotary bend gasifier was developed, utilizing municipal solid waste as fuel, and looking for solution to environmental and social huge difficulties that affect nowadays to various zone of the country, as it is the waste treatment.

On a pandemic context, main works were complete the assembly, start-up, and the operation of the rotary bend gasifier, using HDPE and PET plastic, White paper, cardboard and cotton as a fuel. Various parameters were changed on the operation, as it is rotation, inclination, mixture Flow and charge composition, studying as they affect each one on the gasifier operation, and their influence on thermic profile, flame front velocity and the pressure behavior on the different lines. The garbage produce for each gasified material was studied.

Between all the test, highest and stables temperatures were reached on HDPE gasification, with a 40 [cm/s] filtration velocity. HDPE demonstrated an acceptable behavior as a fuel, having an appropriate performance since the moment of grind until the electrical generation. However, an inconvenience is the garbage that it produces, which pour in a liquid phase until the bottom of the gasifier, solidifying and unite the sphere. On the chromatography analysis, trace of hydrogen and carbon monoxide were observed, which prove the Syngas generation, which afterwards was tested on the connection between the rotary bend gasifier and an electrical generation unity.

**Key words:** Rotary bend gasifier, Syngas, Municipal Solid Waste.

## GLOSARIO.

|                   |                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $F_r$ :           | Número de Froude [-].                                                        |
| $D_i$ :           | Diámetro interno [m].                                                        |
| $L$ :             | Largo [m].                                                                   |
| $\omega$ :        | Velocidad de rotación [rad/s].                                               |
| $\theta$ :        | Ángulo de reposo [°].                                                        |
| $G_t$ :           | Rendimiento térmico [-].                                                     |
| $V_f$ :           | Velocidad de filtración [m/s]                                                |
| $\dot{V}_t$ :     | Caudal total aire-combustible [m <sup>3</sup> /s]                            |
| $A_t$ :           | Área transversal [m <sup>2</sup> ]                                           |
| $\varepsilon$ :   | Porosidad del medio [-]                                                      |
| PCI:              | Poder calorífico inferior [MJ/kg]                                            |
| $\dot{V}_a$ :     | Flujo volumétrico de aire [m <sup>3</sup> /s].                               |
| $\dot{V}_{GLP}$ : | Flujo volumétrico de GLP [m <sup>3</sup> /s].                                |
| $\Phi$ :          | Relación combustible-aire [-].                                               |
| $V_{est}$ :       | Volumen de aire estequiométrico [Nm <sup>3</sup> aire/ Nm <sup>3</sup> GLP]. |
| $X_c$ :           | Fracción másica de carbono [-].                                              |
| $X_H$ :           | Fracción másica de hidrógeno [-].                                            |
| $v_{wi}$ :        | Velocidad de avance de frente de llama entre termopar i-1 y termopar i.      |

|               |                                                  |
|---------------|--------------------------------------------------|
| $d_{ij}$ :    | Distancia entre termopar j y termopar i.         |
| $CO$ :        | Monóxido de carbono.                             |
| $MPI$ :       | Medios porosos inertes.                          |
| $CO_2$ :      | Dióxido de carbono.                              |
| $H_2$ :       | Hidrógeno.                                       |
| $H_2O$ :      | Vapor de agua.                                   |
| $NO_x$ :      | Óxidos de nitrógeno.                             |
| $SO_2$ :      | Dióxido de azufre.                               |
| $CH_4$ :      | Metano.                                          |
| $PM_x$ :      | Material particulado inferior a $x$ [ $\mu m$ ]. |
| $PVC$ :       | Policloruro de vinilo.                           |
| $PET$ :       | Polietileno tereftalato.                         |
| $HDPE$ :      | Polietileno de alta densidad.                    |
| $LDPE$ :      | Polietileno de baja densidad.                    |
| $PP$ :        | Polipropileno.                                   |
| $PS$ :        | Poliestireno.                                    |
| $GLP$ :       | Gas licuado de petróleo.                         |
| $C_3H_8$ :    | Propano.                                         |
| $C_4H_{10}$ : | Butano.                                          |
| $C_xH_y$ :    | Hidrocarburos.                                   |

$H_2S$ :      Ácido Sulhídrico.

## ÍNDICE GENERAL.

|                                                                        |      |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| <i>Dedicatoria</i> .....                                               | i    |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                  | ii   |
| RESUMEN.....                                                           | iii  |
| ABSTRACT.....                                                          | iv   |
| GLOSARIO. ....                                                         | v    |
| ÍNDICE GENERAL.....                                                    | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS. ....                                                 | xii  |
| ÍNDICE DE GRÁFICOS.....                                                | xii  |
| ÍNDICE DE FIGURAS:.....                                                | xiv  |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                                   | 1    |
| 2. OBJETIVOS.....                                                      | 4    |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL .....                                             | 4    |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                        | 4    |
| 3. ESTADO DEL ARTE. ....                                               | 5    |
| 3.1 HORNOS ROTATORIOS HORIZONTALES.....                                | 5    |
| 3.1.1 TIPOS DE HORNOS ROTATORIOS .....                                 | 6    |
| 3.1.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y ELEMENTOS PRINCIPALES.....             | 9    |
| 3.1.3 EFECTOS MECÁNICOS.....                                           | 15   |
| 3.1.4 EJEMPLOS DE APLICACIÓN .....                                     | 18   |
| 3.2 GASIFICACIÓN DE BASURA .....                                       | 20   |
| 3.2.1 PROCESO DE GASIFICACIÓN.....                                     | 20   |
| 3.2.2 TIPOS DE GASIFICADORES .....                                     | 22   |
| 3.2.2.1 GASIFICADOR DE CORRIENTE ASCENDENTE O TIRO<br>DIRECTO .....    | 22   |
| 3.2.2.2 GASIFICADOR DE CORRIENTE DESCENDENTE O TIRO<br>INVERTIDO ..... | 23   |
| 3.2.2.3 GASIFICADOR DE TIRO TRANSVERSAL .....                          | 24   |

|         |                                                                    |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.2.4 | GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO .....                              | 24 |
| 3.2.2.5 | GASIFICACIÓN EN MEDIOS POROSOS INERTES .....                       | 26 |
| 3.2.3   | ETAPAS DE GASIFICACIÓN .....                                       | 28 |
| 3.2.3.1 | ETAPA DE SECADO .....                                              | 29 |
| 3.2.3.2 | PIRÓLISIS O ETAPA DE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA.....                   | 29 |
| 3.2.3.3 | OXIDACIÓN PARCIAL O ETAPA DE COMBUSTIÓN .....                      | 29 |
| 3.2.3.4 | ETAPA DE REDUCCIÓN .....                                           | 30 |
| 3.2.4   | TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN GASIFICACIÓN DE BASURA..                 | 30 |
| 3.2.5   | AGENTES GASIFICANTES.....                                          | 33 |
| 3.2.6   | GASES PRODUCTOS .....                                              | 34 |
| 3.2.7   | BASURA EN LA GASIFICACIÓN .....                                    | 37 |
| 3.2.7.1 | MATERIA ORGÁNICA .....                                             | 38 |
| 3.2.7.2 | PAPELES Y CARTONES.....                                            | 40 |
| 3.2.7.3 | PLÁSTICOS .....                                                    | 41 |
| •       | POLIETILENO TEREFALATO (PET).....                                  | 42 |
| •       | POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE) .....                          | 42 |
| •       | POLICLORURO DE VINILO (PVC) .....                                  | 42 |
| •       | POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE).....                           | 43 |
| •       | POLIPROPILENO (PP).....                                            | 43 |
| •       | POLIESTIRENO (PS) .....                                            | 44 |
| 3.2.7.4 | TEXTILES .....                                                     | 45 |
| 4.      | DESARROLLO EXPERIMENTAL. ....                                      | 47 |
| 4.1     | DETERMINACIÓN DE CAUDALES AIRE Y GLP. ....                         | 47 |
| 4.2     | DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS. ....                        | 50 |
| 4.2.1   | GASIFICADOR ROTATORIO INCLINADO DE MEDIOS<br>POROSOS INERTES ..... | 50 |
| 4.2.2   | ESTRUCTURA SOPORTE FIJA Y MÓVIL.....                               | 52 |
| 4.2.3   | ALIMENTACIÓN DE AIRE Y COMBUSTIBLE .....                           | 54 |
| 4.2.4   | ADQUISICIÓN DE DATOS.....                                          | 55 |
| 4.2.5   | SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO .....                         | 57 |

|        |                                                                                     |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.6  | MEDICIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN .....                                               | 59  |
| 4.2.7  | TRITURACIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS .....                                         | 62  |
| 4.3    | PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....                                                  | 65  |
| 4.3.1  | PROCEDIMIENTO DE TRITURACIÓN.....                                                   | 65  |
| 4.3.2  | PROCEDIMIENTO DE CARGA DEL GASIFICADOR. ....                                        | 66  |
| 4.3.3  | PROCEDIMIENTO DE ENCENDIDO DEL GASIFICADOR.....                                     | 67  |
| 4.3.4  | PROCEDIMIENTO DE APAGADO DEL GASIFICADOR.....                                       | 69  |
| 4.3.5  | PROCEDIMIENTO DE DESCARGA DEL GASIFICADOR. ....                                     | 69  |
| 4.3.6  | PROCEDIMIENTO PARA UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE<br>ANÁLISIS DE EMISIONES GASEOSAS..... | 70  |
| 4.3.7  | PROCEDIMIENTO TOMA DE MUESTRA PARA<br>CROMATOGRAFÍA.....                            | 71  |
| 5.     | ANÁLISIS EXPERIMENTAL. ....                                                         | 72  |
| 5.1    | ENSAYOS ESTÁTICOS (0 RPM).....                                                      | 72  |
| 5.1.1  | ENSAYO #1 LÍNEA BASE $vf = 20cms$ .....                                             | 73  |
| 5.1.2  | ENSAYO #2 LÍNEA BASE $vf = 30cms$ .....                                             | 74  |
| 5.1.3  | ENSAYO #3 LÍNEA BASE $vf = 40cms$ .....                                             | 75  |
| 5.1.4  | ENSAYO #4 LECHO HÍBRIDO HDPE. ....                                                  | 76  |
| 5.1.5  | ENSAYO #5 LECHO HÍBRIDO PET. ....                                                   | 81  |
| 5.1.6  | ENSAYO #6 LECHO HÍBRIDO PAPEL BLANCO.....                                           | 83  |
| 5.1.7  | ENSAYO #7 LECHO HÍBRIDO CARTON. ....                                                | 86  |
| 5.1.8  | ENSAYO #8 LECHO HÍBRIDO ALGODÓN.....                                                | 89  |
| 5.1.9  | ENSAYO #9 LECHO HÍBRIDO MEZCLA DE RSU. ....                                         | 91  |
| 5.1.10 | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS ESTÁTICOS (0 RPM).<br>94                           |     |
| 5.2    | ENSAYOS CON ROTACIÓN (15 RPM). ....                                                 | 96  |
| 5.2.1  | ENSAYO #10 LECHO INERTE.....                                                        | 97  |
| 5.2.2  | ENSAYO #11 LECHO HÍBRIDO HDPE-PET.....                                              | 99  |
| 5.2.3  | ENSAYO #12 LECHO HÍBRIDO PET. ....                                                  | 101 |
| 5.2.4  | ENSAYO #13 LECHO HÍBRIDO HDPE. ....                                                 | 104 |

|        |                                                                               |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.5  | ENSAYO #14 LECHO HÍBRIDO MEZCLA DE RSU.....                                   | 108 |
| 5.2.6  | ENSAYO #15 LECHO INERTE.....                                                  | 111 |
| 5.2.7  | ENSAYO #16 LECHO HÍBRIDO PET. ....                                            | 113 |
| 5.2.8  | ENSAYO #17 MEZCLA DE RSU.....                                                 | 116 |
| 5.2.9  | ENSAYO #18 LECHO HÍBRIDO HDPE.....                                            | 119 |
| 5.2.10 | RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS CON ROTACIÓN...                              | 121 |
| 6.     | ACOPLE DE GASIFICADOR ROTATORIO A MÓDULO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.....         | 127 |
| 6.1    | UNIDAD GEK.....                                                               | 127 |
| 6.1.1  | TOLVA DE ALMACENAMIENTO. ....                                                 | 127 |
| 6.2    | ACOPLE GASIFICADOR PROTOTIPO A UNIDAD GEK.....                                | 130 |
| 6.2.1  | ACONDICIONAMIENTO UNIDAD GEK.....                                             | 131 |
| 6.2.2  | ENSAYO #1 ACOPLE GASIFICADOR A GEK.....                                       | 132 |
| 6.2.3  | ENSAYO #2 ACOPLE GASIFICADOR A GEK.....                                       | 134 |
| 6.2.4  | ENSAYO #3 ACOPLE GASIFICADOR A GEK.....                                       | 137 |
| 6.2.5  | RESULTADOS Y ANÁLISIS ENSAYOS CON ACOPLE DEL GASIFICADOR A LA UNIDAD GEK..... | 139 |
| 7.     | CONCLUSIONES .....                                                            | 140 |
|        | REFERENCIAS.....                                                              | 142 |

## ÍNDICE DE TABLAS.

|                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1: Composición porcentual de los gases producto, respecto a su peso [16]. ....                                                                                 | 21  |
| Tabla 2: Composición de materia orgánica [27-31].....                                                                                                                | 39  |
| Tabla 3: Composición del papel [32]. ....                                                                                                                            | 41  |
| Tabla 4: Composición de plásticos [34-37]. ....                                                                                                                      | 45  |
| Tabla 5: Composición del tejido textil [38]. ....                                                                                                                    | 46  |
| Tabla 6: Composición elemental de GLP, propano y butano. ....                                                                                                        | 49  |
| Tabla 7: Flujos de aire y combustible utilizado a lo largo de los ensayos. ....                                                                                      | 49  |
| Tabla 8: Composición recomendada por GIMEL y composición utilizada en el ensayo #9.....                                                                              | 92  |
| Tabla 9: Detalle de composición utilizada, en volumen y masa, para el ensayo #9. ..                                                                                  | 92  |
| Tabla 10: Composición de mezcla, en volumen y masa, utilizada en ensayo #14. ..                                                                                      | 108 |
| Tabla 11: Composición usada, en volumen y masa, en ensayo #17. ....                                                                                                  | 117 |
| Tabla 12: Temperaturas máximas y promedio para cada termopar, durante ensayos de gasificación de HDPE. ....                                                          | 122 |
| Tabla 13: Temperaturas máximas y promedio para cada termopar, durante ensayos de gasificación de PET.....                                                            | 123 |
| Tabla 14: Temperaturas máximas y promedio para cada termopar, durante ensayos de gasificación de mezcla. ....                                                        | 123 |
| Tabla 15: Velocidades alcanzadas por el frente de llama entre cada termopar para cada uno de los ensayos, y sus respectivos promedios dentro del lecho híbrido. .... | 125 |
| Tabla 16: Valores de $\Phi$ y velocidad de filtración utilizados en el ensayo #2 de acople de gasificador a unidad GEK. ....                                         | 135 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS.

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1: Temperatura vs tiempo ensayo #1. ....                       | 74 |
| Gráfico 2: Temperatura vs tiempo ensayo #2. ....                       | 75 |
| Gráfico 3: Temperatura vs tiempo ensayo #3. ....                       | 76 |
| Gráfico 4: Temperatura vs tiempo ensayo #4. ....                       | 79 |
| Gráfico 5: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #4. ....        | 79 |
| Gráfico 6: Temperatura vs tiempo para el enfriamiento, ensayo #4. .... | 80 |
| Gráfico 7: Temperatura vs tiempo ensayo #5. ....                       | 82 |
| Gráfico 8: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #5. ....        | 82 |
| Gráfico 9: Temperatura vs tiempo ensayo #6. ....                       | 85 |
| Gráfico 10: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #6. ....       | 85 |
| Gráfico 11: Temperatura vs tiempo ensayo #7. ....                      | 88 |
| Gráfico 12: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #7. ....       | 88 |

|                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 13: Temperatura vs tiempo ensayo #8. ....                                                   | 90  |
| Gráfico 14: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #8. ....                                    | 90  |
| Gráfico 15: Temperatura vs tiempo ensayo #9. ....                                                   | 94  |
| Gráfico 16: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #9. ....                                    | 94  |
| Gráfico 17: Avance frente de llama vs espacio durante distintos ensayos de<br>gasificación. ....    | 96  |
| Gráfico 18: Temperatura vs tiempo ensayo #10. ....                                                  | 98  |
| Gráfico 19: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #10. ....                                   | 99  |
| Gráfico 20: Temperatura vs tiempo ensayo #11a. ....                                                 | 100 |
| Gráfico 21: Temperatura vs tiempo ensayo #11b. ....                                                 | 101 |
| Gráfico 22: Temperatura vs tiempo ensayo #12. ....                                                  | 102 |
| Gráfico 23: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #12. ....                                   | 103 |
| Gráfico 24: Temperatura vs tiempo ensayo #13. ....                                                  | 106 |
| Gráfico 25: Temperatura vs tiempo módulo OMEGA ensayo #13. ....                                     | 106 |
| Gráfico 26: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #13. ....                                   | 107 |
| Gráfico 27: Temperatura vs tiempo ensayo #14. ....                                                  | 110 |
| Gráfico 28: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #14. ....                                     | 110 |
| Gráfico 29: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #14. ....                                   | 111 |
| Gráfico 30: Temperatura vs tiempo ensayo #15. .... <b>¡Error! Marcador no definido.</b>             |     |
| Gráfico 31: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #15. ....                                     | 113 |
| Gráfico 32: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #15. ....                                   | 113 |
| Gráfico 33: Temperatura vs tiempo ensayo #16. ....                                                  | 115 |
| Gráfico 34: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #16. ....                                     | 115 |
| Gráfico 35: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #16. ....                                   | 116 |
| Gráfico 36: Temperatura vs tiempo ensayo #17. ....                                                  | 118 |
| Gráfico 37: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #17. ....                                     | 118 |
| Gráfico 38: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #17. ....                                   | 119 |
| Gráfico 39: Temperatura vs tiempo ensayo #18. ....                                                  | 120 |
| Gráfico 40: Temperatura vs tiempo módulo OMEGA ensayo #18. ....                                     | 121 |
| Gráfico 41: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #18. ....                                   | 121 |
| Gráfico 42: Avance frente de llama para ensayos de gasificación de HDPE. ....                       | 124 |
| Gráfico 43: Avance frente de llama para ensayos de gasificación de PET. ....                        | 125 |
| Gráfico 44: Avance frente de llama para ensayos de gasificación de mezcla de RSU.<br>.....          | 125 |
| Gráfico 45: Temperatura vs tiempo ensayo #1 acople gasificador a unidad GEK. ..                     | 133 |
| Gráfico 46: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #1 acople gasificador a<br>unidad GEK. .... | 134 |
| Gráfico 47: Temperatura vs tiempo ensayo #2 acople gasificador a unidad GEK. ..                     | 136 |
| Gráfico 48: Temperatura vs tiempo ensayo #3 acople gasificador a unidad GEK. ..                     | 138 |

## ÍNDICE DE FIGURAS:

|                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1:Esquema de horno rotatorio a contraflujo. ....                                                                                                                                                                                                       | 5  |
| Figura 2: Esquema de distintos perfiles interiores de hornos rotatorios. Perfil de trébol a la izquierda, e inclusión de alzadores a la derecha. ....                                                                                                         | 6  |
| Figura 3: Dibujo conceptual de un horno húmedo, a la izquierda, e imagen real de este, en donde se pueden apreciar las cadenas interiores, a la derecha [4]. ....                                                                                             | 7  |
| Figura 4: Esquema de secador con acople al cuerpo cilíndrico. ....                                                                                                                                                                                            | 8  |
| Figura 5: Esquema de los diferentes regímenes de rotación y sus respectivos números de Froude.....                                                                                                                                                            | 10 |
| Figura 6: Tiempo de residencia del material dentro del horno a diferentes grados de inclinación y en un rango fijo de revoluciones [5].....                                                                                                                   | 11 |
| Figura 7: Esquema de distribución de la temperatura a lo largo del horno [8], y a través del radio de este [9]. ....                                                                                                                                          | 12 |
| Figura 8: A la izquierda, se observa la instalación de un horno sobre 3 apoyos. A la derecha, se muestra un CAD de un conjunto de apoyos, con su respectivo motor de accionamiento [11].....                                                                  | 14 |
| Figura 9: Variación del límite de fluencia, $S_y$ , y de la resistencia última, $S_{ut}$ , en función de la temperatura, de 21 aceros al carbono y aleados realizados en 145 pruebas [12].....                                                                | 16 |
| Figura 10: Efecto de la torsión en las fibras de un cuerpo cilíndrico [13]. ....                                                                                                                                                                              | 17 |
| Figura 11: Gasificador de corriente ascendente o tiro directo. ....                                                                                                                                                                                           | 22 |
| Figura 12: Gasificador de corriente descendente o tiro invertido. ....                                                                                                                                                                                        | 23 |
| Figura 13: Gasificador de tiro transversal. ....                                                                                                                                                                                                              | 24 |
| Figura 14: Gasificador de lecho fluidizado. ....                                                                                                                                                                                                              | 25 |
| Figura 15: Esquema general de un proceso de combustión en medios porosos inertes. ....                                                                                                                                                                        | 27 |
| Figura 16: Inestabilidad del frente de llama [19]. ....                                                                                                                                                                                                       | 28 |
| Figura 17: Esquema general de gasificador de biomasa en MPI inclinado rotativo... ..                                                                                                                                                                          | 28 |
| Figura 18: Esquema general de un sistema de gasificación en parrillas móviles [21]. ....                                                                                                                                                                      | 31 |
| Figura 19: Producción de hidrógeno (a la izquierda) y monóxido de carbono (al medio) en el gas producto, y PCI de este (a la derecha), en función de la razón de equivalencia del proceso para cada uno de los agentes de gasificación mencionados [22]. .... | 34 |
| Figura 20: Diferencia de ramificación entre HDPE y LDPE. ....                                                                                                                                                                                                 | 43 |
| Figura 21: Cuerpo principal del gasificador prototipo.....                                                                                                                                                                                                    | 51 |
| Figura 22: Isométrico conjunto estructura móvil. ....                                                                                                                                                                                                         | 52 |
| Figura 23: Isométrico conjunto estructura fija. ....                                                                                                                                                                                                          | 53 |
| Figura 24:Conjunto estructura fija y estructura móvil. ....                                                                                                                                                                                                   | 54 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 25: Módulo inalámbrico con sus respectivos sensores y batería del conjunto.                               | 57  |
| Figura 26: Módulo inalámbrico instalado en la carcasa, y sujetado al cuerpo del gasificador.                     | 57  |
| Figura 27: Plano vista frontal sistema de transmisión.                                                           | 58  |
| Figura 28: Equipo TESTO 350.                                                                                     | 61  |
| Figura 29: Juego de válvulas, jeringa de extracción y bolsa de muestreo para análisis de cromatografía.          | 61  |
| Figura 30: Sonda TESTO 350 instalada en ducto de escape.                                                         | 62  |
| Figura 31: Materiales triturados de manera óptima.                                                               | 63  |
| Figura 32: Residuos triturados de manera ineficiente.                                                            | 63  |
| Figura 33: Mezclas heterogéneas de papel, cartón y algodón con esferas de alúmina.                               | 65  |
| Figura 34: Distribución del lecho híbrido dentro del gasificador, para ensayos sin rotación.                     | 67  |
| Figura 35: Distribución del lecho híbrido dentro del gasificador, para ensayos con rotación.                     | 67  |
| Figura 36: Llama generada una vez la tapa fue retirada.                                                          | 77  |
| Figura 37: Perfil de media luna presente en el interior del gasificado, una vez gasificado el RSU.               | 78  |
| Figura 38: Cenizas presentes en la tapa del gasificador.                                                         | 78  |
| Figura 39: Masa café adheridas a esferas de alúmina durante ensayo estático de gasificación HDPE.                | 80  |
| Figura 40: Esferas retiradas desde el interior del gasificador, recubiertas por una sustancia negra y brillante. | 83  |
| Figura 41: Ceniza negra retirada desde el interior del gasificador.                                              | 83  |
| Figura 42: Cenizas presentes en las esferas y el interior del cilindro cerámico.                                 | 86  |
| Figura 43: Ceniza recolectada para ser masada.                                                                   | 86  |
| Figura 44: Llama que sale del interior del gasificador, durante gasificación de cartón.                          | 87  |
| Figura 45: Ceniza retirada desde el interior del gasificador, luego de gasificar cartón.                         | 89  |
| Figura 46: Ceniza presente en el interior del gasificador, luego de gasificar algodón.                           | 91  |
| Figura 47: Esferas pegadas en la pared del cilindro cerámico, luego de la gasificación de PET con rotación.      | 103 |
| Figura 48: Esferas retiradas del interior del gasificador, luego de la gasificación de PET con rotación.         | 104 |
| Figura 49: Condensado generado durante la gasificación.                                                          | 104 |

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 50: Esferas pegadas en la pared del cilindro cerámico, luego de la gasificación de PET con rotación. ....      | 107 |
| Figura 51: Desglose de partes de unidad GEK .....                                                                     | 130 |
| Figura 52: Acople de gasificador a unidad GEK. ....                                                                   | 131 |
| Figura 53: Llama proveniente desde el interior del gasificador, durante inyección de mezcla rica de combustible. .... | 136 |

## 1. INTRODUCCIÓN.

Desde la revolución industrial, el avance tecnológico que se ha alcanzado en nuestro planeta ha sido monumental, acrecentándose aún más en el último siglo. Esto tiene como resultado una mejora considerable en la calidad y desarrollo de la vida humana. Cada vez la esperanza de vida, en países desarrollados y en vías de desarrollo, es mayor. El acceso a nuevas tecnologías ha permitido lograr cosas impensadas. El desarrollo del automóvil y el transporte público ha permitido una mejor conectividad en las ciudades, facilitando el acceso de las personas a servicios básicos como salud y educación. El acceso a la energía es casi total en algunos países, y como nunca en la historia de la humanidad, una persona común y corriente puede tener acceso a una gran cantidad de información, con solo un aparato que guarda en su bolsillo. Sin embargo, no todo es color de rosas. El desarrollo tecnológico ha ido de la mano con el impacto ambiental que este provoca, y durante los últimos años es donde más presentes han estado sus consecuencias. La tecnología actual no sería posible sin un alto consumo energético, e incluso hoy en día, este es llevado a cabo principalmente por la explotación de combustibles fósiles, los cuales generan una enorme huella de carbono, principal responsable del efecto invernadero, el cual provoca que el calor emitido por el sol se mantenga en la tierra, subiendo la temperatura de esta día tras día. Por esta razón, gran parte de los países del globo se han preocupado de cambiar la matriz energética nacional, centrándose en la generación eléctrica producida por Energías Renovables No Convencionales (ERNC), dentro de las cuales se destaca la energía solar, energía eólica, energía nuclear, biomasa, entre otras. Chile no se queda atrás, y se ha propuesto la meta de que al año 2050, el 70% de la energía generada sea a través de ERNC [1].

Sumado al problema energético, el estándar de vida global actual, en donde los bienes materiales son de fácil acceso y de constante renovación, genera una enorme cantidad de residuos, los cuales no siempre son almacenados de manera correcta. No es extraño ver nuestras calles, playas y cerros repletos de basura. Los vertederos ilegales son cada

vez mayores, e incluso una gran cantidad de desechos termina a la deriva en el mar. Dentro de los desechos generados, el más problemático es el plástico, el cual debido a su fácil fabricación y bajo costo, está presente en la mayoría de los productos que consumimos, ocupando un porcentaje considerable de los residuos generados. La problemática aumenta al considerar que este material tarda alrededor de mil años en degradarse, por lo que es urgente encontrar una manera de reutilizar los residuos generados, y también de eliminar los residuos ya generados hace años, y que siguen contaminando nuestro ambiente hoy en día.

Es debido a estas 2 problemáticas, que surge el Proyecto FIC-R 2017, denominado *“Reducción de residuos sólidos urbanos con recuperación energética: valorización distribuida, tecnología y desarrollo comunitario”*, el cual busca dar una solución tecnológica, social y ambiental al problema energético y la generación de residuos. Utilizando la tecnología de gasificación en medios porosos inertes, se busca utilizar los residuos sólidos generados por la comunidad, para la generación de energía eléctrica y/o térmica. Para esto, se desarrolló un gasificador rotatorio inclinado, el cual se encargará de gasificar los residuos sólidos urbanos para generar el tan preciado Syngas, con el cual se alimentará un motor generador, para producir energía eléctrica. El proyecto va de la mano con el trabajo con las comunidades, planteando la comuna de La Ligua como espacio de implementación de la tecnología, y se ha mantenido una comunicación constante con el Liceo Pulmahue. La implementación de esta tecnología traerá consigo amplios beneficios en lo ambiental, social y económico. Solo en la quinta región de Valparaíso, se generan cerca de 750.000 toneladas de basura al año, lo cual se traduce en un gasto aproximado de CLP 28.000.000.000, en donde el 70% corresponden a gastos de transporte [2], ya que gran parte de los vertederos se encuentra centralizados, y comunas retiradas como La Ligua, deben incurrir en gastos mayores para que sus residuos sean transportados a estos. La tecnología propuesta proyecta un escalamiento a un gasificador modular, el cual permite un fácil almacenamiento y transporte, logrando así llegar a zonas aisladas, evitando que estas sean las que deban transportar sus residuos.

En base a lo anterior, y dentro del proyecto FIC-R 2017 nace el trabajo de título, ***“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DE UN GASIFICADOR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS”***, el cual busca evaluar las condiciones de operación del gasificador fabricado, y los resultados obtenidos, a través de la gasificación de los principales residuos producidos por la población local. Este trabajo de título se desarrolló en un contexto de pandemia, lo cual significó un obstáculo importante a la hora de desarrollar la tecnología de manera experimental. Debido a la imposibilidad de ingresar a la Universidad, por encontrarse en cuarentena la zona, se debió trasladar el equipo a la localidad de Artificio, en la comuna de La Calera, a un espacio facilitado por uno de los profesores participantes del proyecto. Esto significó un retroceso en la etapa de montaje, ya que el equipo estaba condicionado para trabajar en la Universidad, debiendo gestionar la compra y traslado de equipos propios y habilitar líneas de alimentación desde cero, lo cual significó un retroceso de meses en el desarrollo del proyecto. Sin embargo, y a pesar de los obstáculos, el gasificador logró ser operado de manera exitosa, y los resultados obtenidos son detallados en este escrito.

## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar experimentalmente la operación de un gasificador de residuos sólidos urbanos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir el estado de arte para procesos de gasificación de residuos sólidos y reactores rotatorios.
- Operar un gasificador de residuos sólidos urbanos variando los siguientes parámetros: revoluciones, ángulo de inclinación, flujos de premezcla, y composición y masa de la carga.
- Evaluar las condiciones de operación del reactor rotatorio en base a temperaturas, presión y desechos generados.
- Acoplar el gasificador rotatorio inclinado a un sistema convencional de generación eléctrica a partir de biomasa.

### 3. ESTADO DEL ARTE.

Para poder llevar a cabo este estudio fue necesario investigar los procesos de combustión en medios porosos, sus ventajas y aplicaciones; los procesos de gasificación; y propiedades y características de los combustibles a utilizar.

#### 3.1 HORNOS ROTATORIOS HORIZONTALES.

Los hornos rotatorios son intercambiadores de calor, en donde el material a calentar está en contacto directo, y generalmente a contraflujo, con el gas caliente. A su vez, el horno se encuentra en constante rotación, produciendo de esta forma una mezcla uniforme del material procesado. Estos suelen estar inclinados, y dependiendo de la aplicación, esta puede ir desde a un par de grados hasta ángulos superiores a los 45°.

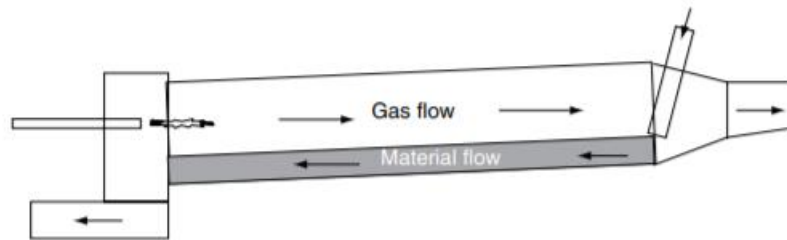


Figura 1:Esquema de horno rotatorio a contraflujo.

En la actualidad, estos hornos son utilizados en un amplio rango de procesos, como lo es la fabricación de cemento, procesos pirometalúrgicos en la minería, recuperación de residuos, entre otros. Esto debido a la flexibilidad que tienen de funcionar con diversos materiales, y a la capacidad de crear diversas atmósferas dentro de estos. No obstante, existen ciertas desventajas, como lo es la generación excesiva de cenizas, la baja eficiencia térmica y la calidad no homogénea de los productos, los cuales son factores para considerar al momento de utilizar.

La mayoría de los hornos sigue una configuración básica, que consiste en un cuerpo rígido cilíndrico y recto. Internamente, estos son recubiertos con ladrillos refractarios, que sirven de material aislante entre el gas caliente y la estructura de acero que forma el cuerpo del horno, procurando proteger esta carcasa, y disminuir las pérdidas de energía en forma de calor. El perfil interno de estos varía dependiendo de la aplicación, en donde se pueden incluir elementos como álabes, alzadores o secciones no regulares, ejemplificado en la figura 2, para facilitar la mezcla del material, promover el flujo axial de este, aumentar el tiempo de retención, etc.

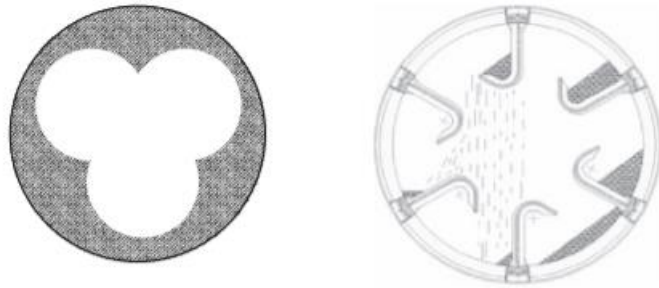


Figura 2: Esquema de distintos perfiles interiores de hornos rotatorios.  
Perfil de trébol a la izquierda, e inclusión de alzadores a la derecha.

### 3.1.1 TIPOS DE HORNOS ROTATORIOS

A pesar de que, prácticamente, cada aplicación tiene un horno específico para ella, los expertos y la industria suelen clasificarlos en 5 categorías [3]:

- Hornos húmedos
- Hornos largos secos
- Hornos cortos secos
- Enfriadores y secadores
- Hornos de calentamiento indirecto

Esto debido a que la configuración, equipamiento y procesos a lo largo del horno cambian drásticamente entre una y otra clasificación, así como el tratamiento del material a procesar. Los tipos mencionados anteriormente son descritos a continuación.

#### 3.1.1.1 HORNOS HÚMEDOS

Son utilizados generalmente con lodos y materiales con alta humedad, por lo cual deben contar con una gran longitud, del orden de los 150-180 metros. La alimentación está equipada con cadenas que sirven como recuperadores de calor, absorbiendo calor del gas y utilizándolo para precalentar el material que transporta. Estas cadenas también cumplen la función de romper las aglomeraciones formadas en el material debido a los cambios de fase dentro del horno. Para algunas aplicaciones, como por ejemplo la industria cementera, estos hornos no son eficientes, y han sido reemplazados por los hornos largos secos. Sin embargo, estos últimos no son adaptables para todos los procesos, por lo que los hornos húmedos siguen siendo ampliamente utilizados. Todo el proceso del material (precalentamiento, secado y calcinación) suceden dentro del mismo cuerpo.

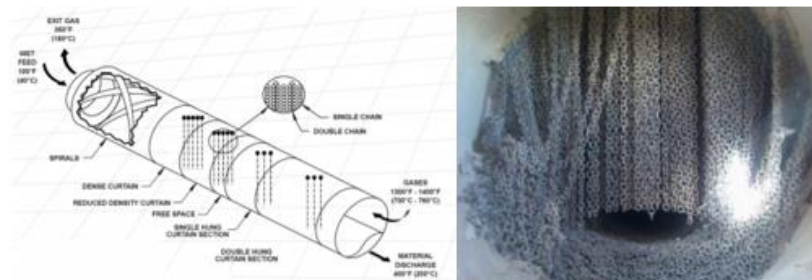


Figura 3: Dibujo conceptual de un horno húmedo, a la izquierda, e imagen real de este, en donde se pueden apreciar las cadenas interiores, a la derecha [4].

#### 3.1.1.2 HORNOS LARGOS SECOS

Estos hornos son más cortos que los hornos húmedos, con largos que varían entre los 90 y 120 metros, y al igual que estos, todo el proceso ocurre dentro del mismo cuerpo.

Estos hornos tienen un rendimiento eficiente con materiales de partículas grandes. Por su tamaño, no son capaces de procesar materiales demasiado húmedos.

#### **3.1.1.3 HORNOS CORTOS SECOS**

Estos hornos son acompañados por un precalentador externo, el cual seca y calienta el material antes de ingresar al horno principal. Es por esta razón que el cuerpo del horno suele ser pequeño, variando entre los 15 y 75 metros de largo. En los más pequeños el material entra casi calcinado.

#### **3.1.1.4 ENFRIADORES Y SECADORES**

Son equipados con alabes y alzadores internos para mezclar el material dentro del horno y romper su ángulo de reposo. Muchos de ellos pueden tener configuración de interruptor de ventiladores en vez del clásico cuerpo cilíndrico. Estos pueden ir en línea, o montado al cuerpo cilíndrico, como se observa en la figura 4. Este último diseño requiere cálculos estructurales mayores, debido al peso extra, y una exhaustiva mantención.

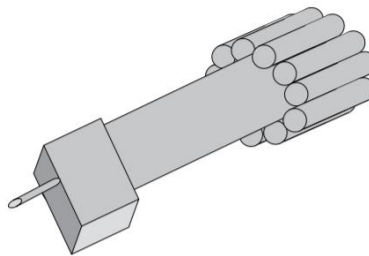


Figura 4: Esquema de secador con acople al cuerpo cilíndrico.

#### **3.1.1.5 HORNOS DE CALENTAMIENTO INDIRECTO**

En estos hornos, el calor es suministrado desde la parte externa de este, debido a que el contacto entre el material y el gas es indeseable. Debido a la baja eficiencia térmica, los calentadores son de tamaño pequeño, con diámetros del orden de 1 metro. Algo exclusivo de estos hornos es que se pueden lograr múltiples temperaturas localizadas en zonas de control a lo largo del horno, las cuales pueden ser controladas

eléctricamente o a través de la regulación de la llama. También se puede asegurar una atmósfera controlada para el material, el cuál puede ser sometidos a un mayor número de procesos, como lo son calcinación, reducción, oxidación controlada, carburización, entre otros.

### **3.1.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN Y ELEMENTOS PRINCIPALES**

A continuación, son descritos los principales parámetros de operación en un horno, y la importancia que tiene cada uno de ellos en el proceso correspondiente, además de los elementos necesarios a considerar al momento de la ingeniería conceptual.

#### **3.1.2.1 INCLINACIÓN Y ROTACIÓN**

La velocidad de rotación afecta en la manera en que el material se mueve dentro del horno. A bajas velocidades este desliza por las paredes interiores como un todo, sin producir mezcla alguna, mientras que a velocidades extremas se produce un efecto centrífugo, en el cual el material prácticamente se adhiere a las paredes del horno, permaneciendo prácticamente estático con respecto a éste. Dentro de distintos rangos de velocidad, se pueden producir las mezclas observadas en la figura 4, que varían entre el régimen deslizante hasta el centrífugo, ambos mencionados anteriormente. En el régimen de caída, el material se eleva hasta alcanzar su ángulo de reposo, posterior a eso este desciende de manera uniforme. En los regímenes de cascada y catarata, la ruptura de ángulo es más brusca, formándose una clase de olas dentro del cuerpo. Para clasificar dentro de que régimen se encuentra la rotación de un horno, se utiliza el número de Froude ( $Fr$ ), el cuál relaciona las fuerzas de inercia y de gravedad que actúan sobre el fluido, la cual se puede observar en la ecuación (1).

$$Fr = \frac{\omega^2 R_{Hi}}{g} \quad (1)$$

La inclinación del horno influye en el tiempo de residencia del material dentro de este, y suele ser muy leve, con ángulos no mayores a los 5°. Sin embargo, existen aplicaciones en donde esta puede llegar a los 45°, como lo es la gasificación. En la figura 6, se puede observar cómo afecta la inclinación y la velocidad de rotación del

horno en el tiempo de residencia del material. Se puede notar que, a menor velocidad e inclinación, el tiempo de residencia es menor. Es importante que el tiempo de residencia del material sea óptimo, ya que influye en como este es quemado, por lo que una residencia excesiva puede significar un gasto energético innecesario y mayor impacto ambiental, mientras que un tiempo deficiente implicaría que los procesos no son llevados a cabo en su totalidad. La inclinación también afecta al llenado que pueda tener el horno, pudiendo este contener mayor cantidad de material a medida que el ángulo de inclinación va disminuyendo.

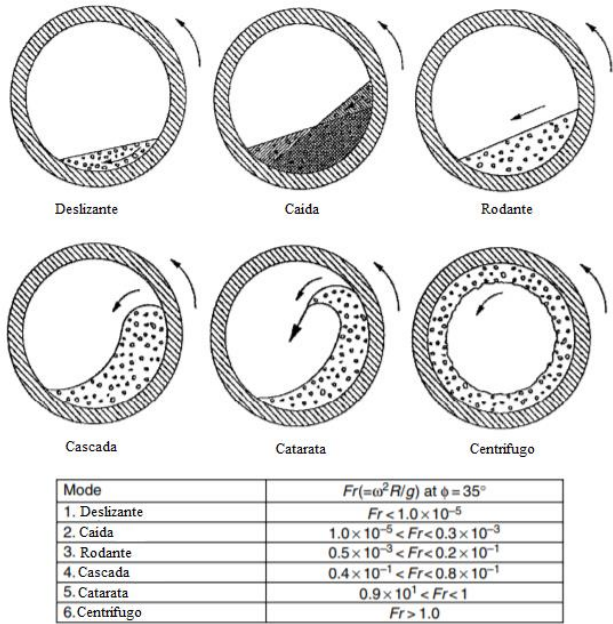


Figura 5: Esquema de los diferentes regímenes de rotación y sus respectivos números de Froude.

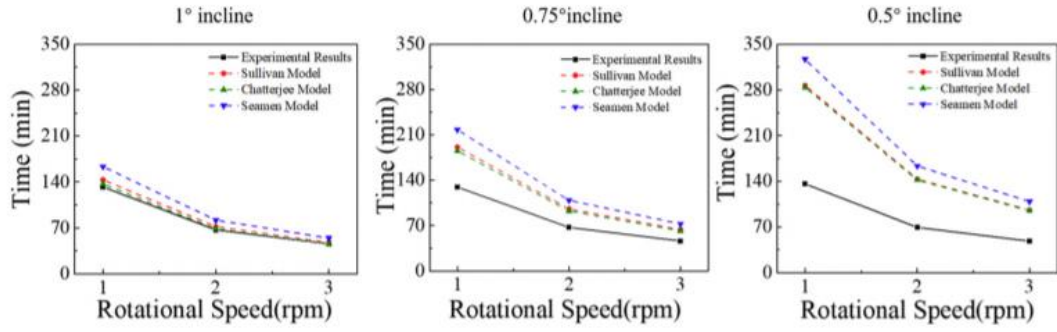


Figura 6: Tiempo de residencia del material dentro del horno a diferentes grados de inclinación y en un rango fijo de revoluciones [5].

### 3.1.2.2 LARGO Y DIÁMETRO

Las dimensiones físicas del cuerpo del horno influyen en el desplazamiento del material dentro de este. El tiempo de residencia, como se dijo en el punto 1.2.1, es un parámetro importante para un buen procesamiento del material, y también se ve afectado por el largo y el diámetro del cuerpo cilíndrico. De manera intuitiva, se puede coincidir que este es directamente proporcional al largo del horno, mientras lo es de manera inversa al diámetro interno de este. De manera experimental, ciertos investigadores han utilizado estos, y otros parámetros, para encontrar ecuaciones empíricas, en donde se puede ver la clara influencia de las dimensiones físicas en el tiempo de residencia en el horno. En 1927, John Sullivan, Charles Maier y Oliver Ralston, en su investigación *Passage of solid particles through rotary cylindrical kiln*, correlacionaron los datos experimentales para obtener una expresión (Ecuación 2) para el tiempo de permanencia, en función del largo ( $L$ ), diámetro interno ( $D_i$ ), inclinación del horno ( $\beta$ ), ángulo de reposo del material ( $\theta$ ) y velocidad de rotación ( $\omega$ ) [6].

$$t = 1,77 \frac{L}{D_i} \frac{\sqrt{\theta}}{\beta \omega} [s] \quad (2)$$

Otros investigadores han encontrado relación entre estos parámetros y el rendimiento térmico del horno. W. Alsem expresa el diámetro y la longitud del horno en función del rendimiento térmico diario de este ( $G_t$ ) [7] a través de las siguientes expresiones:

$$D = 0,396 \times G_t^{0,34} [m] \quad (3)$$

Y

$$L = 7,63 \times G_t^{0,45} [m] \quad (4)$$

en donde se puede observar que, aumentando ambos parámetros, longitud y diámetro, se puede lograr un aumento del rendimiento.

### 3.1.2.3 TEMPERATURA Y AISLACIÓN

Debido a que la fuente de calor está ubicada de manera fija en la parte inferior del horno, el calor se distribuye de 2 maneras dentro de este. La primera es a lo largo del horno, es decir, desde la parte inferior, donde está la fuente, hacia la parte superior. El gas caliente atraviesa el horno, cediendo calor tanto al material procesado como a las paredes del horno. A medida que avanza a través de este, el gas va perdiendo temperatura. A su vez, el calor se distribuye desde la parte interna del horno hacia el exterior de este. Ambos perfiles se pueden ver en la figura 7.

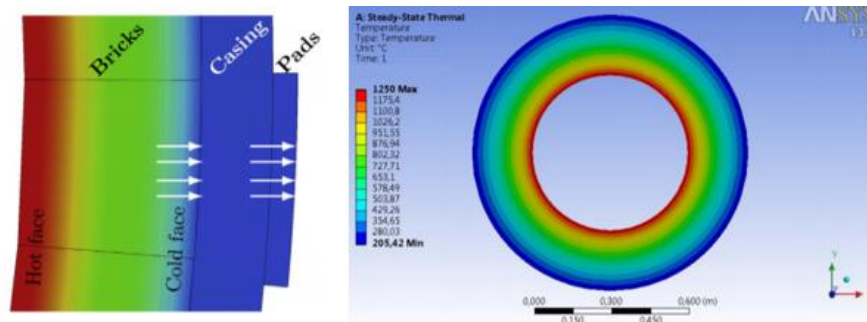


Figura 7: Esquema de distribución de la temperatura a lo largo del horno [8], y a través del radio de este [9].

Dentro del horno, la mayor parte del calor se transmite por radiación desde la llama y los gases calientes, la cual llega de forma directa a la superficie del material, y a la parte interna del cuerpo, absorbiendo esta última un mayor porcentaje del calor cedido. A su vez, las paredes del horno, al entrar en contacto con el material, transfieren calor por conducción, a través del contacto directo entre ellos, y por radiación, debido a las altas temperaturas de estas mismas.

A medida que el perfil de temperatura varía al interior del cuerpo, se van creando distintas zonas a medida que la temperatura cambia, y ahí es donde se llevarán a cabo cada uno de los procesos dentro del horno. En general, un horno seco tendrá 3 zonas de calentamiento, mientras que un horno húmedo tendrá 4 o más. La primera zona está constituida por la zona de secado, en donde los gases elevan la temperatura de forma más brusca llegando hasta unos 670°C [10]. Esta zona ocupa un 33% de la longitud total, siendo la más larga entre todas. La zona de precalentamiento ocupa un 14% del largo total, elevando la temperatura hasta el orden de los 850°C al final de esta. En la zona de calcinación se alcanzan temperaturas de reacción, y comienzan a ocurrir los procesos de cocción, clinkerización, entre otros. En la siguiente zona, la temperatura alcanza los puntos más elevados y las reacciones llegan a su fin. Ambas zonas ocupan el 45% del horno. En la parte final, el aire de enfriamiento se encarga de disminuir la temperatura según las necesidades de la aplicación.

Para proteger el cuerpo del horno de las altísimas temperaturas que se alcanzan en su interior, se es protegido con capas internas fabricadas con material aislante, generalmente de ladrillos refractarios, los cuales ocupan gran porcentaje del espesor total del horno. Estos ladrillos, debido a su baja conductividad térmica, se encargan de aislar el calor del interior del horno, manteniéndolo en las zonas de calentamiento, y evitando que la carcasa metálica alcance temperaturas demasiado elevadas. Para lograr un mayor control de la temperatura externa, esta es constantemente monitoreada, y regulada a través de sistemas de refrigeración. Un alza muy abrupta de esta no solo tiene consecuencias en cuanto a la disminución de la eficiencia térmica, sino que también puede producir daños estructurales irreparables en el cuerpo del cilindro, como puede ser excesiva deformación, entorpeciendo así la rotación del horno. En cuanto a la aislación, esta no está compuesto del mismo material a lo largo del horno, sino que va cambiando en función de la zona, ya que el material sufre cambios en cada una de estas, y la estructura debe adaptarse a ellos. Cada uno de los grupos de ladrillos utilizados se caracterizan por su resistencia a la corrosión, abrasión, al choque térmico, entre otros, y está compuesto por materiales con baja conductividad térmica, siendo los

más utilizado en la industria los ladrillos silicoaluminoso, los cuales están formados por porcentajes variados de alúmina ( $Al_2O_3$ ) y sílice. ( $SiO_2$ ).

#### 3.1.2.4 ACCIONAMIENTO Y APOYOS

Para lograr que el cuerpo del horno se encuentre en constante rotación, se debe acoplar a un sistema de accionamiento mecánico, compuesto por un motor y su respectiva caja de velocidades. Para lograr esto, uno de los mecanismos más utilizados es energizar los rodillos, para que estos transmitan el movimiento al horno, a través del roce producido con el flange. De esta manera, se evita la instalación de elementos en el cuerpo del horno, como puede ser una corona de transmisión, los cuales incrementan considerablemente la transferencia de calor desde el horno al ambiente. El torque utilizado debe ser el suficiente para romper la inercia del cuerpo en su totalidad (estructura y material procesado), superar el roce producido por los apoyos y mantener el giro a las revoluciones necesarias. En cuanto a los apoyos, el cuerpo suele descansar en un juego de rodillos, que permite el libre giro sobre este, además de mantenerlo firme y en posición ante la acción de fuerzas radiales. Lo mínimo a utilizar, y por razones obvias, son dos pares de rodillos de apoyo, y el número necesarios de ellos es proporcional a la relación largo-diámetro del cuerpo, es decir, mientras más grande sea esta proporción, mayor es la cantidad de apoyos requerido.



Figura 8: A la izquierda, se observa la instalación de un horno sobre 3 apoyos. A la derecha, se muestra un CAD de un conjunto de apoyos, con su respectivo motor de accionamiento [11].

### **3.1.3 EFECTOS MECÁNICOS**

Al momento de diseñar un horno rotatorio, es importante identificar los esfuerzos a los cuales se someterá, y las posibles deformaciones que estos pueden provocar. Los principales factores para considerar son las temperaturas expuestas, que provoca dilatación térmica y cambios en las propiedades mecánicas de los materiales, la rotación del horno, que conlleva a la torsión del cuerpo, y el peso, tanto del horno como del material procesado, que, combinado con los respectivos apoyos, provoca una flexión del cuerpo, la cual sumada a la dilatación térmica, puede provocar daños irreparables en la estructura. Si bien las deformaciones son inevitables, es posible controlar la magnitud de estas, manteniéndola dentro de rangos aceptables, en base al análisis de esfuerzos y un correcto diseño mecánico.

#### **3.1.3.1 DILATACIÓN TÉRMICA**

Debido a la amplia variación de temperatura mientras el horno está operando y cuando este está en frío, el cuerpo cilíndrico se ve sometido a una dilatación lineal, tanto axial como radial. Si bien este proceso puede ser reversible, volviendo el cuerpo a la normalidad una vez recupera la temperatura en frío, las deformaciones producidas son necesarias de considerar en el diseño del cuerpo y de los equipos y elementos mecánicos acoplados a este. La incrementación del diámetro en la carcasa de acero produce un desplazamiento en la capa de aislación, el cuál puede resultar en un perfil disparejo a lo largo del cuerpo, y, por lo tanto, un desgaste irregular de los ladrillos refractarios, impactando considerablemente en la vida de estos. En los puntos de contacto del cuerpo con los apoyos, la expansión produce un choque entre ambas partes, en donde la carcasa comienza a desgastarse y perder espesor. Además, los apoyos, al impedir que el cuerpo se expanda radialmente en ese sector, provocan que este se curve en las vecindades de los descansos. Esta curvatura es también ampliada debido a los esfuerzos flectores, los cuales serán detallados en la sección **1.3.2**.

No solo el cuerpo se ve afectado por la dilatación, sino que los apoyos también sufren consecuencias, como lo es su desalineación, la cual es producida tanto por el empuje

ejercido por el cuerpo al expandirse, como por el giro irregular producido por la deformación del cuerpo. No solo las dimensiones físicas se ven afectadas por los cambios de temperatura, sino también las propiedades mecánicas varían a medida que aumenta la temperatura. Tanto el módulo de elasticidad como los límites de fluencia de los aceros van disminuyendo a medida que la temperatura va aumentando, amplificando las deformaciones producidas por los esfuerzos mecánicos a los cuales se ve sometido el horno.

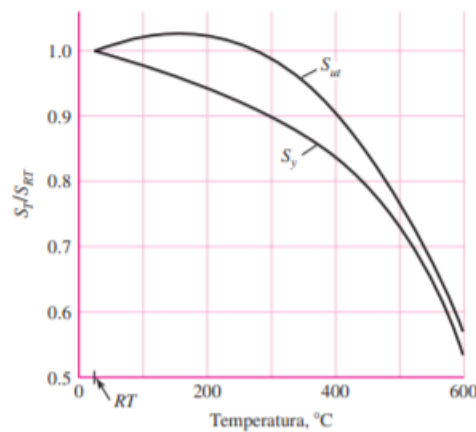


Figura 9: Variación del límite de fluencia,  $S_y$ , y de la resistencia última,  $S_{ut}$ , en función de la temperatura, de 21 aceros al carbono y aleados realizados en 145 pruebas [12].

### 3.1.3.2 RIGIDEZ LATERAL

A causa de los esfuerzos por flexión, es necesario que el cuerpo del horno sea lo suficiente rígido para que las deformaciones no produzcan vibraciones o ruidos que resulten en un desgaste irregular y desalineación de los descansos. Los esfuerzos de flexión en el horno son producidos por el propio peso de este, tanto del cuerpo como de la carga, en interacción con los apoyos, y varían a lo largo del cuerpo, teniendo su valor máximo en los puntos más alejados a los descansos. Esta variación es lineal, en el caso de que el horno descansa sobre rodillos, o cuadrático, en el caso de que los descansos abarquen todo el cuerpo, ya que de esta manera se forma un momento flector. Al estar cualquier cuerpo estático sometido a flexión, una parte de este está sometida a tracción, mientras que la otra está sometida a compresión. Sin embargo, como el horno

está en rotación constante, las partes en compresión y tracción de este se van intercambiando a través del tiempo. Esta variación de los esfuerzos tiene como consecuencia una disminución en las propiedades mecánicas del acero, pudiendo este fallar por fatiga, es decir, fallas mecánicas por debajo de los límites elásticos.

La deflexión del horno, es decir, el grado de desplazamiento debido a los esfuerzos flectores, se puede ver incrementada debido a las fuerzas centrífugas provocadas por la rotación de este. Si bien este aumento en la deflexión se suele dar a velocidades altas, la gran cantidad de masa que está sometida al giro contribuye a que la denominada velocidad crítica pueda ser cercana a las velocidades de operación. Es por eso que el análisis de este factor debe ser considerado.

### 3.1.3.3 RIGIDEZ TORSIONAL

El torque al cual está sometido el cuerpo, produce esfuerzos cortantes en su estructura, lo cual es conocido como torsión, y tiene como resultado un desplazamiento angular a lo largo del cuerpo. Al ser el cuerpo de sección circular, los esfuerzos cortantes varían a lo largo del espesor, teniendo su punto máximo en la parte exterior de la carcasa del horno. Para el análisis de la torsión, los factores influyentes son el momento torsional, que corresponde el torque producido por el sistema de transmisión de potencia en el cuerpo del horno, el momento producido por los apoyos como oposición al giro, la sección transversal del horno, y las propiedades mecánicas del acero, específicamente los módulos de elasticidad, tanto longitudinal como transversal.

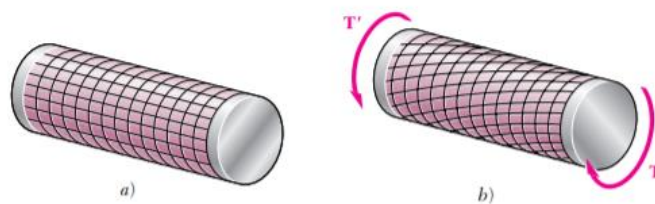


Figura 10: Efecto de la torsión en las fibras de un cuerpo cilíndrico [13].

### **3.1.3.4 CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS**

A lo largo del cuerpo, y en la mayoría de la superficie, los esfuerzos se distribuyen de manera uniforme. Sin embargo, hay zonas específicas en donde esto no ocurre, y los esfuerzos son elevados de manera abrupta. Estas zonas corresponden a lugares con cambios de sección muy abruptos, a las zonas perforadas en el cuerpo, y básicamente, cualquier discontinuidad en este. Este fenómeno es conocido como concentración de esfuerzos, y vuelve complejo el análisis de esfuerzos para cualquier cuerpo, ya que las ecuaciones clásicas no sirven, y deben ser modificadas para cada caso de aplicación, o simplemente recurrir a aproximaciones y relaciones empíricas. Para solucionar esto, se puede recurrir a técnicas como el método de elementos finitos (FEM), el cual también es útil para cuerpos con geometrías complejas y cargas variadas a lo largo de estos. FEM consiste en dividir, o discretizar, el cuerpo en pequeñas estructuras, siendo más pequeñas en lugares considerados críticos, como lo son los bordes, las zonas donde se cree que se pueden producir fracturas o las zonas donde ocurre concentración de esfuerzo, entre otras. Esta división en subestructuras se conoce como mallas, y su diseño es fundamental para este análisis. Una vez creada la malla, se procede a calcular las ecuaciones necesarias en cada uno de los nodos de esta, que corresponden a los puntos donde se unen las subestructuras. De esta forma, se consiguen numerosas ecuaciones de menor complejidad, las cuales son resueltas a través de métodos computacionales. FEM es útil no solo para el análisis estructural en las zonas de concentración de esfuerzos, sino que es utilizado para el análisis estructural del cuerpo completo bajo todos los esfuerzos sometidos, y que fueron mencionados en los puntos anteriores.

## **3.1.4 EJEMPLOS DE APLICACIÓN**

### **3.1.4.1 INDUSTRIA CEMENTERA**

El cemento es un material fundamental en el área de la construcción, siendo utilizado para la formación del hormigón, el cual tiene una muy buena resistencia a la compresión, característica que lo hace pieza clave para la construcción de estructuras

como edificios, puentes, entre otros. Durante la fabricación del cemento, las materias primas, luego de ser mezcladas, son calentadas a altas temperaturas para lograr la formación de Clinker, proceso al cual se le denomina Clinkerización. Este proceso se lleva a cabo dentro de un horno rotatorio de gran tamaño, con longitudes mayores a 30 metros y diámetros de hasta 6 metros. La rotación del horno suele ser entre 1 y 4 RPM, y su inclinación varía entre los 3° y 4° [14].

El material por calentar es ingresado por la parte superior del horno, lo que permite que este se dirige directamente a la llama, la cual es ubicada en la parte inferior del horno. El material es previamente secado, alcanzando humedades cercanas al 0,5%, y ocupa cerca del 10% del volumen total dentro del horno [15], alcanzando temperaturas máximas cercanas a los 1450°C. De esta forma, se llegan a producir entre 30 a 50 toneladas de Clinker diarias.

#### **3.1.4.2 HORNOS DE CAL**

La cal se obtiene a través de la calcinación de la caliza viva, proceso que ocurre a temperaturas del orden de los 900°C, y se lleva a cabo en un horno rotatorio. La relación largo-diámetro ( $L/D$ ) de estos varía entre 30-40, con largos entre los 20 y 150 metros y diámetros entre 1 y 3 metros, y una inclinación que varía entre los 3° y 5°. Son llenados con alrededor de un 10 % de su capacidad, y el tamaño promedio de la caliza es de 5 [cm]. Es necesario que el tamaño de la caliza sea pequeño para así aumentar la eficiencia térmica del equipo.

Para aumentar esta eficiencia y disminuir el consumo energético, son equipados con diversos elementos para recircular el calor, como lo son alzadores, precalentadores, etc., logrando un consumo promedio cercano a las 2000 [ $\frac{kcal}{kg}$ ].

#### **3.1.4.3 PIROMETALURGIA**

En el campo de la extracción minera, específicamente en cuanto a metales se trata, los hornos tienen un papel protagonista. Para procesar el mineral extraído y transformarlo

en el metal requerido, es necesario elevarlo a altas temperaturas, y pasar el material por una serie de procesos hasta alcanzar el estado de pureza requerido, procesos que son llevado a cabo en hornos de altas temperaturas, los cuales varían según el material y el proceso correspondiente. Los hornos rotativos son partícipes en una gran cantidad de estos procesos, entre los cuales se puede destacar el proceso SL/RN y el proceso Becher.

El proceso SL/RN es un proceso de reducción, en donde se alimenta el horno con óxidos de hierro y un reductor sólido, teniendo como resultado hierro reducido, conocido como DRI por sus siglas en inglés (Direct Reduction Iron). El diámetro de estos hornos es de 4 [m] aproximadamente, con largos cercanos a los 65 [m]. Su velocidad de rotación es de 5 [rpm], procesando cerca de  $40 \left[ \frac{TM}{hr} \right]$  de mineral, con tiempos de retención que varían entre las 8 y las 12 horas por carga.

En cuanto al proceso becher, este es utilizado para eliminar el óxido de hierro en la ilmenita, obteniendo de esto cerca de un 94 % de dióxido de titanio ( $TiO_2$ ), material inorgánico utilizado como pigmento para papeles, plásticos, textiles, etc. Este proceso alcanza temperaturas superiores a los 1000°C. La primera planta comercial en utilizar este proceso fue construida por la compañía Lurgi Metallurgie en el año 1968, en la ciudad de Capel, Australia. El horno correspondiente tenía un largo de 30 [m] y un diámetro de 2.4 [m]. Hoy en día los hornos utilizados son más grandes, con diámetros cercanos a los 4 metros y largos superiores a los 70 [m], capaces de procesar cerca de 900.000 toneladas métricas de ilmenita al año.

## **3.2 GASIFICACIÓN DE BASURA**

### **3.2.1 PROCESO DE GASIFICACIÓN**

El proceso de gasificación consta de la transformación de un combustible sólido a un combustible gaseoso, a través de diversas reacciones que ocurren a altas temperaturas y en presencia de un agente gasificante. Este proceso aporta mayor valor añadido al combustible sólido inicial a través de la obtención del gas producto. La composición

de este gas depende netamente del tipo de combustible sólido y del agente gasificante utilizado. Si el agente gasificante a utilizar es aire, se logra como resultado el denominado Gas Pobre, el cual tiene un bajo poder calorífico, mientras que, al utilizar vapor de agua u oxígeno como agente gasificante, se obtiene Gas de Síntesis, o Syngas por su nombre en inglés, el cual tiene mayor poder calorífico que el Gas Pobre. La composición de ambos gases se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición porcentual de los gases producto, respecto a su peso [16].

| Compuesto                                    | Gas Pobre (%) | Syngas (%) |
|----------------------------------------------|---------------|------------|
| <b>Monóxido de Carbono, <math>CO</math></b>  | 11 - 30       | 40 - 50    |
| <b>Dióxido de Carbono, <math>CO_2</math></b> | 6 - 16        | 10 - 20    |
| <b>Hidrógeno, <math>H_2</math></b>           | 10 - 20       | 25 - 80    |
| <b>Metano, <math>CH_4</math></b>             | 1 - 15        | 4 - 8      |
| <b>Nitrógeno, <math>N_2</math></b>           | 50            | -          |

En cuanto a composición y poder calorífico, el Syngas es más conveniente que el Gas Pobre, hablando en términos energéticos. Sin embargo, la operación con vapor de agua y/u oxígeno puro es poco rentable, debido a sus altos costos de producción. Es por esto por lo que se suele trabajar con mezclas pobres en aire, en donde la cantidad suministrada a este es entre un 20% y un 30% del aire estequiométrico necesario para la combustión, asegurando en parte una mayor producción de  $CO$ . A lo largo de este escrito, se denominara Syngas al gas generado, sin importar el tipo de gasificante utilizado.

Un proceso similar a la gasificación es la pirólisis, en donde la incineración se realiza en una atmósfera libre de oxígeno. Sin embargo, esto es técnicamente difícil de conseguir, ya que muchas veces el mismo material a incinerar este compuesto en parte por oxígeno, por lo que este se desprende del material y se adhiere a la atmósfera. Es debido a esto que la línea entre gasificación y pirólisis es muy delgada, y muchas veces

se usa el término gasificación de manera general a los procesos de incineración, aunque es necesario aclarar las diferencias, y similitudes, entre ambos.

### 3.2.2 TIPOS DE GASIFICADORES

#### 3.2.2.1 GASIFICADOR DE CORRIENTE ASCENDENTE O TIRO DIRECTO

El aire ingresa por la parte inferior del gasificador, mientras que los gases producto salen por la parte superior. Cerca del fondo, en la parrilla, tiene lugar la combustión, mientras que en la parte alta se produce el calentamiento, debido a la transferencia de calor por convección forzada y radiación. Los alquitranes y productos volátiles son arrastrados por los gases, mientras que las cenizas deben ser limpiadas del fondo de este. Las ventajas de este tipo de gasificador son su simplicidad de diseño y funcionamiento, el intercambio interno de calor, que tiene como consecuencias bajas temperaturas de salida del gas, y por ende alta eficiencia del equipo, y la posibilidad de funcionar con muchos tipos de carga (aserrín, cascaras de cereales, etc.), mientras que las desventajas son la eliminación de líquidos condensados, y la posibilidad de producción de “chimeneas”, lo cual puede producir explosiones debido a la acumulación excesiva de oxígeno. Se observa el diseño de un gasificador de corriente ascendente en la Figura 11.

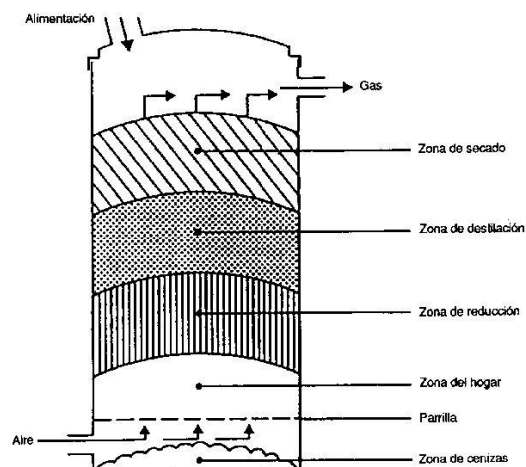


Figura 11: Gasificador de corriente ascendente o tiro directo.

### 3.2.2.2 GASIFICADOR DE CORRIENTE DESCENDENTE O TIRO INVERTIDO

En busca de una solución para el problema del arrastre de alquitrán por la corriente de gas, es que surge el gasificador de corriente descendente. El aire se introduce en la zona de oxidación del gasificador, mientras que el gas pobre sale por el fondo del gasificador, provocando que el gas y el combustible se muevan en la misma dirección, como se puede ver en la Figura 12.

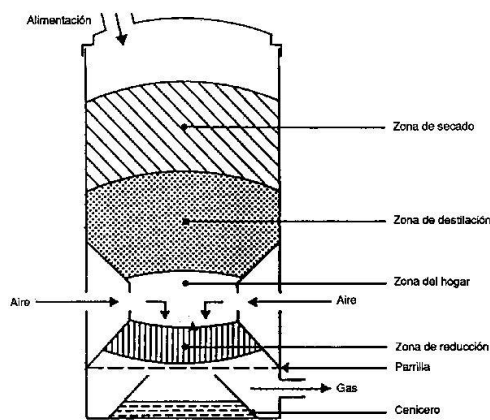


Figura 12: Gasificador de corriente descendente o tiro invertido.

Al descender, los alquitranes pasan a través de un lecho incandescente, transformándose en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano, logrando una descomposición de estos, la cual depende de las temperaturas y el tiempo de paso. La descomposición completa de estos alquitranes es algo difícil de lograr, sin embargo, con este tipo de gasificador se reduce considerablemente la cantidad de alquitranes, permitiendo que el gas producido sea apropiado para aplicarlo en Motores de Combustión Interna.

Uno de los inconvenientes de estos equipos es la imposibilidad de funcionar con cierto tipo de combustibles no elaborados. Los materiales blandos y de baja densidad producen problemas de circulación y una caída excesiva en la presión, por lo que el combustible debe ser tratado antes de utilizarlo. Otra desventaja de esta tecnología es

su menor eficiencia en comparación al de tiro directo, debido a la eficiencia inferior del gas producto y a la falta de intercambio de calor interno.

### 3.2.2.3 GASIFICADOR DE TIRO TRANSVERSAL

Estos gasificadores surgen como una adaptación del sistema anterior para el uso de carbón vegetal como biomasa. La gasificación de carbón vegetal ocurre a altas temperaturas (superiores a  $1500^{\circ}\text{C}$ ), pudiendo producir problemas en los materiales, por lo que en este sistema el combustible funciona como aislante de estas altas temperaturas.

Su mayor ventaja es poder funcionar a pequeña escala, pudiéndose adaptar a instalaciones inferiores a 10 kW (Potencia en el eje). Su conjunto es muy sencillo, ya que solo requiere un quemador de ciclón y un filtro caliente. Es usual que este sistema se utilice con un sistema de corriente descendente, para mantener una capacidad mínima de cracking de alquitrán, ya que en general este diseño tiene problemas con la transformación del alquitrán, por lo que se requiere el empleo de carbón vegetal de alta calidad.

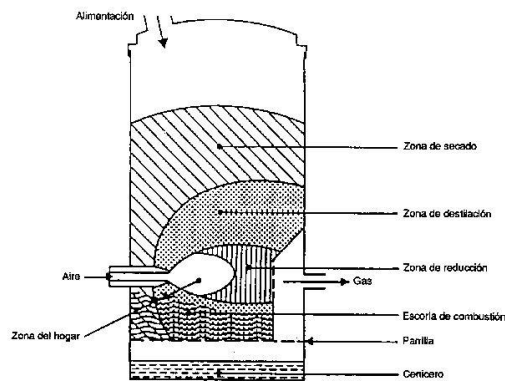


Figura 13: Gasificador de tiro transversal.

### 3.2.2.4 GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO

El funcionamiento de los gasificadores anteriormente nombrados se ve afectado por las propiedades morfológicas, físicas y químicas del combustible, produciendo problemas como la falta de tiro en el depósito, la formación de escoria y la excesiva caída de

presión en el gasificador. En base a esto es que se crea la tecnología de gasificación de lecho fluidizado, la cual se muestra en la Figura 14.

Se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a una velocidad suficiente para lograr que estas se encuentren en un estado de suspensión. Una vez el lecho haya alcanzado una temperatura elevada, se introduce el material de alimentación. Las partículas del combustible se introducen por el fondo del reactor, se mezclan muy rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente alcanzando la temperatura del lecho. Como resultado de este tratamiento, el combustible se piroliza muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes, con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos. En la fase de gas, se produce una nueva gasificación y reacciones de transformación de los alquitranes. La mayoría de los sistemas van equipados con un ciclón interno, a fin de reducir al mínimo el escape de alquitrán por soplado. Las partículas de ceniza se transportan también por la parte superior del reactor, debiendo extraerse de la corriente de gas si este se emplea en aplicaciones para motores.

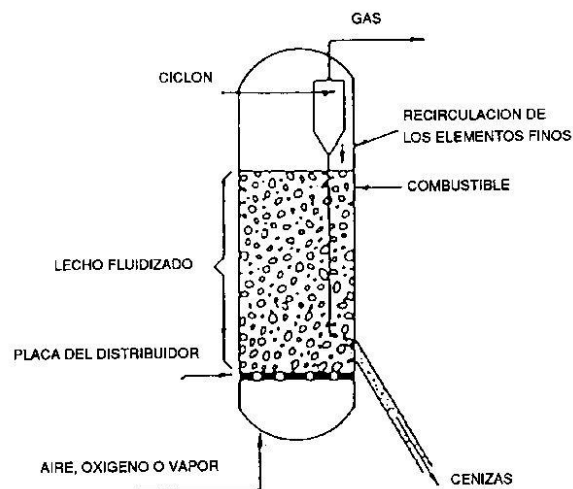


Figura 14: Gasificador de lecho fluidizado.

La principal ventaja de este tipo de gasificadores es la flexibilidad del material a utilizar, debido al fácil control de temperatura que se puede lograr dentro del cuerpo. Sin embargo, ciertos materiales pueden producir problemas de alimentación,

inestabilidad del lecho o producción excesiva de cenizas. Una de sus desventajas es la mala reacción que tiene a cambios de carga, y el alto contenido de alquitrán en los gases. Su uso se da en equipos con producción mayor a 500 kW (potencia al eje).

### 3.2.2.5 GASIFICACIÓN EN MEDIOS POROSOS INERTES

En los últimos años se ha ido desarrollando la tecnología de aplicación de los medios porosos inertes (MPI) en procesos de combustión, y presenta una amplia eficiencia en comparación a la combustión tradicional, debido a que el medio poroso absorbe el calor liberado en la reacción exotérmica, conduciéndolo a la zona de entrada de la mezcla de aire-combustible, produciendo que la temperatura de la zona de reacción, también conocida como frente de llama, se vaya elevando cada vez más, pudiendo obtener en algunos casos temperaturas de llama super-adiabática [17]. El frente de llama tiene un espesor del orden de 1 [cm], y se puede desplazar en contra el flujo de aire-combustible (Aguas Arriba), o a favor de este (Aguas Abajo). Este desplazamiento depende de la mezcla aire-combustible que se esté utilizando en el proceso de gasificación. El esquema general de funcionamiento de este sistema se puede ver en la figura 15. Existen diferentes tipos de medios porosos, como pueden ser las esferas de alúmina, esponjas cerámicas, etc. Cada uno de estos medios porosos tiene su propio valor de porosidad, característica que nos indica la fracción de espacio vacío presente en el MPI. Conociendo la porosidad del medio, se puede conocer la velocidad real a la cual la mezcla de aire-combustible se mueve a través del medio, parámetro conocido como velocidad de filtración ( $V_f$ ), el cual se calcula de la siguiente manera:

$$V_f = \frac{\dot{V}_t}{A_t * \varepsilon} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (5)$$

En donde:

- $\dot{V}_t \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ , corresponde al caudal total de aire-combustible.
- $A_t \left[ m^2 \right]$ , corresponde al área transversal interior del gasificador.
- $\varepsilon [-]$ , corresponde a la porosidad del medio.

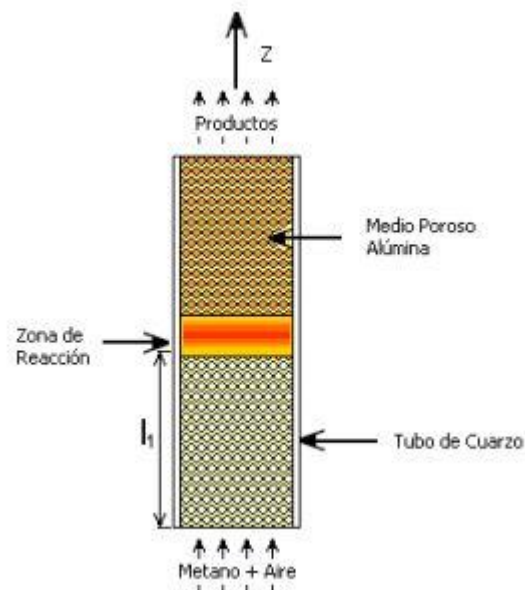


Figura 15: Esquema general de un proceso de combustión en medios porosos inertes.

Sin embargo, al momento de gasificar residuos en MPI, se ha observado problemas en la estabilización del frente de llama, debido a la generación de vacíos que se produce por la diferencia de tamaños entre los MPI y los residuos que está siendo quemados. Estos vacíos producen movimientos bruscos entre los MPI, provocando un frente de llama inestable, la cual puede ser observada en la figura 16. Esta inestabilidad provoca que el frente de llama no tenga un espesor constante, sino que este varía a lo largo del diámetro del gasificador, pudiendo incluso separarse y generar más de un frente de llama. Para evitar este fenómeno, investigadores rusos [18], han propuesto una variación a este diseño. El Gasificador pasará de estar vertical a estar inclinado con respecto a la horizontal. Además, este irá girando con respecto a su eje de simetría. Todo esto de manera que el movimiento del reactor y su inclinación permita que los MPI se vayan acomodando de tal manera de evitar estos vacíos y estabilizar el frente. Esta es una tecnología que ya se ha comenzado a desarrollar, pudiendo ser apreciado un bosquejo del reactor en la Figura 17, en donde A corresponde a la entrada de aire-combustible y G a la salida de los gases producto.

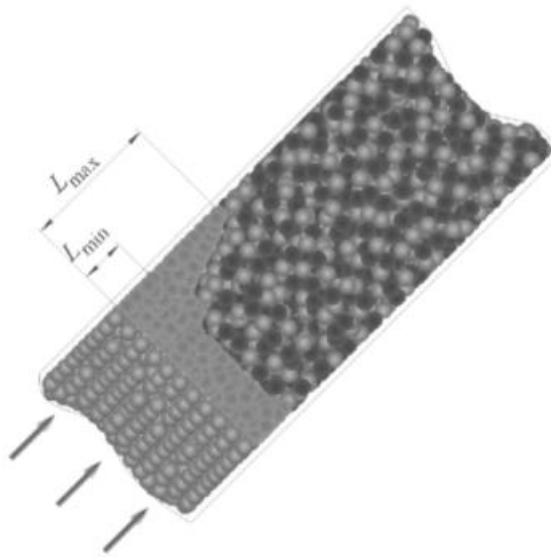


Figura 16: Inestabilidad del frente de llama [19].

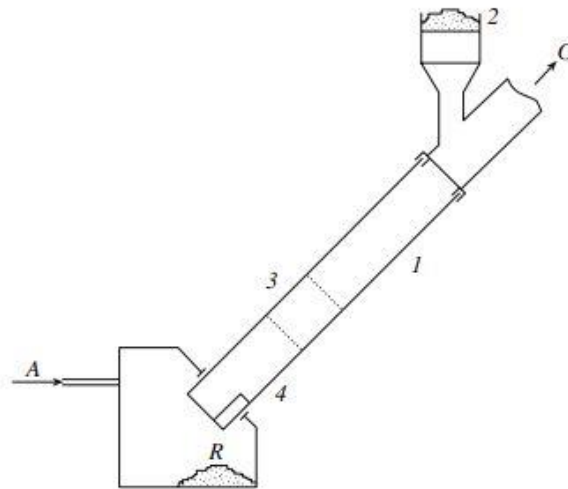


Figura 17: Esquema general de gasificador de biomasa en MPI inclinado rotativo.

### 3.2.3 ETAPAS DE GASIFICACIÓN

La gasificación ocurre a través de una serie de reacciones termoquímicas complejas, las cuales son posibles de agrupar en diversas etapas, ocurriendo de manera simultánea a lo largo del equipo. Estas etapas son detalladas a continuación [20]:

### **3.2.3.1 ETAPA DE SECADO**

Las características del material gasificado, tanto físicas como químicas, juegan un rol fundamental en el proceso, ya que la calidad del gas producido depende en un gran porcentaje de estas. Dentro de las características importantes del material, se encuentra el contenido de humedad de este, el cual debe ser lo más bajo posible. Es por eso por lo que los materiales suelen ser secados, ya sea de manera previa a ingresar a los equipos, para eliminar grandes contenidos de humedad, y dentro de estos, removiendo el contenido de humedad remanente, en la primera etapa del proceso, denominada zona de secado. A pesar de esto último, mientras mayor sea el contenido de humedad de los materiales, mayor es la cantidad de energía que se utiliza en secarlos y, por lo tanto, que se pierde del contenido energético del gas producto.

### **3.2.3.2 PIRÓLISIS O ETAPA DE DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA**

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica del material en ausencia de oxígeno, formando carboncillos, alquitranes líquidos y gases, en proporciones que dependen del material tratado. Durante este proceso, el secado del material y la reducción del peso molecular ocurren simultáneamente, hasta alcanzar temperaturas que bordean los 200°C, en donde la humedad es removida por completo. A medida que la temperatura sigue aumentando, comienza la formación de carbonilos, grupos carboxilos,  $CO$  y  $CO_2$ . Los biopolímeros de gran tamaño como la celulosa, hemicelulosa y lignina son descompuestos en carbón y partículas volátiles. La pirólisis toma lugar en el rango de temperatura entre 125 y 500°C, condensando hidrocarburos y formando alquitranes. Las reacciones químicas desarrolladas hasta los 300°C son reacciones exotérmicas, mientras que por sobre los 300°C son reacciones endotérmicas. Es por esto por lo que, para altas temperaturas, muchas veces es necesario un calentamiento externo para maximizar el rendimiento del gas.

### **3.2.3.3 OXIDACIÓN PARCIAL O ETAPA DE COMBUSTIÓN**

En esta etapa, el material volátil se oxida en una reacción exotérmica, generando calor con peaks de temperatura entre los 1100 y 1500°C, y formando gases como  $CO$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ . Esta etapa es fundamental para la determinación del tipo y la calidad del gas producido. Como se detallará más adelante, dentro de los parámetros claves para mejorar la calidad y el potencial energético del gas producto se encuentra la presión y temperatura alcanzada dentro del reactor, y el agente gasificante utilizado. El calor producido por las reacciones de oxidación es utilizado en las otras etapas de gasificación, como el secado del material, en las reacciones de reducción y la pirólisis.

#### **3.2.3.4 ETAPA DE REDUCCIÓN**

La gasificación produce una serie de elementos indeseables, como pueden ser  $NO_x$ ,  $SO_2$  y alquitranes. Para controlar la formación de estos elementos, se debe formar una atmósfera con condiciones de temperatura adecuada, denominada zona de reducción. Una temperatura de 1000°C es considerada adecuada para la reducción de las partículas de alquitrán. Además, en esta etapa toman lugar un gran número de reacciones endotérmicas, descomponiendo los últimos rastros de material a gasificar y elementos volátiles, teniendo como resultado  $CO$ ,  $H_2$  y  $CH_4$ .

#### **3.2.4 TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN GASIFICACIÓN DE BASURA**

Usualmente, la gasificación de basura es llevada a cabo usando una de las siguientes técnicas: parrillas móviles, siendo la más común, lecho fluidizado, u hornos rotatorios. Un esquema general del sistema de combustión en parrillas móviles se puede apreciar en la figura 18, la cual está enumerada desde el 1 al 6 para indicar las partes importantes para su funcionamiento. Los desechos son introducidos al sistema a través del alimentador, indicado por el punto 1, y son conducidos hasta la cámara de combustión (punto 5), la cual está ubicada sobre las parrillas (punto 2). Las parrillas están en constante movimiento, para lograr una mezcla en los residuos y promover la circulación de aire a través de estos. El aire suele ingresar a través de 2 o 3 flujos (punto 4). El flujo de aire primario viene desde la parte inferior de las parrillas, el cual es

soplado por ventiladores ubicados por debajo de estas. Este aire cumple la función de enfriar las parrillas e introducir oxígeno a la cámara luego de atravesar la capa de residuos. El sistema de control de la combustión se regula a través de la variación del aire primario. Si el potencial del poder calorífico de los desechos es bajo, el aire primario suele ser precalentado para no afectar demasiado la combustión. El aire secundario es ingresado por la parte superior de la cámara de combustión, completando los requerimientos de aire y logrando una mezcla con el aire primario. El aire terciario suele ser aire recirculado, y es inyectado para controlar la temperatura dentro de la cámara o la formación de ciertos componentes indeseados, como pueden ser los  $NO_x$ . La llama es ubicada por sobre los desechos, y alcanza temperaturas por sobre los  $1000^{\circ}\text{C}$ . Las parrillas no pueden estar sometidas a temperaturas mayores a los  $300\text{-}350^{\circ}\text{C}$ , por lo que es necesario que siempre haya una capa de desechos o ceniza sobre ella de unos 50 cm de espesor, para evitar el contacto directo con la llama. Las cenizas son descargadas al final de la parrilla, cayendo generalmente a un baño de agua (punto 3). El agua enfría y humedece las cenizas, enfriándolas y evitando que gases contaminantes escapen del sistema. En general, los sistemas de combustión en parrillas móviles se suelen clasificar por la pendiente de la parrilla (horizontal o inclinada), el movimiento de las parrillas (balanceo, parrillas recíprocas, rodillos, etc.) o por el sistema de refrigeración (aire o agua).

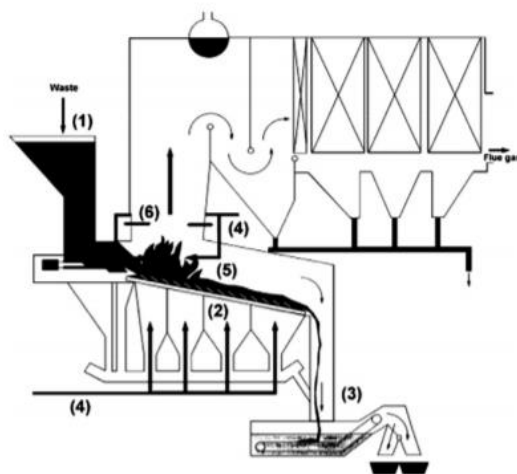


Figura 18: Esquema general de un sistema de gasificación en parrillas móviles [21].

Los gasificadores de desechos de lecho fluidizado siguen la configuración tradicional explicada en el punto **3.2.2.4**. En este sistema, los desechos deben ser tratados previamente, ya que el tamaño promedio de estos debe ser similar al tamaño de las partículas inertes que componen el lecho. Las grandes turbulencias que se generan dentro del cuerpo del gasificador aseguran una mezcla eficiente del material y una distribución uniforme de la temperatura, promoviendo de esta forma una completa de oxidación de los desechos y controlando la formación de agentes contaminantes. La temperatura es controlada a través de la variación del aire primario, la cual se suele establecer en el rango de los 850-950°C. Basados en el tipo de flujo, pueden ser clasificados en lechos burbujeantes, rotativos o circulantes. Los lechos burbujeantes (o estacionarios) alcanzan velocidades de filtración del rango de los  $0,5 - 3 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , con movimientos verticales casi nulos de las partículas inertes. El tamaño de estas partículas es del orden de los  $10[mm]$ , por lo que su aplicación se restringe a plásticos, lodos y aguas residuales. En los lechos rotatorios, el volumen a fluidizar se encuentra en permanente rotación, generada por un arreglo en las boquillas de inyección, y la geometría de la cámara de combustión, mejorando la mezcla y permitiendo el tratamiento de desechos con un tamaño promedio de partículas mayor, del orden de los  $30[mm]$ . En lechos circulantes las velocidades de filtración varían en el rango de los  $3 - 9 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , por lo que los residuos y las partículas son levantadas y arrastradas hacia la parte superior de la cámara de combustión, por lo que es necesaria la presencia de un ciclón que separe las partículas inertes y las regresa a la cámara de combustión.

Los hornos rotatorios utilizados en gasificación siguen los mismos principios de funcionamiento explicados en el punto **3.1**. Comparados con los otros equipos de gasificación, los hornos tienen ciertas ventajas, como lo es la constante mezcla a la cual el material es sometido, debido a la rotación del cuerpo del horno. Además, esta rotación facilita la transferencia de calor en su interior. Sumado a esto, los hornos rotatorios permiten tanto una operación continua como una operación por tandas. No obstante, la aplicación de estos equipos en gasificación no es tan común como las 2

anteriores, por lo que la investigación acerca de la influencia de los distintos parámetros de operación en las características del Syngas obtenidos es bastante acotada.

### 3.2.5 AGENTES GASIFICANTES

Como se mencionó previamente, el proceso de gasificación necesita de un agente gasificante para ser llevada a cabo, el cual suele ser aire, aire enriquecido, vapor de agua u oxígeno. La elección de estos afecta en la composición final que tendrá el gas producto. Al utilizar aire como agente gasificante, el gas producto estará compuesto en un gran porcentaje por nitrógeno, lo cual disminuye el poder calorífico de este. Es por lo que algunas aplicaciones utilizan aire enriquecido, para aumentar la fracción de oxígeno y disminuir la presencia de nitrógeno en los gases resultantes. Esto también ocurre al momento de utilizar oxígeno puro como gasificante, disminuyendo a cero la presencia de nitrógeno. Al usar vapor de agua, la presencia de nitrógeno es nula, y el poder calorífico mucho mayor, debido a la alta cantidad de hidrógeno en este. Sin embargo, y a pesar de las respectivas ventajas, la utilización de estos últimos 3 agentes gasificantes debe ser evaluada, ya que, para su obtención, es necesario llevar a cabo un alto consumo energético, el cual puede llegar a ser contraproducente dependiendo de la aplicación. Al contrario, la utilización de aire atmosférico es más sencilla de llevar a cabo, y a pesar de sus desventajas, es ampliamente usada en los procesos de gasificación.

La influencia de estos agente se ha demostrado de manera experimental, como en el experimento realizado por investigadores chinos, utilizando un prototipo de un gasificador de lecho fluidizado burbujeante, con capacidad de  $50 \left[ \frac{kg}{hr} \right]$ , en el cuál se procesó aserrín utilizando como agente gasificante diversas mezclas entre aire, aire enriquecido, oxígeno y vapor [22]. Parte de los resultados obtenidos pueden ser vistos en la figura 19, en donde se observa la variación en la producción de  $H_2$  y en el poder calorífico inferior del gas producto, en función de la razón de equivalencia, para cuatro diferentes gasificantes, aire, mezcla de oxígeno y aire enriquecido, aire y vapor de agua, y oxígeno y vapor de agua. La razón de equivalencia corresponde a la razón entre la

relación aire-combustible utilizada con la relación aire-combustible estequiométrica. Se puede observar que a medida que esta aumenta, la producción de  $H_2$  también lo hace, mientras que la composición de  $CO$  disminuye y, por ende, el poder calorífico también lo hace. Esto ocurre para todos los gasificantes. La baja en la producción de  $CO$  a medida que aumenta la relación de equivalencia tiene explicación en que, mientras mayor sea la cantidad de gasificante utilizado, mayor es el porcentaje de oxidación del carbono, produciéndose cada vez más  $CO_2$ , el cual tiene un menor poder calorífico que el  $CO$ . En cuanto a los agentes gasificantes se trata, los mejores resultados para la producción energética fueron obtenidos con las mezclas vapor-oxígeno y vapor-aire enriquecido respectivamente.

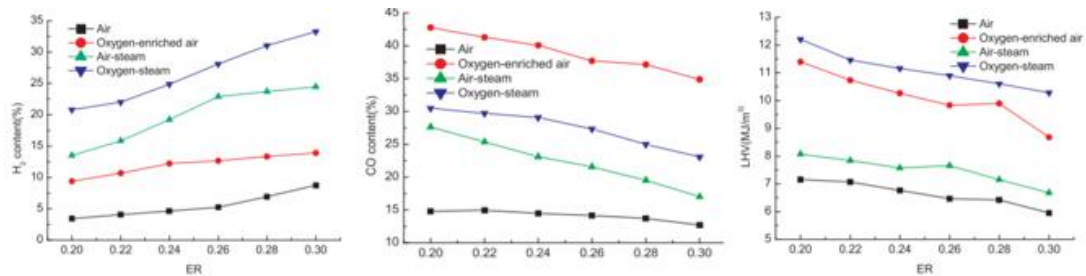


Figura 19: Producción de hidrógeno (a la izquierda) y monóxido de carbono (al medio) en el gas producto, y PCI de este (a la derecha), en función de la razón de equivalencia del proceso para cada uno de los agentes de gasificación mencionados [22].

En base a los resultados observados, los mejores resultados en cuando al poder calorífico obtenido en el gas producto se trata, se obtienen cuando se utiliza vapor de agua como agente gasificante, seguido por el oxígeno, el aire enriquecido, y finalmente el aire atmosférico. Este aumento en la producción energética debe ser comparado con el costo energético de producir el agente gasificante a trabajar, para optimizar los resultados obtenidos en la gasificación.

### 3.2.6 GASES PRODUCTOS

En el proceso de gasificación se busca que el Syngas producido sea lo más rico en gases que aporten a su poder calorífico, como lo son el monóxido de carbono ( $CO$ ),

hidrógeno ( $H_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), entre otros. Sin embargo, este proceso produce otras sustancias que resultan ser indeseables, y le quitan potencial al Syngas producido, así como también compuestos tóxicos para el medio ambiente, o sustancias dañinas para los equipos de producción de energía, como lo son cenizas, material particulado o alquitrán. La concentración de estos depende de muchos factores, como puede ser el material para gasificar, el diseño del gasificador, el agente gasificante, entre otros. Es por esto por lo que el Syngas debe ser tratado antes de ser utilizado, para disminuir o eliminar las sustancias indeseables, y evitar daños en los equipos complementarios y aumento en los costos de producción.

Las cenizas son provocadas por las sustancias inorgánicas no combustibles presentes en el material gasificado, que al no reaccionar se queman y depositan en su mayoría en el fondo de los equipos de gasificación, las cuales periódicamente deben ser retiradas de estos. Se componen en su mayoría de metales alcalinos y alcalinotérreos ( $Mg, Ca, Li, Na$ , entre otros), azufre y fósforo, y la acumulación excesiva puede traer problemas técnicos como el taponeo del sistema de gasificación, o incluso corrosión en las partes del equipo que estén en contacto directo con estas. La formación de esta depende en su mayoría del material a gasificar, aunque existen otros factores, como la temperatura de gasificación o el diseño del gasificador. Se han realizado numerosos estudios para analizar los parámetros que influyen en la producción de cenizas. Ejemplo de esto es el realizado por los investigadores Xiwen Yao, Yonglu Hu, Ji Ge, entre otros [23], que en base a los resultados obtenidos de la gasificación de corontas de choclo en un gasificador de corriente descendente de 1.6[m] de largo y 1[m] de diámetro. En sus resultados se observa como un aumento en la razón de equivalencia y la temperatura de gasificación favorece la formación de materias volátiles en suspensión, compuestas por  $K, S, Cl$  y  $Ca$ ; las cuales pueden ser atrapadas en equipos como el ciclón y enviadas al depósito de estas, mientras que una disminución de la temperatura y aumento del tiempo de retención facilitan la retención de cenizas formadas por  $Si, Al$  y  $Fe$  en el fondo del gasificador.

Otro de los elementos no deseados en los gases producto es el material particulado, que consiste en pequeñas partículas en suspensión, tanto sólidas como líquidas (como pueden ser gotas), y que no solo perjudican el funcionamiento de los equipos, sino que también son perjudiciales para la salud de las personas, por lo cual existen normas, que varían país a país, acerca de la concentración de material particulado en los gases emitidos. Estas partículas son clasificadas por su tamaño, destacándose las partículas  $PM_{10}$ , con tamaños menores a  $10[\mu m]$ , y partículas  $PM_{2,5}$ , con tamaños menores a  $2,5[\mu m]$ . Las partículas de mayor tamaño son las más fáciles de atrapar, existen equipos como los ya mencionados ciclones, que al ser atravesados por el gas atrapan las partículas de mayor tamaño y las dirigen al fondo de esto. Además, existen los filtros de distintos tamaños, que consisten en rejillas finas por la cual pasa el gas producto, mientras que las partículas mayores al tamaño de rejilla quedan atrapadas en esta. Sin embargo, las partículas de menor tamaño son las más difíciles de filtrar. Existen técnicas como los separadores electroestáticos, sin embargo, su costosa aplicación muchas veces hace prescindir de esta.

El alquitrán es un líquido espeso y oscuro, y con baja temperatura de condensación, lo cual puede producir graves problemas, como lo es el bloqueo de los equipos aguas abajo. Dentro de sus componentes se encuentran bencenos, tolueno, hidrocarburos aromáticos, entre otros. Una de las formas de disminuir su concentración en los gases productos es a través de tratamientos térmicos, degradando así el alquitrán en componentes más livianos, como lo es el metano, dióxido de carbono, hidrógeno, entre otros y que, además, aumentan el contenido energético del Syngas. Sumado a esto, existen reportes que, a medida que la temperatura de gasificación es aumentada, se disminuye la concentración de alquitrán en el Syngas producido, no obstante, como ya se ha visto anteriormente, un aumento en la temperatura de gasificación tiene resultados negativos en el poder calorífico del gas producto, por lo que se debe encontrar el punto óptimo para la producción de alquitranes y otras sustancias y el potencial energético del gas. Uno de los tratamientos térmicos más eficientes, y que disminuye considerablemente la concentración de alquitranes, es el denominado craqueo

catalítico, el cual consiste en utilizar un catalizador en el proceso de degradación, acelerando el proceso. Dentro de los catalizadores con mejores resultados, se encuentra la alúmina, la dolomita y el olivino, con eficiencias de abatimiento de 71%, 92% y 89% respectivamente [20]. La selección del tratamiento a utilizar depende de la aplicación en la cual se utilizará el gas producto, ya que en base a esta en la cantidad tolerada de alquitrán. Para motores de combustión interna es necesaria una concentración menor a  $10 \left[ \frac{mg}{Nm^3} \right]$ , para turbinas de gas concentraciones menores a  $5 \left[ \frac{mg}{Nm^3} \right]$ , y pilas de combustibles concentraciones menores a  $1 \left[ \frac{mg}{Nm^3} \right]$  [20].

La gran variedad en la composición de la basura que es gasificada provoca la quema de ciertos componentes que, al reaccionar, forman compuestos tóxicos para la salud humana, y deben ser evitados a toda costa. Uno de ellos es el cloro, ya que, al ser quemado, produce las denominadas dioxinas, compuestos altamente tóxicos que contribuirán a que el gas producto resulte ser contaminante. Al estar presente en el medio ambiente, estas se pegan al tejido adiposo de los animales, exponiendo así a la población que se alimenta de estos, provocando la exposición breve a ellas lesiones cutáneas o alteraciones funcionales hepáticas, mientras que la exposición crónica puede provocar diversos tipos de cáncer [24]. Compuestos como el cloro se encuentran principalmente en plásticos de clasificación 3 (Policloruro de Vinilo o PVC). Se han hecho numerosos estudios para conocer la relación que existe entre los parámetros de operación y la producción de dioxinas, como es el caso de investigadores de la Universidad Shanghai Jiao Tong, quienes gasificaron en diversas proporciones bolas de PVC y pellets de pino, variando parámetros como la temperatura, tiempo de residencia, razón de equivalencia [25]. Este estudio, demostró que el tiempo de residencia del material tiene una gran influencia en la producción de dioxinas, siendo estas inhibidas a medida que el tiempo es mayor. Además, un aumento en la temperatura de gasificación también provoca una disminución en su producción.

### **3.2.7 BASURA EN LA GASIFICACIÓN**

La basura como material de gasificación es muy complejo de afrontar. Su alta heterogeneidad lo hace difícil de manejar y, por lo tanto, de predecir su comportamiento durante el proceso, y las características que obtendrá el gas producto. La variación de sus componentes depende de numerosos factores, las cuales pueden ser temporales, como la época del año en que se produce, geográficas, e incluso socioeconómicas. En general, existen muchas formas de clasificar la basura, ya sea en base a su origen, a su composición, etc. Sin embargo, solo una parte de ella es de interés para la gasificación. Entre la basura útil para la gasificación, se encuentran los residuos sólidos urbanos, compuestos por plásticos, papeles, cartones, textiles y material orgánico, y ciertos residuos industriales, como lodos o aguas residuales. Al momento de gasificar basura, es importante tener claridad con respecto a su composición, para asegurar la producción de energía dentro de los rangos esperados, además de cumplir las normativas de control de emisiones. Para esto, es necesario conocer ciertas características de cada uno de los grupos por los cuales está compuesta la basura, como lo son la humedad, poder calorífico, composición elemental, entre otros, para establecer de manera óptima los flujos de material que serán gasificados. Para lograr esta caracterización de la basura, se puede analizar en términos de tendencia de que está compuesta en su mayoría la basura. A nivel nacional, se estima que los residuos sólidos de los chilenos este compuesto en promedio por un 53,3 % en masa de materia orgánica, 12,4 % de papeles y cartones, 9,4 % de plásticos, 6,6 % de vidrio, 2,3 % de metales, 2,0 % de textiles y en un 14 % de otras materias [26]. Entre estos, el vidrio y el metal no son aptos para ser gasificados, por lo que el análisis será centrado en el resto de la basura. A continuación, se analiza a más detalle cada uno de los tipos de basura existentes, de interés para la gasificación.

#### **3.2.7.1 MATERIA ORGÁNICA**

La materia orgánica está compuesta principalmente por desechos alimentarios, los cuales pueden variar en composición y cantidad, ya que la forma en que comen las personas varía según el país, la ciudad e incluso entre barrios. Los desechos

alimentarios, y la basura en general, varían entre sectores de distinto nivel socioeconómico. Además, a lo largo del año, y en cada una de las estaciones respectivas, la alimentación va variando de la mano de los productos de la estación. Es por todo esto que la determinación de la composición de la materia orgánica que producen las personas es muy compleja, ya que es un término demasiado general, esta es una inmensa cantidad de grupos más homogéneos, dentro de los cuales se podría llegar a una mejor clasificación. Otro problema con la materia orgánica es el alto contenido de humedad, ya sea de manera intrínseca en el material o por la absorción de la humedad ambiente, y puede variar entre 60-95 % de humedad en masa, por lo que el secado de estas es fundamental para lograr una correcta gasificación. A pesar de esto, los desechos orgánicos tienen alto contenido de carbono y oxígeno, lo cual los hace atractivos para la gasificación. Para tener una referencia cercana a dentro de que rango varían las características de estos materiales, como lo son composición elemental, humedad y poder calorífico, se toma como referencia diversos estudios de gasificación de residuos orgánicos, realizados en prototipos de gasificadores, principalmente por investigadores chinos [27-31]. Para sus experimentos, se basan en los alimentos más consumidos por la población del país respectivo, y en base a eso forman pequeños grupos de desechos, formados principalmente por proteínas (carne, pollo, etc.), arroces, coles, cascaras de alguna fruta en específico y aceite de cocina. Estos valores pueden ser observados en la tabla 2. Si bien, la mayoría de los residuos tiene un poder calorífico inferior que varía entre los  $15 - 25 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$ , el aceite de cocina se encuentra por sobre los valores típicos, con un poder calorífico que bordea los  $40 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$ . Cabe destacar, que para todas las investigaciones realizadas se utilizó vapor de agua como agente gasificante.

Tabla 2: Composición de materia orgánica [27-31].

| <b>Tipo</b>     | <b>Análisis Elemental, Fracción Másica</b> |           |           |           |           | <b>Humedad<sup>a</sup></b> | <b>PCI <math>\left[ \frac{MJ}{kg} \right]</math></b> |
|-----------------|--------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|------------------------------------------------------|
|                 | <b>%C</b>                                  | <b>%H</b> | <b>%O</b> | <b>%N</b> | <b>%S</b> |                            |                                                      |
| <b>Desechos</b> | 38-50                                      | 5,5-80    | 22-50     | 1,5-13    | 0,1-1,2   | 1,3-11,33                  | 15-25                                                |

|                             |       |          |       |           |          |   |       |
|-----------------------------|-------|----------|-------|-----------|----------|---|-------|
| <b>Aceite de<br/>Cocina</b> | 67-77 | 9,3-10,6 | 22-25 | 0,08-0,09 | 0,44-0,5 | - | 35-40 |
|-----------------------------|-------|----------|-------|-----------|----------|---|-------|

<sup>a</sup> Valor obtenido después del proceso de secado del material.

### 3.2.7.2 PAPELES Y CARTONES

El papel es un material compuesto por celulosa, la cuál es sacada de la corteza de los árboles. Dependiendo del proceso, ya sea físicos o químicos, al que es sometida la celulosa, es el tipo de papel obtenido, entre los cuales destacan el papel fotocopia, papel de diario, cartones, papel tisú, entre muchos más. En general, todo tipo de papel está compuesto por una fracción orgánica, la cual está formada por celulosa, hemicelulosa, lignina y ciertos componentes de la lignina, formando así la fracción orgánica un 70-100 % de la composición del papel, y una fracción inorgánica, la cual está compuesta por materiales de empaste y carga como carbonato de calcio, arcilla, óxido de titanio, entre otros, y ocupa un 0-30 % del total de la composición. En cuanto a la gasificación, el papel tiene potencial, debido a los contenidos de carbono presentes en su composición, que varían entre un 35-45 %. Sin embargo, los niveles de humedad suelen ser altos, debido a la facilidad con que este absorbe la humedad del ambiente. Un análisis más detallado de la composición del papel se muestra en la tabla 3, en base a investigaciones realizadas por investigadores rumanos, para la utilización de residuos sólidos urbanos en energía [32]. En este se puede ver la composición del papel periódico, papel fotocopia y cartón, apreciando el alto contenido de carbono, superando 1/3 del total de la masa, lo que le entrega cierto potencial energético, y el alto contenido de oxígeno, el cual se suma al porcentaje de oxígeno utilizado en la combustión. También se puede destacar la cantidad de material volátil presente en todos los tipos de papel.

Tabla 3: Composición del papel [32].

|                            | <b>Análisis elemental, fracción<br/>másica</b> |      |       |      |      | <b>Análisis Inmediato,<br/>base Seca</b> |         |      |       |                                  |
|----------------------------|------------------------------------------------|------|-------|------|------|------------------------------------------|---------|------|-------|----------------------------------|
| <b>Tipo</b>                | %C                                             | %H   | %O    | %N   | %S   | %MV                                      | %Ceniza | %CF  | %Hum  | PCI $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ |
| <b>Papel<br/>Fotocopia</b> | 38,24                                          | 5,16 | 47,08 | 0,3  | 3,03 | 82,9                                     | 6,2     | 10,9 | 25-30 | 9,8                              |
| <b>Periódico</b>           | 43,12                                          | 5,56 | 39,51 | 0,34 | 3,39 | 88,4                                     | 8,1     | 3,5  | 25-40 | 11,6                             |
| <b>Cartón</b>              | 44,39                                          | 5,63 | 39,96 | 0,55 | 3,57 | 87,2                                     | 6,4     | 6,1  | 25-35 | 12,8                             |

### 3.2.7.3 PLÁSTICOS

Con el término plástico, nos referimos a una amplia gama de materiales sintéticos o semisintéticos, teniendo su origen en materias primas como lo son la celulosa, el carbón, el gas natural, la sal y, sobre todo, el petróleo. Hoy en día este material es utilizado como contenedor o envoltorio de la mayoría de las cosas que consumimos cotidianamente, debido a la facilidad de fabricación y a su bajo costo, además de su larga duración. Este último es el principal problema con este material. De manera natural, necesita de millones de años para descomponerse, por lo que el plástico que es desechado permanecerá en el medio ambiente de manera indefinida. Esto ha provocado que millones de toneladas estén esparcidas a lo largo del planeta, distribuyéndose principalmente en los océanos, impactando en gran medida a la flora y fauna presente, por lo que es una necesidad mundial buscar una manera de reducir el plástico que se ha generado a lo largo de los años. A priori, se trata de un residuo ideal para gasificar ya que, al estar formado por numerosas cadenas de carbono, hidrógeno y oxígeno, posee un alto poder calorífico, además de contener un bajo contenido de humedad. según la sociedad de la industria del plástico [33], existen 7 clasificaciones para estos, detalladas a continuación.

- **POLIETILENO TEREF TALATO (PET)**

El Polietileno Tereftalato, también conocido como PET, se obtiene a través de una reacción de policondensación entre el ácido treftálico y el etilenglicol. En uno de los plásticos más utilizados a nivel comercial, principalmente en el embotellado de bebidas gaseosas y líquidos en general, debido a su transparencia, a su baja densidad, a su alta resistencia al desgaste, y una alta probabilidad de ser reciclado. Químicamente, está formado por N cadenas de tereftalato de etileno. Es un material higroscópico, es decir, que absorbe con facilidad la humedad del ambiente, por lo que es fundamental evaluar la posibilidad de secar el plástico PET antes de que este sea gasificado.

- **POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)**

El Polietileno de Alta Densidad, o HDPE por sus siglas en inglés, es un polímero de cadena lineal no ramificada, resultado de la polimerización del etileno. Se obtiene a través de un proceso de polimerización catalítica, conocido como polimerización Ziegler-Natta. Se caracteriza por su rigidez, buena resistencia térmica y química, alta resistencia al impacto. Tiene numerosas aplicaciones, como lo es la fabricación de recipientes y tapas, utensilios domésticos y juguetes, tuberías y conductos, entre otros. Además, es utilizado como película en acople con otros materiales como con papel o papel metalizado en la industria alimenticia, o la industria automotriz para crear cubiertas protectoras.

- **POLICLORURO DE VINILO (PVC)**

Se obtiene a través de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. Tiene una alta resistencia mecánica, a la abrasión y al impacto, además de una baja densidad. Es resistente a la llama, por lo que no se quema con facilidad, y deja de arder una vez esta es retirada. Como se ha dicho anteriormente, la

molécula de cloro presente en su estructura produce sustancias tóxicas para la salud humana, conocidas como dioxinas.

- **POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)**

A diferencia del HDPE, el Polietileno de Baja Densidad, o LDPE, tiene un grado de ramificación elevado, entre 20 y 40 ramas por cada 1000 átomos de carbono. Estas ramificaciones derivan en enlaces químicos más débiles, haciendo del PEBD un material con alta flexibilidad y resistencia al impacto, además de una escasa dureza. Es ideal para la fabricación de bolsas y sacos, la elaboración de filmes transparentes, además de ser utilizado en tuberías, juguetes, envases de productos químicos, entre otros. Se obtiene a través de un proceso denominado polimerización por radicales libres.

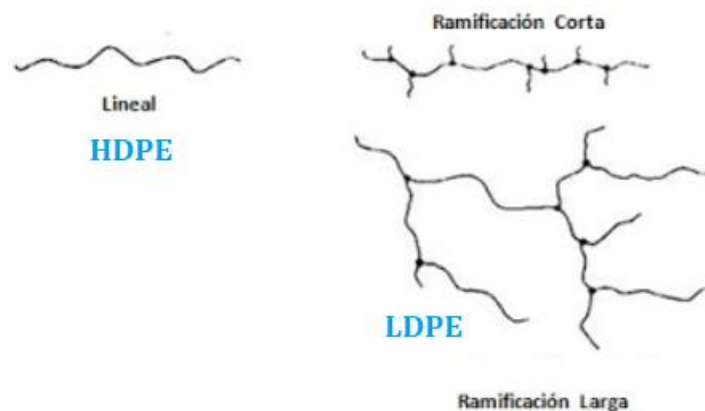


Figura 20: Diferencia de ramificación entre HDPE y LDPE.

- **POLIPROPILENO (PP)**

El Polipropileno se obtiene a partir de la polimerización del propileno, a través de la presencia de un catalizador, a temperatura y presión específicas. Se puede clasificar en homopolímero, copolímero random y copolímero de alto impacto,

los cuales se modifican y adaptan para los distintos usos que se le quiera dar a este plástico. Es un material liviano y versátil, tanto para sus usos como para el proceso de fabricación, ya que es compatible con la mayoría de las técnicas de procesamiento. Tiene buenas propiedades químicas y de resistencia, y evita el traspaso de agua, por lo que contiene un bajo nivel de humedad. Es utilizado para la fabricación de recipiente de alimentos, muebles u otros objetos del hogar, herramientas médicas, entre otros.

- **POLIESTIRENO (PS)**

Se produce a través de la polimerización del estireno, el cual se obtiene calentando el etilbenceno en presencia de un catalizador. Para el proceso de polimerización se requiere una pequeña cantidad de iniciador, como puede ser los peróxidos, los cuales se rompen para generar un radical libre, el cual al unirse a una molécula de monómero forma otro radical libre, que se vuelve a unir a un monómero logrando una cadena. Puede ser fabricado en forma de material duro, como cualquier otro plástico, y en forma de espuma, conocido como poliestireno expandido o extruido. El poliestireno clásico se caracteriza por ser un material duro, utilizado como contenedor, material para piezas de electrodomésticos, autos, aparatos electrónicos, etc., mientras que el poliestireno expandido tiene propiedades aislantes, y es utilizado en paredes de casas y edificios, en equipos de refrigeración. El aislamiento con poliestireno es inerte y resistente al daño ocasionado por el agua.

En cuanto a su caracterización, es importante determinar para cada uno de estos plásticos, su composición elemental, poder calorífico y contenido de humedad, parámetros necesarios para un control óptimo del proceso realizado en los gasificadores. En base a diversos estudios de gasificación realizado con cada uno de estos plásticos, se muestran los siguientes valores para las características de las propiedades mencionadas anteriormente, los cuales son representados en la tabla 4 [34-37].

Según los datos observados en la tabla 4, se puede observar que todos los tipos de plásticos están compuestos en su mayoría por carbono, elemento al cuál se le debe su alto poder calorífico. Dentro de las clasificaciones con mayor potencial energético se encuentra el HDPE y el PP, con valores cercanos a los  $45 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$ , mientras el con menor potencial es el PVC, debido principalmente a la presencia de moléculas de cloro en su composición, elemento con bajo poder calorífico. En cuanto a la humedad, todos tienen valores relativamente bajos, a excepción del PET, que como se dijo anteriormente, es un material que absorbe la humedad del ambiente. En general, la mayoría de los tipos de plástico se podrían tratar de la misma manera al momento de gasificarlo, a excepción de los últimos 2 mencionados, con los cuales habría que tener consideraciones especiales. El PVC debe ser estudiado de manera meticulosa, para poder abatir de manera correcta las dioxinas que se podrían generar durante el proceso. En cuanto al PET, es necesario analizar el nivel de humedad a la que se encuentra, para generar una mezcla con niveles de humedad dentro de los esperados para el proceso.

Tabla 4: Composición de plásticos [34-37].

|             | <b>Análisis Elemental, Fracción Másica</b> |           |           |           |           |            | <b>Análisis Inmediato, Fracción Másica</b> |              |            |            | <b>Energía</b>                                       |
|-------------|--------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------------------------------|--------------|------------|------------|------------------------------------------------------|
| <b>Tipo</b> | <b>%C</b>                                  | <b>%H</b> | <b>%O</b> | <b>%N</b> | <b>%S</b> | <b>%CL</b> | <b>%HUM</b>                                | <b>%CENZ</b> | <b>%CF</b> | <b>%MV</b> | <b>PCI <math>\left[ \frac{MJ}{kg} \right]</math></b> |
| <b>PET</b>  | 63,9                                       | 4,6       | 29,6      | 0,02      | 0,9       | 0          | 0,61                                       | 94,26        | 0          | 5,1        | -                                                    |
| <b>HDPE</b> | 85,7                                       | 14,3      | 0         | 0         | 0         | 0          | 0                                          | 99,67        | 0,3        | 0          | 45,98                                                |
| <b>PVC</b>  | 50,1                                       | 6,2       | 22,3      | 0         | 0         | 21,4       | 0,1                                        | 66,6         | 4,3        | 29,0       | 20,5                                                 |
| <b>LDPE</b> | 92,3                                       | 7,4       | 0,2       | 0         | 0         | 0          | 0,1                                        | 99,9         | 0          | 0          | 40,3                                                 |
| <b>PP</b>   | 84,3                                       | 13,8      | 1,7       | 0         | 0         | 0,06       | 0,1                                        | 96,7         | 0,03       | 3,2        | 45,1                                                 |
| <b>PS</b>   | 92,3                                       | 7,69      | 0         | 0         | 0         | 0          | 0,09                                       | 99,8         | 0,03       | 0,07       | 40,99                                                |

### 3.2.7.4 TEXTILES

Este material, se presenta en grandes cantidades en los vertederos y basura domiciliaria, alcanzando las 10 mil toneladas de desperdicio textil anual en Valparaíso en la última

década [26]. Se pueden clasificar en fibras naturales, artificiales y sintéticas. Las primeras tienen su origen en plantas o animales, como la lana, la seda, el algodón, etc. Las fibras artificiales están fabricadas con materia prima de origen natural, y las sintéticas son producidas en base a procesos químicos, como el poliéster y el nailon. Al igual que el papel, está formado en su mayoría por material volátil, y una alta cantidad de oxígeno. Sin embargo, la cantidad de carbono es mayor, por lo que el potencial energético es mayor. Un análisis más detallado de su composición se observa en la tabla 5, basado en un estudio realizado por investigadores chinos en la Universidad de Tsinghua, Beijing [38]. Se destaca el alto poder calorífico de los textiles fabricados de fibras sintéticas, ya que estas son elaboradas en base a materiales derivados del petróleo, lo que aporta un alto contenido de carbono en la composición elemental de estas telas.

Tabla 5: Composición del tejido textil [38].

|                   | <b>Análisis elemental, fracción másica</b> |           |               |                |               | <b>Análisis inmediato,<br/>base seca</b> |             |              |                                                    |
|-------------------|--------------------------------------------|-----------|---------------|----------------|---------------|------------------------------------------|-------------|--------------|----------------------------------------------------|
| <b>Tipo</b>       | <b>%C</b>                                  | <b>%H</b> | <b>%O</b>     | <b>%N</b>      | <b>%S</b>     | <b>%MV</b>                               | <b>%CNZ</b> | <b>%CF</b>   | <b>PCI <math>\left[\frac{MJ}{kg}\right]</math></b> |
| <b>Algodón</b>    | 41,0-<br>57,0                              | 5,6-9,0   | 33,3-<br>51,0 | 0,2-<br>3,5    | 0,03-<br>0,3  | 78,0-<br>99,0                            | 0,2-3,0     | 0,1-<br>21,0 | 14-21                                              |
| <b>Lana</b>       | 58,0-<br>60,0                              | 4,0-7,0   | 18,0-<br>32,0 | 3,0-<br>15,0   | 1,5-<br>1,7   | 84,8                                     | 1,24        | 14,0         | 20-24                                              |
| <b>Sintéticos</b> | 48-67                                      | 4,0-7,0   | 7,3-<br>35,0  | 0,28-<br>20,26 | 0,01-<br>1,26 | 75,0-<br>91,0                            | 0,2-8,2     | 0,6-<br>24,6 | 20-30                                              |

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

El objetivo experimental de este trabajo consiste en operar el gasificador rotatorio inclinado de medios porosos inertes (de aquí en adelante, solo gasificador) utilizando distintos RSU como material a gasificar. Para esto, se variaron una serie de parámetros, como lo son la rotación, la inclinación, los flujos de mezcla y el material a gasificar, para ver cómo se comporta el gasificador para cada uno de ellos. Se analizaron los perfiles térmicos, las variaciones de presión, el avance del frente de llama y los desechos generados para cada uno de los ensayos realizados.

Se utilizó como medio poroso esferas de alúmina de 5,6 [mm] de diámetro, las cuales le dan una porosidad al medio de  $\varepsilon = 0,4$ .

### 4.1 DETERMINACIÓN DE CAUDALES AIRE Y GLP.

Para un gasificador de medios porosos inertes, son 2 los parámetros a través de los cuales se deben determinar los caudales volumétricos de aire y GLP a utilizar. El primero de ellos es la velocidad de filtración, la cual nos permite comparar resultados entre ensayos realizados en gasificadores de diferentes dimensiones. Observando la ecuación 6, notamos que la velocidad de filtración está relacionada con el flujo total de mezcla que se ingresa al gasificador, por lo que, manipulando la ecuación, y ya conociendo la velocidad de filtración, podemos calcular el flujo total de mezcla a utilizar, a través de la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_t = \dot{V}_a + \dot{V}_{GLP} = V_f * A_t * \varepsilon \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (6)$$

En donde:

- $\dot{V}_a \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  corresponde al flujo volumétrico de aire.
- $\dot{V}_{GLP} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  corresponde al flujo volumétrico de GLP.

El segundo parámetro es la razón de equivalencia, o también denominado  $\Phi$ , el cual corresponde al cociente entre la razón aire-combustible real, y la razón aire-combustible estequiométrica. Mezclas con  $\Phi$  mayor a 1 son consideradas mezclas ricas en combustible, mientras que menores a 1 significa una mezcla pobre en combustible. Una mezcla con  $\Phi = 1$  corresponde a condiciones estequiométricas. Se ha observado que, para mezclas pobres, el frente de llama se desplaza aguas arriba, mientras que, al utilizar mezclas ricas, el frente de llama se desplaza aguas arriba.

$$\Phi = \frac{\dot{V}_{est}}{\dot{V}_a / \dot{V}_{GLP}} \quad (7)$$

Para facilitar los cálculos, manipulamos la ecuación 7, dejando el aire en función de los demás parámetros, de la siguiente manera:

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{V}_{GLP} * \dot{V}_{est}}{\Phi} \quad (8)$$

Reemplazando la ecuación 8 en la ecuación 6, y factorizando y despejando  $\dot{V}_{GLP}$ , podemos obtener una expresión para el flujo de GLP, en base a parámetros conocidos.

$$\dot{V}_{GLP} = \frac{V_f * A_t * \varepsilon}{1 + \frac{\dot{V}_{est}}{\Phi}}$$

El área transversal ( $A_t$ ) es un parámetro de diseño del gasificador, por lo que es fijo para todos los ensayos. Para el gasificador utilizado en este trabajo, el cual tiene un diámetro interior de 62 [mm], el área transversal tiene un valor de  $A_t = 3,02 \times 10^{-3} [m^2]$ .

La porosidad para esferas de alúmina de 5,6 [mm], tiene un valor de  $\varepsilon = 0,4$ . En cuanto a la razón aire-combustible, esta se calcula en base a la composición elemental del combustible, a través de la siguiente expresión:

$$\dot{V}_{est} = \frac{22,4}{0,21} * \rho_{GLP} \left[ \frac{X_C}{12,01} + \frac{X_H}{4,032} \right] \left[ \frac{Nm^3 aire}{Nm^3 GLP} \right] \quad (9)$$

en donde  $\rho_{GLP}$  corresponde a la densidad del GLP, y tiene un valor de 2,1 [kg/Nm<sup>3</sup>]

El GLP es una mezcla de propano ( $C_3H_8$ ) y butano ( $C_4H_{10}$ ), por lo que su composición elemental se puede obtener ponderando la composición elemental del propano y butano, por la razón presente de cada uno de estos en el GLP. La composición elemental del GLP se observa en la tabla 6, considerando una mezcla con un 60% de propano y 40% de butano, en masa.

Tabla 6: Composición elemental de GLP, propano y butano.

| Gas     | $X_C$ | $X_H$ |
|---------|-------|-------|
| Propano | 0,82  | 0,18  |
| Butano  | 0,83  | 0,17  |
| GLP     | 0,824 | 0,176 |

Finalmente, es necesario realizar los ajustes por condiciones de operación. El GLP entra prácticamente a presión y temperatura ambiental. En el caso del aire, este sale del compresor a una presión manométrica de  $P_1 = 2,5$  [bar]

Ya conociendo todos los valores para los parámetros involucrados, es posible calcular los flujos de aire y GLP para distintos valores de velocidad de filtración y  $\Phi$ . Estos resultados se muestran en la tabla 7, en base a los parámetros usados a lo largo de los diversos ensayos.

Tabla 7: Flujos de aire y combustible utilizado a lo largo de los ensayos.

| $\Phi$ | $V_f$ [ $cm/s$ ] | $\dot{V}_a$ [ $lt/min$ ] | $\dot{V}_{GLP}$ [ $lt/min$ ] |
|--------|------------------|--------------------------|------------------------------|
| 0,87   | 20               | 13,3                     | 1,15                         |
| 0,87   | 30               | 20,0                     | 1,72                         |
| 0,87   | 40               | 26,7                     | 1,93                         |
| 1,0    | 40               | 26,4                     | 2,61                         |
| 1,0    | 50               | 33,0                     | 3,26                         |

|     |    |       |       |
|-----|----|-------|-------|
| 1,5 | 40 | 25,2  | 3,75  |
| 2   | 40 | 24,2  | 4,79  |
| 2,5 | 40 | 23,2  | 5,75  |
| 3   | 40 | 22,3  | 6,64  |
| 3,5 | 40 | 21,5  | 7,46  |
| 4   | 40 | 20,8  | 8,22  |
| 5   | 40 | 19,4  | 9,60  |
| 6   | 40 | 18,2  | 10,80 |
| 6,5 | 40 | 17,6  | 11,35 |
| 10  | 32 | 11,65 | 11,54 |

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.

### 4.2.1 GASIFICADOR ROTATORIO INCLINADO DE MEDIOS POROSOS INERTES

El gasificador rotatorio inclinado de medios porosos inertes (de aquí en adelante, gasificador) se muestra en la figura 21. Su cuerpo consiste en una cañería ASTM A53 Sch 40 de 4" de diámetro nominal, de 720 [mm] de longitud. Uno de los extremos de esta cañería se encuentra roscado, para permitir el ingreso de la tapa que permitirá el sellado del gasificador. En el otro extremo, se encuentra soldado herméticamente, y de forma concéntrica, un flange tipo "Blind", norma ANSI B 16,5, de 220 [mm] de diámetro. Tanto la tapa, como el flange Blind, poseen en su centro una perforación roscada tipo NPT 3/8", hilo izquierdo para el flange Blind, e hilo derecho para la tapa. Además del flange Blind, el cuerpo del gasificador cuenta con un flange tipo "Slip on", norma ANSI B 16,5, soldado de manera concéntrica a este, a 650 [mm] de distancia del flange Blind. Ambos flanges servirán como apoyo mientras el gasificador se encuentre rotando. Los flanges cuentan con 8 perforaciones de 18 [mm], y sumado a

esto, sobre las perforaciones del flange Blind se encuentran soldadas 8 tuercas métricas M18. Estas perforaciones cumplían la función de guiar 8 hilos métricos M18, donde cada uno de ellos alojaría un piñón 06B-15, los cuales permitirían la transmisión de movimiento desde un motor stepper al gasificador. Sin embargo, este sistema de transmisión provocó constantes problemas durante la operación, siendo reemplazado por un piñón corona 06B-60, el cual fue soldado alrededor de la cañería, por lo que los agujeros en los flanges no tienen utilidad alguna.

A lo largo del cuerpo de la cañería, existen 8 perforaciones de 12 [mm], sobre cada una de las cuales se soldaron herméticamente 8 tuercas M12. Estas perforaciones permiten que 8 termocuplas sean distribuidas a lo largo del cuerpo del gasificador. Estas termocuplas son protegidas en una vaina cerámica, la cual se inserta dentro de un perno M12, el cual es introducido y sellado dentro de las respectivas tuercas.

En cuanto a la aislación, el gasificador cuenta tanto con aislación interna como aislación externa. Para la aislación interna, se utilizaron 3 elementos distintos. En primer lugar, se cuenta con un cilindro cerámico de 62 [mm] de diámetro interior y 8 [mm] de espesor. La segunda capa de aislación interna consiste en anillos de fibra cerámica, de 95 [mm] de diámetro exterior, que se ubican alrededor del cilindro cerámico y a lo largo de todo el cuerpo del gasificador rotatorio. Finalmente, alrededor de los anillos existe una capa de aislante de fibra de vidrio de 3 [mm] de espesor, la cual fue instalada para rellenar la holgura existente entre la aislación y el gasificador prototipo. En cuanto a la aislación externa, el gasificador prototipo cuenta con 3 capas de aislante de fibra de vidrio de 3 [mm] de espesor.



Figura 21: Cuerpo principal del gasificador prototipo.

#### 4.2.2 ESTRUCTURA SOPORTE FIJA Y MÓVIL

El gasificador descansa sobre una estructura móvil, la cual cumple la función de soportar el peso del gasificador, sin intervenir en el giro de este, así como también facilita su inclinación entre los  $0^\circ$  y  $80^\circ$ . La estructura móvil le da apoyo al gasificador en 6 puntos, 4 rodillos radiales, que apoyan en ambos flanges, y 2 rodillos axiales, que apoyan en el flange tipo Blind. Al medio de esta estructura, atraviesa un eje de 12 [mm] de diámetro, que sirve como pivote para permitir la inclinación de la estructura móvil y, por ende, del gasificado. Además, la estructura móvil soporta la parte mecánica del sistema de transmisión, compuesta por el motor stepper, el eje de transmisión y el tensor de cadena. Tanto el motor como el eje de transmisión se ubican en dos placas por debajo de la estructura móvil, las cuales son sujetadas por 4 perfiles L que se encuentran soldados a esta, mientras que el tensor de cadena permanece instalado a un costado de la estructura móvil. El sistema de transmisión en si será descrito con mayor detalle en el punto 4.2.5.

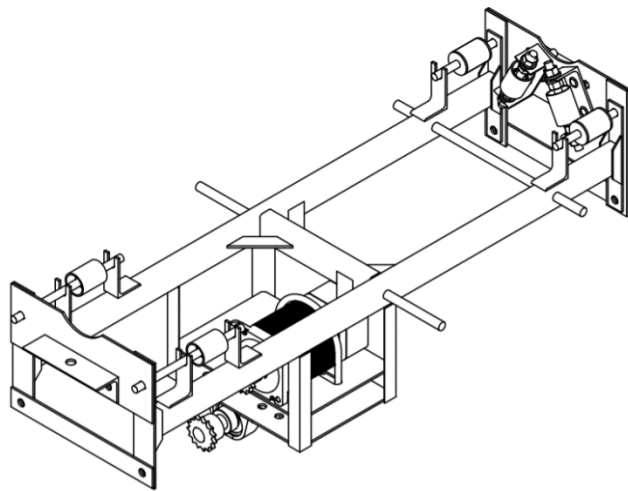


Figura 22: Isométrico conjunto estructura móvil.

La estructura móvil descansa sobre una estructura fija, a través de 2 descansos FSB P203 alojados en el eje pivote. La estructura fija está compuesta por 16 perfiles L

extruidos de aluminio de 40 x 40 [mm], y su ensamblaje se puede observar en la figura 23. A su vez, el ensamble completo descansa sobre 4 ruedas, las cuales permiten trasladar la estructura completa con facilidad. La estructura fija cumple 2 funciones, la primera es sostener el peso total de la estructura móvil y el gasificador, mientras que la segunda es mantener fija la inclinación del conjunto gasificador, a través de 2 bielas que se acoplan a los perfiles de aluminio.

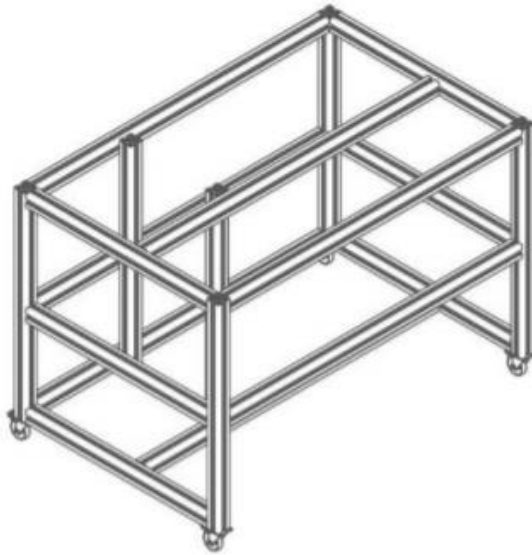


Figura 23: Isométrico conjunto estructura fija.

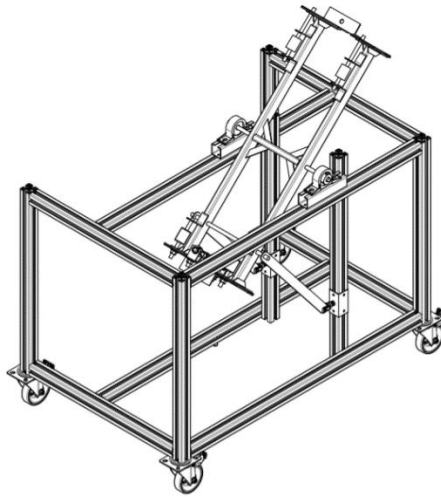


Figura 24:Conjunto estructura fija y estructura móvil.

#### 4.2.3 ALIMENTACIÓN DE AIRE Y COMBUSTIBLE

Para el ingreso de la premezcla, se cuentan con 2 líneas de alimentación, una línea de aire comprimido, y otra línea de Gas Licuado de Petróleo (GLP). La línea de aire parte en el compresor marca NITRO, el cual tiene una capacidad de almacenamiento de 100 [L] y una potencia de 3 [HP]. El aire saliente del compresor se ingresa a un filtro de humedad y partículas, evitando así la entrada de aire húmedo y partículas de aceite a los equipos de medición. Posterior en la línea, se ubica el controlador de flujo, Modelo GFC37 Marca Aalborg, para luego pasar por un manómetro de rango 0-40[mbar], denominado manómetro 2. Finalmente, el aire ingresa al gasificador a través de la junta rotatoria. Cabe destacar que todos los equipos mencionados son conectados a través de mangueras de aire de  $\varnothing \frac{1}{2}$ ", de distintas longitudes según el tramo y el lugar de ejecución del ensayo, y cuentan con acoples rápidos en cada uno de los equipos necesarios a conectar.

El GLP es obtenido de un galón de GLP de 45[kg], marca ABASTIBLE, el cual cuenta con un regulador de salida que entrega una presión de 28 [mbar] y un flujo de 3 [kg/hr]. El GLP sale del galón para entrar directamente al controlador de flujo Modelo GFC37 Marca Aalborg. A la salida del controlador de flujo se encuentra acoplado un manómetro de rango 0-40 [mbar], denominado manómetro 3. Luego del manómetro, el GLP entra a la junta rotatoria. En un comienzo, las conexiones de GLP están hechas con cañerías de cobre de ¼”, sin embargo, la constante manipulación de estas la hacían propensa a sufrir fugas, por lo que durante los últimos ensayos fueron reemplazadas por flexibles de gas. Todos los fittings utilizados en la línea de GLP corresponden a fittings de norma NPT.

Parte importante de la línea de suministro es la junta rotatoria de entrada, ya que ella permite conectar ambas líneas al gasificador, de tal manera que no se vean afectadas por el giro del gasificador prototipo. Además, permite que el aire y el GLP se mezclen antes de entrar al gasificador.

#### **4.2.4 ADQUISICIÓN DE DATOS**

Durante cada ensayo, existen 11 puntos en donde la temperatura es monitoreada constantemente, adquiriéndose datos cada 1 o 5 segundos, según el punto a medir. Estos puntos se distribuyen de la siguiente manera: 8 de ellos se encuentran a lo largo del cuerpo del gasificador, ubicado cada uno en las perforaciones mencionadas en el punto **4.2.1**. Cada una de estas mediciones es realizada a través de una termocupla tipo S. El noveno punto de medición se encuentra a la salida de la junta rotatoria ubicada en la tapa de gasificador. Esta medición también es realizada a través de una termocupla tipo S, y registra la temperatura de salida del gasificador de los gases. El décimo punto de medición se encuentra en el ducto de escape, a través de una termocupla tipo K, para monitorear que la temperatura de los gases en esa etapa sea segura para la utilización de los equipos de análisis de emisiones, los cuales son explicados a mayor detalle en el punto **4.2.6**. El undécimo y último punto de medición, corresponde a una termocupla

tipo K, la cual se encuentra registrando temperatura ambiente en todo momento. Las termocuplas tipo S son conectadas a los equipos de medición a través de los denominados cables de compensación, los cuales compensan la distancia existente entre la termocupla y los equipos.

En cuanto a la adquisición de datos, las 8 termocuplas ubicadas en el cuerpo del gasificador, siendo la termocupla 1 la ubicada en la parte inferior del gasificador (entrada de mezcla aire-combustible), y la termocupla 8 la ubicada en la parte superior (salida de gases), se encuentran conectadas a un módulo inalámbrico, el cual transmite los datos por Wifi a una nube, permitiendo que estos puedan ser vistos en tiempo real en cualquier dispositivo conectado a la red de Wifi local, además de permitir rescatar datos de experiencias anteriores. El módulo inalámbrico consiste en una placa de 10 x 10 [cm], la cual tiene soldada 8 sensores de temperatura MCP9600, a los cuales son conectadas cada una de las termocuplas, a través de un cable de compensación, el cual permite compensar la distancia que hay entre las termocuplas y la placa. Esta placa se encuentra instalada en la superficie del cuerpo del gasificador, aproximadamente entre la termocupla 2 y 3. Para esto, cuenta con una carcasa de plástico que permite su protección y adhesión al cuerpo, a través de 2 abrazaderas que afirman la carcasa con el cuerpo del gasificador. Para energizar la placa, se cuenta con un módulo de energía 18650 Battery Shield V3, el cual tiene su propia carcasa de protección, y se encuentra ubicado al lado de la placa con los sensores, adherido por la misma abrazadera. La placa envía el registro de temperatura, a través de una señal bluetooth, a una Raspberry, aparato que se puede ubicar dentro de las proximidades del gasificador, y que se encarga de subir los datos a la red Wifi.

El resto de los puntos de medición, denominados desde ahora termocupla A (salida de la junta rotatoria), termocupla B (ducto de escape de gases) y termocupla C (temperatura ambiente), son conectados al módulo OMEGA, el cual transmite los datos a través de una conexión USB, a solo un equipo a la vez. Para esto, se debe contar con el software Personal DaqView, el cual permite la lectura de la temperatura en tiempo real, y guardar los datos para futuros análisis.



Figura 25: Módulo inalámbrico con sus respectivos sensores y batería del conjunto.

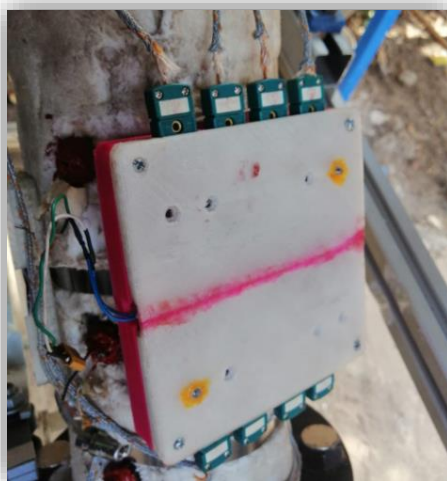


Figura 26: Módulo inalámbrico instalado en la carcasa, y sujetado al cuerpo del gasificador.

#### 4.2.5 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO

La rotación del cuerpo del gasificador tiene su origen en un motor Stepper, el cual transmite el movimiento a través de una sistema de piñones y cadena. Para esto, y como fue mencionado en el punto **4.2.1**, el cuerpo del gasificador tiene soldada a su circunferencia un piñón 06B-60, en el cual va acoplada la cadena. En el otro extremo

de la cadena, se ubica un piñón 06B-15, el cual se encuentra alojado en un eje, ubicado en la placa inferior de la estructura móvil descrita en el punto 4.2.2. El motor stepper se ubica por sobre el eje mencionado anteriormente, en la plancha superior de la estructura móvil, y se acopla a la cadena de transmisión por la parte externa de esta, a través de un piñón 06B-15, alojado en el eje del motor. Al estar acoplado de manera externa a la cadena, el motor cumple la función de tensar la cadena. Para la sujeción del motor a la estructura, se cuenta con una abrazadera que rodea al motor, y se aperna a la plancha superior de la estructura móvil. La tensión final a la cadena es dada por un tensor de cadena, compuesto por un rodamiento alojado en un perfil U, que se encuentra instalado en los perfiles laterales de la estructura móvil. El sistema de transmisión, sin el tensor de cadena, se puede observar en la figura 27.

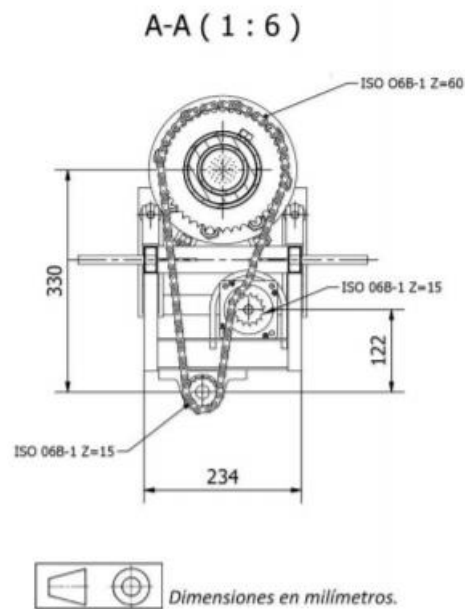


Figura 27: Plano vista frontal sistema de transmisión.

El accionamiento del motor stepper es electrónico, y está compuesto por una fuente de poder de 350 [W], un controlador TB6600 y un Arduino. Arduino es tanto un software como un hardware, en el cual se ha programado toda la secuencia lógica del giro del

motor. El software creado a través del lenguaje de programación de Arduino permite establecer 4 velocidades de giro establecidas, 15,20,25 y 30 RPM (medidas en el cuerpo del gasificador), además de un ajuste fino de RPM, una parada lenta y una detención de emergencia. Para esto se cuenta con un teclado, en el cual se ejecuta el comando correspondiente. Las señales enviadas por el Arduino son interpretadas por el controlador, el cual transforma las señales en pulsos eléctricos, que son enviados al motor para provocar el giro de este. El motor, el controlador y el Arduino son energizados por la fuente de poder.

Además del sistema de control del motor, el Arduino cuenta con un contador de RPM, compuesto por un sensor y 2 imanes ubicados en el flange Blind del gasificador. De esta forma, se comprueba que el gasificador este realmente girando a las revoluciones establecidas por el Arduino. Durante algunos ensayos, se instaló un Wattmetro en la entrada de corriente del sistema de transmisión, para medir la energía utilizada para generar la rotación del gasificador.

#### **4.2.6 MEDICIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN**

Se dispone de 2 instrumentos para medición de gases de combustión. El primero es el equipo TESTO 350 para análisis de gases de combustión en tiempo real, mientras que el segundo es el cromatógrafo de gases PERKIN-ELMER CLARUS 580, equipo disponible en el laboratorio de termodinámica de la UTFSM, Casa Central.

El equipo TESTO 350 permite hacer análisis de gases de combustión en terreno y en tiempo real. Cuenta con una sonda modular de 8 [mm] de diámetro, la cual se ingresa en el punto de medición. Esta sonda cuenta con un filtro, el cual protege al equipo del material particulado presente en el gas. El equipo cuenta con 6 sensores de gas, los cuales permiten medir un máximo de 6 de los siguientes gases:  $CO$ ,  $CO_{bajo}$ ,  $NO$ ,  $NO_{bajo}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $C_xH_y$  y  $H_2S$ . Los datos registrados son vistos en paralelo en la unidad de control y en el computador asociados a este, a través del software asociado al equipo.

El cromatógrafo es un equipo que necesariamente debe ser operado en el laboratorio de termodinámica, por lo que es necesario almacenar las muestras, y trasladarlas hasta el laboratorio, para ser analizadas a más tardar 2 días de haber sido tomadas, debido a que las bolsas que almacenan la muestra pierden estanqueidad con el paso de los días. Para esto se cuenta con un sistema de válvulas y una jeringa, que permite extraer el gas para almacenar en las bolsas, o purgar al ambiente en caso de ser necesario. Es fundamental ejecutar de forma correcta el procedimiento de toma de muestras, explicado en el punto 4.3.7, para evitar que el Syngas ingresado a la bolsa de muestreo sea contaminado con el aire presente en el ambiente. Para proteger el cromatógrafo, es necesario eliminar la humedad presente en el Syngas de muestreo, por lo que antes del ingreso del Syngas de muestreo, se ubica un filtro de sílice, el cual se encarga de absorber la humedad presente en él. Una vez trasladada la muestra al laboratorio, se inyecta en el cromatógrafo, la cual es transportada por un gas Carrier, o gas transportador. Dependiendo de cuál sea el gas que se está buscando en la muestra, es el gas Carrier a utilizar. Para analizar trazas de hidrógeno, se utiliza Helio (*He*) como gas Carrier, mientras que para analizar *CO* y *CH<sub>4</sub>*, se utiliza nitrógeno (*N<sub>2</sub>*) como gas Carrier.

Para la utilización del equipo TESTO 350 y la extracción de muestras para cromatografía, se cuenta con un ducto de escape, el cual direcciona los gases hacia una campana de extracción. El ducto de escape consiste en 2 cañones acoplados de una estufa a leña marca BOSCA, de acero inoxidable. Uno de estos cañones tiene soldado un fittings, el cual permite acoplar un flexible anaconda de alta temperatura, que une la salida de gases del gasificador con el ducto de escape. Este ducto cuenta con 2 perforaciones, en donde se hace ingreso de la sonda TESTO 350 por uno, y de la manguera de extracción de gases por otra.



Figura 28: Equipo TESTO 350.



Figura 29: Juego de válvulas, jeringa de extracción y bolsa de muestreo para análisis de cromatografía.



Figura 30: Sonda TESTO 350 instalada en ducto de escape.

#### **4.2.7 TRITURACIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS**

Se busca que los residuos a gasificar sean de un tamaño similar a las esferas de alúmina, por lo que es necesario triturarlos previa gasificación. Para esto, se cuenta con una trituradora, equipada con un motor de 7,5 [kW], que acciona un juego de cuchillas que se encarga de triturar los materiales, y es capaz de procesar cualquier tipo de RSU. Sin embargo, no todos los materiales se acercan al ideal buscando. Los mejores resultados se obtuvieron con botellas de plástico, como el HDPE y PET, y mientras más rígido se encontrará el material, más eficiente era el resultado de la trituración. El HDPE y PET triturado estaba compuesto por chips de aproximadamente de 10 [mm] de tamaño, más pequeñas cantidades de polvillo que quedaba en las paredes de la trituradora y en el recipiente de recepción de residuos triturados. En cuanto a otros formatos de plásticos, como lo son bolsas, envoltorios, frascos de yogur, entre otros, contruidos en base a LDPE, PP o PS, los resultados no fueron óptimos. La trituradora formaba tiras de plástico en vez de chips con algunos materiales, mientras que otros simplemente no eran agarrados por las cuchillas, y se mantenían girando dentro de estas por tiempo indefinido. En cuanto al papel y al cartón, este fue triturado sin ningún problema, pero formando una excesiva cantidad de polvillo, y de un tamaño irregular de chip. En

cuanto a los textiles, el textil sintético (principalmente poliéster) fue triturado de forma óptima, mientras que el algodón, si bien se trituraba sin ningún problema, el material se volvía a juntar luego de salir de la trituradora, formando una especie de masa de algodón.



Figura 31: Materiales triturados de manera óptima.

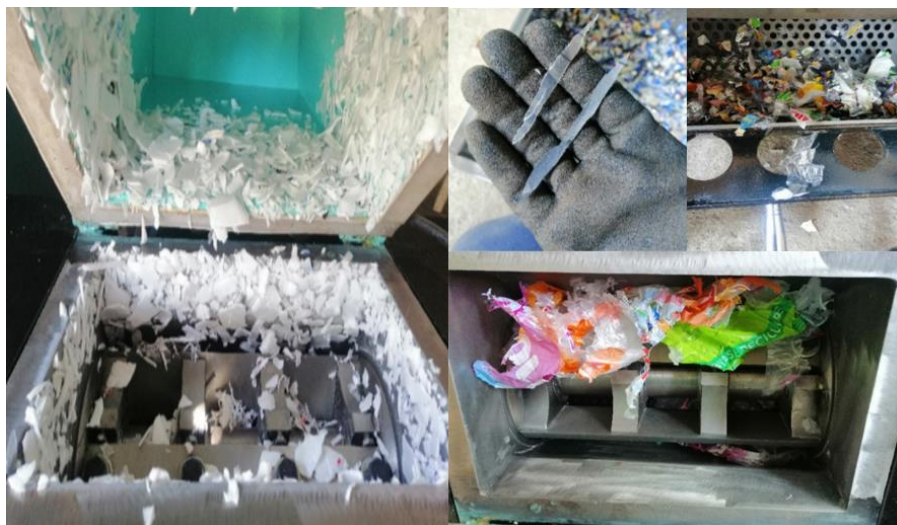


Figura 32: Residuos triturados de manera ineficiente.

Para determinar la cantidad de residuos a gasificar por ensayo, es necesario la distribución de las esferas de alúmina dentro del gasificador. El cuerpo del gasificador se puede dividir en 3 partes en base a la distribución de esferas. Tomando como punto de partida la parte superior del gasificador, es decir, la salida de los gases, se tiene la primera parte, que consta de un pequeño tramo de lecho inerte, es decir, solo esferas de alúmina, las cuales permitirán un desplazamiento inicial del frente de llama y estabilización de este, y el aumento de la temperatura de las esferas. El segundo tramo, el cual abarca la mayor parte del volumen interno del gasificador, está formado por un lecho híbrido, compuesto por esferas de alúmina y residuos, mezclados en volúmenes iguales. El último tramo es otro tramo de lecho inerte, el cual permite que los residuos se puedan terminar de quemar a una distancia segura de la entrada de la mezcla aire-combustible. El avance del frente de llama se determina en base a la temperatura que marcan las termocuplas ubicadas a lo largo del cuerpo, por lo que se utilizan estas últimas como puntos de referencia. El primer tramo de lecho inerte abarca desde la tapa, hasta la séptima termocupla. Mientras que el segundo, se ha variado a lo largo de los ensayos. En un comienzo, el lecho híbrido se distribuía entre la segunda y la séptima termocupla (1,2 litros). Sin embargo, luego de la anexión del módulo inalámbrico de transmisión de datos, el lecho híbrido disminuyó su volumen, abarcando desde la tercera a la séptima termocupla (1,1 litros), para así evitar que el frente se desarrollará a la altura de los equipos de medición. El último tramo también fue sometido a modificaciones luego de la incorporación del módulo inalámbrico, ubicándose entre la segunda termocupla y la parte inferior del gasificador (0,5 litros), o la tercera termocupla y la parte inferior del gasificador (0,6 litros).

El residuo para gasificar (ya sea un material en específico o una mezcla de ellos), debe ocupar la mitad del volumen del lecho híbrido, para lo cual se posee una probeta graduada de 1 L, cual permite seleccionar una muestra del volumen requerido. Una vez determinado el volumen, se procede a masar la muestra seleccionada, en una balanza digital de resolución 0,01 (g), y posteriormente es mezclado, de la forma más homogénea posible, con un volumen idéntico de esferas de alúmina.

La homogeneidad de la mezcla entre residuos y esferas varía entre cada uno de los materiales a gasificar. Para ambos plásticos (HDPE y PET), se observa una buena mezcla, en donde las esferas y el material triturado se reparte de manera equitativa dentro de un volumen fijo. Para el caso de papel y cartón, se forman pequeños grumos del material, los cuales se mantienen unidos a pesar de agitar y revolver la mezcla. Estos grumos dificultan la homogeneidad de la mezcla, formando numerosos grupos de considerable volumen de material que no se encuentran mezclados con esferas. Para el algodón, la segregación del material es considerable. Los grumos de material son de un tamaño mayor, ya que al ser triturado este se divide en pequeñas fibras, las cuales se unen fácilmente entre sí.



Figura 33: Mezclas heterogéneas de papel, cartón y algodón con esferas de alúmina.

## **4.3 PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.**

### **4.3.1 PROCEDIMIENTO DE TRITURACIÓN.**

- Levantar la boca de alimentación y verificar que no quede material remanente en las cuchillas de trituración.
- Conectar la trituradora a la corriente trifásica.
- Girar ligeramente el botón de apagado, para retirar el enclavamiento.
- Presionar el botón verde de encendido.

- Dejar funcionar la máquina en vacío por 5 minutos, para verificar un funcionamiento normal de las cuchillas. Apagar e inspeccionar en el caso de que sea necesario.
- Ingresar el material previamente compactado, y en pequeñas cantidades, esperando entre 20 y 30 segundos para ingresar la siguiente carga de material.
- Una vez ingresado todo el material, dejar la máquina correr por 5 minutos, o hasta que todo el material sea triturado.
- Apretar el botón de apagado.
- Levantar boca de alimentación, y retirar material remanente en las cuchillas.
- Revisar el material retirado, y de ser necesario, se vuelve a ingresar a la trituradora.
- Una vez obtenida la granulometría deseada, limpiar completamente la trituradora, para evitar la contaminación entre distintos materiales.

#### **4.3.2 PROCEDIMIENTO DE CARGA DEL GASIFICADOR.**

- Inclinar el gasificador destapado a 45°.
- Rotar el gasificador a 10 RPM.
- Colocar un embudo en la apertura del gasificador, y se rellena con el tercer tramo de lecho inerte.
- Esperar un par de segundos para que las pelotas se acomoden en el fondo del gasificador.
- Cargar el gasificador con el lecho híbrido. Se recomienda que la mezcla de esferas y residuos se haga de manera paulatina, para evitar que esta se vaya segregando a medida que se desplaza por el gasificador. Para mezclas demasiado segregadas, como es el caso del Algodón, se recomienda no mezclar previamente a la carga, sino que agregar de manera intercalada pequeñas cantidades de esferas y residuos de manera directa al interior del gasificador.
- Cargar el primer tramo de lecho inerte.
- Detener la rotación del gasificador.

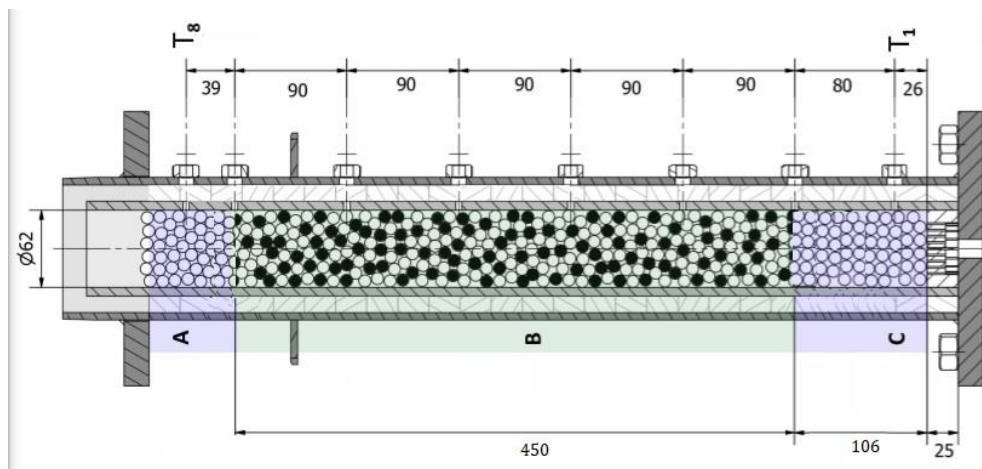


Figura 34: Distribución del lecho híbrido dentro del gasificador, para ensayos sin rotación.

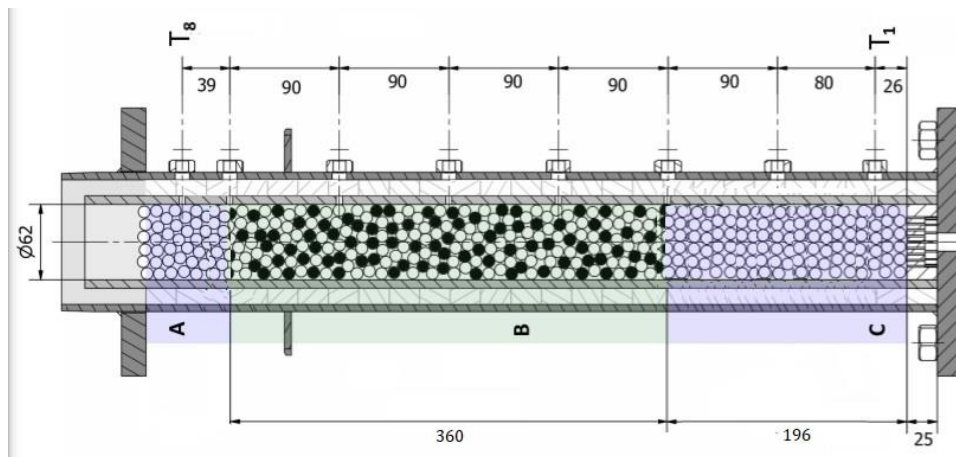


Figura 35: Distribución del lecho híbrido dentro del gasificador, para ensayos con rotación.

### 4.3.3 PROCEDIMIENTO DE ENCENDIDO DEL GASIFICADOR.

- Instalar las líneas de aire y de GLP.
- Encender los controladores de flujo, esperando alrededor de 15 minutos antes de utilizarlos, o hasta que estos marquen 0.
- Revisar la correcta alineación de la cadena de transmisión.
- Abrir la válvula del cilindro de GLP, y dar el paso del gas al resto de la línea.

- Revisar las conexiones de la línea de GLP, para verificar una correcta instalación, evitando cualquier fuga. Para eso se coloca un poco de lavaza en cada una de las conexiones. Si se observa la presencia de burbujas, significa que existe una fuga, la cual se debe corregir.
- Cortar el paso del gas.
- Revisar la conexión de las termocuplas a los cables de compensación, y de estos al módulo inalámbrico.
- Instalar la pila del módulo inalámbrico en el cuerpo del gasificador, y se enchufa a esta última.
- Encender el módulo inalámbrico.
- Encender el PC de apoyo, y se conecta el módulo OMEGA.
- Cargar el software Omega DaqView.
- Ingresar a la interfaz de la Raspberry.
- Instalar el ducto de escape y el frasco de acumulación de residuos.
- Enchufar el compresor, y se abre la válvula a la salida de este.
- Setear la presión de la línea de aire, a través del regulador de presión del filtro de humedad, en 1 [bar].
- Abrir la válvula a la entrada del regulador de flujo de aire, y setear este al flujo correspondiente.
- Abrir la válvula de GLP, y setear el regulador de flujo al flujo correspondiente.
- Comenzar el registro de datos en el software Omega DaqView.
- Dar un chispazo en la parte superior del gasificador, para encender el frente de llama.
- Una vez desarrollado el frente de llamas, y un poco antes que alcance la termocupla 7, iniciar la rotación del gasificador, a las revoluciones correspondientes del ensayo a realizar.
- Tapar el gasificador, aprovechando el giro de este, para desplazar la tapa.
- Colocar la abrazadera de sujeción de la junta rotatoria.
- Conectar el flexible Anaconda a la salida de la junta rotatoria y a la entrada del ducto de escape.

- Conectar la termocupla ubicada a la salida de la junta rotatoria al módulo OMEGA.

#### **4.3.4 PROCEDIMIENTO DE APAGADO DEL GASIFICADOR**

- Una vez que el frente de llama atraviese todo el lecho híbrido, cerrar la llave de paso del GLP.
- Mantener la rotación del gasificador y la alimentación de aire por un tiempo adecuado, para facilitar el enfriamiento adecuado.
- Detener el registro de datos del módulo OMEGA, y descargar los datos obtenidos.
- Desconectar los cables de compensación de la termocupla de la junta rotatoria.
- Descargar los datos registrados por el módulo inalámbrico.
- Detener la rotación del gasificador.
- Apagar el módulo inalámbrico, y desconectarlo de la batería.
- Desinstalar la batería del módulo inalámbrico, y proceder a recargarla.
- Cortar el suministro de aire.
- Desenchufar el compresor, y desconectar los controladores de flujo.
- Desinstalar el flexible de alta temperatura.
- Retirar el frasco con los residuos del gas, y proceder a masarlo.
- Eliminar cuidadosamente los residuos del gas, y limpiar el frasco.

#### **4.3.5 PROCEDIMIENTO DE DESCARGA DEL GASIFICADOR.**

- Una vez enfriado el gasificador, generalmente al día siguiente de realizar el ensayo, retirar la tapa de este.
- Retirar de manera cuidadosa las cenizas presentes en la tapa, y almacenarlas en un recipiente, para posteriormente ser cuantificadas.

- Colocar una manga de pantalón en la apertura del gasificador, para facilitar la recepción de las esferas.
- Inclina el gasificador en sentido opuesto ( $-45^{\circ}$ ), para facilitar el retiro de las esferas del interior. Para esto, se deben retirar las bielas que sostienen la estructura móvil.
- Una vez inclinado, ubicar el otro extremo de la manga en un recipiente, manteniéndola en esa posición, hasta que la mayoría de las esferas hayan caído en el recipiente.
- Dependiendo del material a gasificar, algunas esferas se pegan entre ellas y a las paredes del gasificador, por lo que es necesario retirar la manga, e introducir una varilla metálica al interior del gasificador, y golpearlas hasta que se hayan soltado por completo. Estas esferas no son mezcladas con el resto de las esferas, y se mantienen almacenadas aparte, como desecho de la gasificación.
- Las esferas retiradas en un comienzo son limpiadas con el compresor, y almacenadas para volver a ser utilizadas en los siguientes ensayos.
- Introducir una varilla con una escobilla en la punta, para barrer las cenizas ubicadas en las paredes del cilindro cerámico. Estas cenizas son retiradas cuidadosamente y dispuestas en un recipiente, para posteriormente ser cuantificadas.
- Inclinar nuevamente el gasificador en  $45^{\circ}$ , dejándolo listo para futuros ensayos.

#### **4.3.6 PROCEDIMIENTO PARA UTILIZACIÓN DE EQUIPOS DE ANÁLISIS DE EMISIONES GASEOSAS.**

- Encender el PC asociado al equipo.
- Ejecutar software relacionado con el equipo de medición.
- Monitorear temperatura del ducto de escape, asegurando de que se encuentre en una temperatura segura para la inserción de la sonda.

- En caso de encontrarse en una temperatura segura, retirar la termocupla de medición, e insertar sonda del equipo de medición a utilizar.
- Registrar datos durante el tiempo que sea pertinente.
- Una vez listo el ensayo, detener el registro de datos, y retirar la sonda del ducto de escape.
- Guardar datos y apagar los equipos involucrados.
- Limpiar el filtro de la sonda.

#### **4.3.7 PROCEDIMIENTO TOMA DE MUESTRA PARA CROMATOGRAFÍA.**

- Limpiar con aire comprimido las mangueras a utilizar en el juego de válvulas y el filtro de sílice.
- Conectar las mangueras con el juego de válvulas y el filtro de sílice.
- Insertar la manguera de succión en uno de los orificios del ducto de escape.
- Saturar las líneas con Syngas. Para esto se procede a succionar el Syngas, manteniendo la llave de descarga al ambiente cerrada. Una vez succionado, se cierra la llave que da paso al Syngas, y se abre la llave de descarga al ambiente, para descargar el Syngas. Se cierra la llave de descarga y se abre nuevamente la llave de paso al Syngas, repitiendo el procedimiento cerca de 50 veces.
- Una vez saturada, y manteniendo las llaves de paso cerradas, conectar la bolsa de recolección de muestra.
- Con la llave de descarga a ambiente y la válvula de la bolsa de recolección cerradas, abrir llave de paso al Syngas y succionar parte del gas. Se cierra llave de paso al Syngas y se abre la válvula del gas, para inyectar gas a la bolsa. Se repite el procedimiento hasta llenar la bolsa.
- Una vez llena la bolsa, manteniendo la llave de paso al Syngas cerrada, se vacía la bolsa, enviando el contenido de Syngas al ambiente. La bolsa debe ser llenada y vaciada 3 veces antes de recolectar la muestra final.

- Llenar la bolsa con la muestra definitiva. Cerrar la válvula de la bolsa y retirar, almacenando en un lugar limpio, para posterior análisis en equipo de cromatografía. Se debe ser claro en los tiempos para que la muestra definitiva sea recolectada en el momento preciso que se requiere.

## **5. ANÁLISIS EXPERIMENTAL.**

### **5.1 ENSAYOS ESTÁTICOS (0 RPM).**

Tiene por objetivo estudiar el comportamiento del gasificador, en un régimen estático. Debido a la demora en la entrega del equipo de adquisición de datos inalámbrico, no era posible registrar temperaturas con el equipo rotando, a causa de que los cables de compensación utilizados en el módulo OMEGA impedían que el equipo girara. Es por esto por lo que se procedió a operar el equipo de manera estática, para ver el comportamiento térmico que tendría el gasificador, y como variaría con cada uno de los RSU disponibles. Se analizan perfiles de temperaturas, velocidades de frente de llama y los desechos producidos, para cada uno de los RSU disponibles, y una mezcla de ellos.

Utilizando una relación de equivalencia de  $\Phi = 0,87[-]$ , se realizaron ensayos de línea base, para ver el comportamiento térmico general del gasificador, establecer una velocidad de filtración óptima, y observar el comportamiento del frente de llama dentro de un lecho inerte. Posterior a estos ensayos, se utilizó la velocidad de filtración óptima ( $V_f = 40 \text{ cm/s}$ ), para gasificar los 5 tipos de RSU disponibles (HDPE, PET, Papel blanco, cartón y algodón), y una mezcla de ellos.

Para calcular la velocidad del frente de llama, se selecciona una temperatura de referencia para cada ensayo, y se registra el tiempo en el que cada termopar alcanza esta temperatura. Conociendo la distancia que hay entre cada uno de los termopares, se calcula la velocidad de avance del frente de llama de la siguiente manera:

$$v_{wi} = \frac{d_{ij}}{t_i - t_j} \quad (11)$$

Donde  $d_{ij}$  es la distancia entre dos termopares, y  $t_i - t_j$ , la diferencia de tiempo en el cual se registró la temperatura de referencia en cada uno de los termopares.

Se utiliza un ángulo de inclinación de  $30^\circ$ .

#### 5.1.1 ENSAYO #1 LÍNEA BASE $v_f = 20[cm/s]$ .

En el gráfico 1 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Se observa que tiene un comportamiento muy estable en el transcurso del tiempo. Las temperaturas alcanzadas fueron relativamente bajas, teniendo un peak en el termopar 7, superando levemente los  $600 [^\circ C]$ . Se midió la temperatura de salida de los gases, correspondiente al Termopar 1 del gráfico 1, alcanzando temperaturas de salida cercanas a los  $100 [^\circ C]$  durante casi todo el ensayo. El frente de llama avanzó a una velocidad promedio de  $0,0024 [cm/s]$ , demorando el ensayo un total de  $10.909 [s]$ . Se apagó la llama una vez que el frente de llama había pasado el termopar 6.

Se observan puntos que se alejan de la tendencia de aumento de temperatura. Esto es ocasionado por una mala conexión de la termocupla y los cables de compensación. Al ser el primer ensayo, no se tenía certeza de que filamentos de la termocupla correspondían al positivo y negativo, por lo que en algunos casos fue necesario corregirlas durante el ensayo.

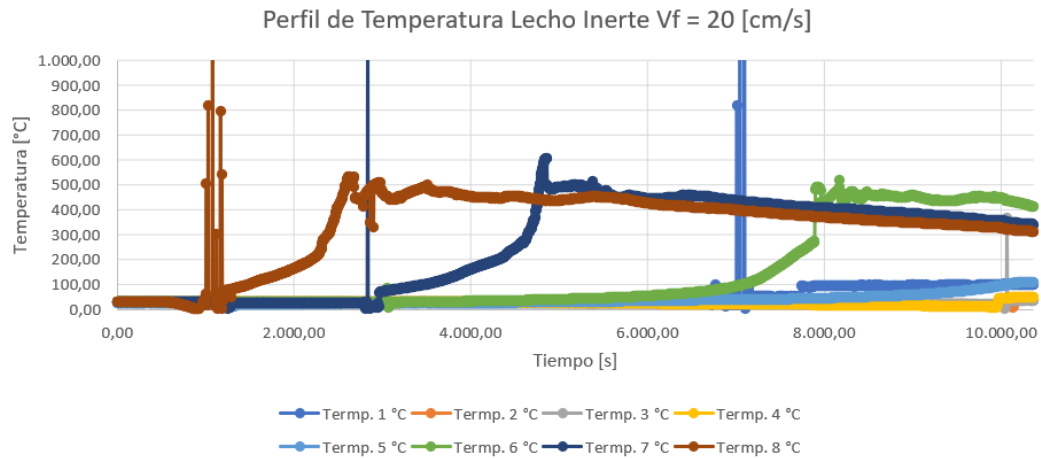


Gráfico 1: Temperatura vs tiempo ensayo #1.

### 5.1.2 ENSAYO #2 LÍNEA BASE $v_f = 30[cm/s]$ .

Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 2$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. Una vez tapado el gasificador, la presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la presión de gas sube a  $P_3 = 1$  [mbar]. En el gráfico 2 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Se observa que tiene un comportamiento muy estable en el transcurso del tiempo, a excepción del termopar 7, el cual, debido a errores en la conexión de la termocupla, registra errores de medición en la parte creciente de la curva. Las temperaturas fueron mayores a las del ensayo anterior, pero aún se mantienen bajo el valor esperado, teniendo un peak de  $693[^\circ C]$  en el termopar 5. Se midió la temperatura de salida de los gases, correspondiente al Termopar 9 del grafico 2, la cual alcanzó un peak de  $244 [^\circ C]$ , posterior al cual disminuyó en todo momento, llegando a los  $200 [^\circ C]$  al final del ensayo. El frente de llama avanzó de forma dispareja, con una velocidad de  $0,0013$  [cm/s] entre el termopar 7 y 8, una velocidad de  $0,0062$  [cm/s] entre el termopar 6 y 7, y una velocidad de  $0,0036$  [cm/s]. En promedio, la velocidad de avance fue de  $0,032$  [cm/s], mayor a la del ensayo

anterior. En total el ensayo duró 11.343 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama había pasado el termopar 5.

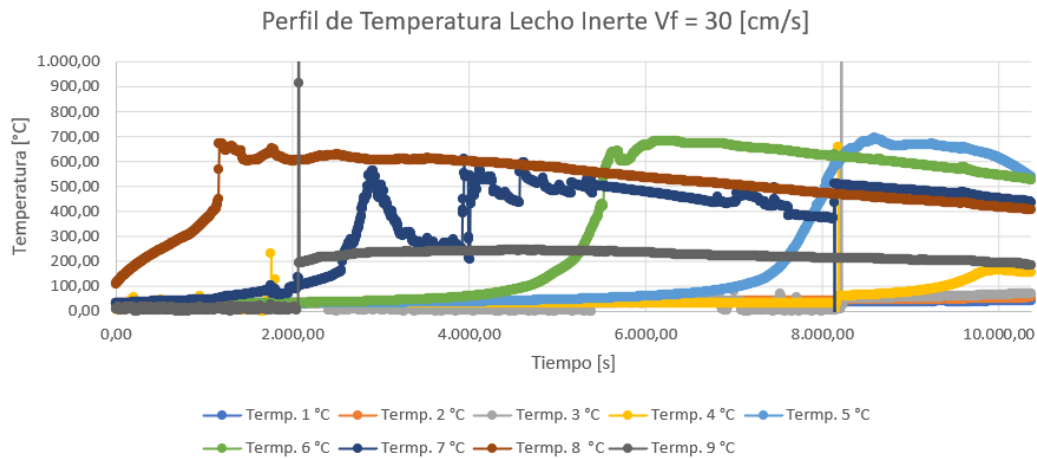


Gráfico 2: Temperatura vs tiempo ensayo #2.

### 5.1.3 ENSAYO #3 LÍNEA BASE $v_f = 40[cm/s]$ .

Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 1$  [mbar]. Una vez tapado el gasificador, la presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 6$  [mbar], mientras que la presión de gas sube a  $P_3 = 3$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 2$  [mbar]. Se observa un comportamiento parejo en cada uno de los termopares, desenvolviéndose en rangos de temperatura óptimas para la gasificación. En el gráfico 3 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Todos los termopares superaron los 700 [°C], teniendo un peak de 847 [°C] en el termopar 8. Se midió la temperatura de salida de los gases, correspondiente al Termopar 1 del grafico 3, la cual alcanzó un peak de 276 [°C], posterior al cual disminuyó en todo momento, llegando a los 230 [°C] al final del ensayo. El frente de llama avanzó de forma relativamente pareja, con una velocidad de 0,0034 [cm/s] entre

el termopar 7 y 8, una velocidad de 0,0044 [cm/s] entre el termopar 6 y 7, y una velocidad de 0,0043 [cm/s]. En promedio, la velocidad de avance fue de 0,004 [cm/s], mayor a la de los ensayos anteriores. En total, el ensayo duró 10.146 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama alcanzaba el termopar 4.

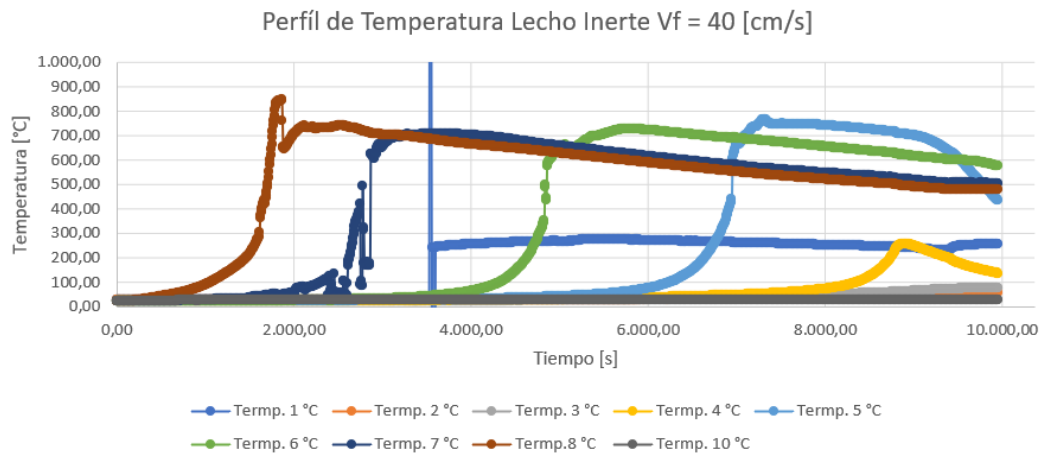


Gráfico 3: Temperatura vs tiempo ensayo #3.

Observando los resultados en estos tres ensayos, se decide utilizar una velocidad de filtración de  $v_f = 40$  [cm/s] para los ensayos con RSU. Esto debido a que en esta velocidad de filtración se lograron mejores rangos de temperatura, y el avance del frente de llama fue más rápido y estable.

#### 5.1.4 ENSAYO #4 LECHO HÍBRIDO HDPE.

Para este ensayo, se utilizaron 200 gramos de HDPE triturado, y tamizado, con una granulometría entre 4-10 [mm]. Como se menciona en el punto 4.2.7, se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 2 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 1$  [mbar]. Una vez tapado el gasificador, la presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 7$  [mbar], mientras que la presión de gas sube a  $P_3 = 4$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 3$  [mbar]. Una vez que el frente de llama entró en el lecho híbrido, la presión comenzó a aumentar

paulatinamente, llegando a marcar  $P_2 = 22$  [mbar];  $P_3 = 18$  [mbar] y  $P_s = 18$  [mbar], luego de una hora y media de transcurrido el ensayo. Es por esto que se decide destapar el gasificador, para aliviar la presión de las líneas de alimentación, y evitar un retroceso en la línea de GLP, la cual tiene una presión de salida de 29 [mbar]. Una vez retirada la tapa, se puede observar una llama de aproximadamente 20 [cm] que sale del interior del gasificador (Figura 36), la cual se mantiene durante gran parte del ensayo. Junto con la llama, pequeñas cantidades de ceniza negra salían de manera intermitente desde el interior del gasificado. Esta misma ceniza negra, u hollín, cubría la parte interior de la tapa, y gran parte del orificio de salida de gases de esta, reduciendo considerablemente el diámetro de esta. Se observa que, una vez quemado el RSU, las esferas se agrupan ocupando la mitad del área transversal del cilindro cerámico, formando un perfil de media luna, el cual se puede observar en la figura 37.



Figura 36: Llama generada una vez la tapa fue retirada.



Figura 37: Perfil de media luna presente en el interior del gasificado, una vez gasificado el RSU.



Figura 38: Cenizas presentes en la tapa del gasificador.

En el gráfico 4 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Si bien los perfiles de temperatura siguen la tendencia observada en los ensayos de línea base, estos no fueron

completamente parejos, apreciándose oscilaciones en la temperatura a medida que transcurre el tiempo. Todos los termopares superaron los 700 [°C], teniendo un peak de 888 [°C] en el termopar 4. Se midió la temperatura de salida de los gases, correspondiente al Termopar 9 del grafico 4, la cual alcanzó un peak de 484 [°C], la cual fue disminuyendo levemente, hasta el momento en que el gasificador fue destapado, momento en el cual se tuvo que detener la medición, ya que la termocupla correspondiente está ubicada en la junta rotatoria anexada a la tapa. El frente de llama avanzó de forma relativamente pareja, y se puede observar su perfil de velocidades en el gráfico 5. En promedio, la velocidad de avance fue de 0,0070 [cm/s] en el lecho híbrido, mayor a la de los ensayos anteriores. En total, el ensayo duró 9.000 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama alcanzaba el termopar 2.

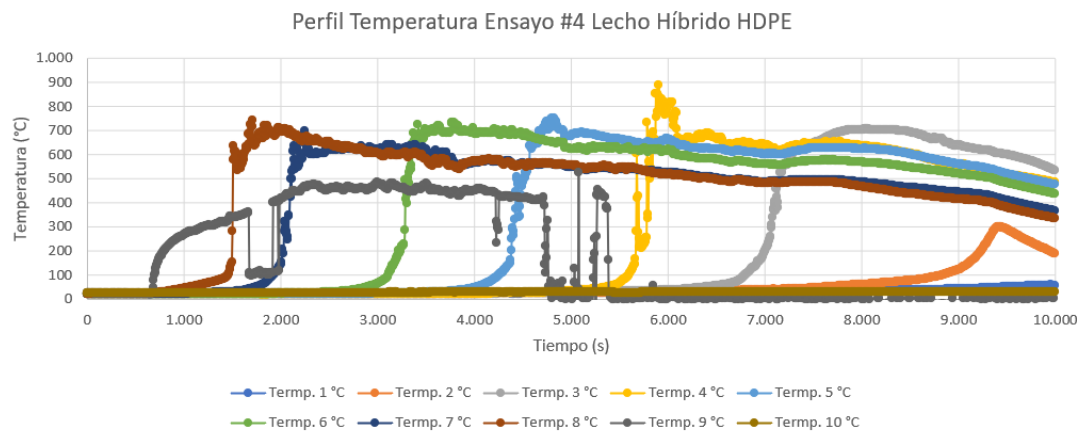


Gráfico 4: Temperatura vs tiempo ensayo #4.

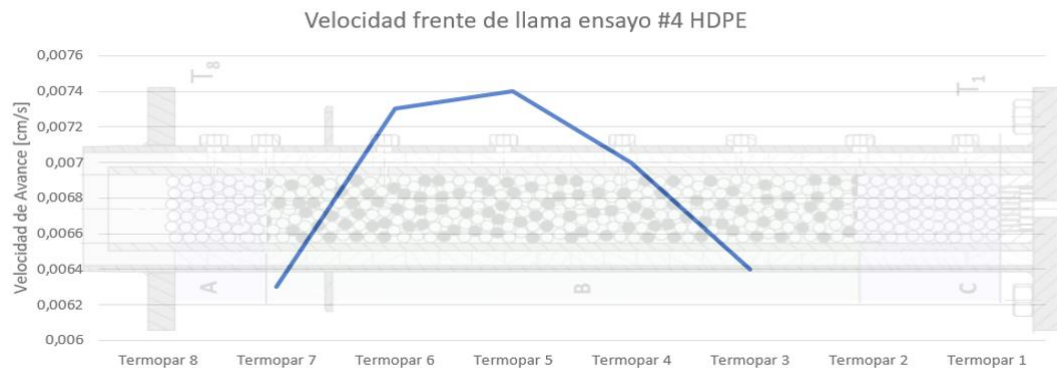


Gráfico 5: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #4.

Al momento de apagar la llama, se observa que las esferas de alúmina y las paredes del cilindro cerámico están teñidas de negro, debido al hollín generado por la gasificación. Se dejó correr solo aire por 8.100 [s], para ver cómo se enfriaba el gasificador. Este flujo de aire limpio las esferas y los interiores del gasificador, los cuales estaban completamente limpios al terminar la jornada. La curva de enfriamiento se puede observar en el gráfico 6. Una vez retiradas las esferas, se puede observar que una pequeña cantidad de ellas se encuentran adheridas por una masa café, la cual se puede apreciar en la figura 39. Esta masa aparenta ser plástico, el cual se mantuvo en estado líquido y decanto al fondo del gasificador, solidificándose alrededor de las esferas una vez disminuida su temperatura.

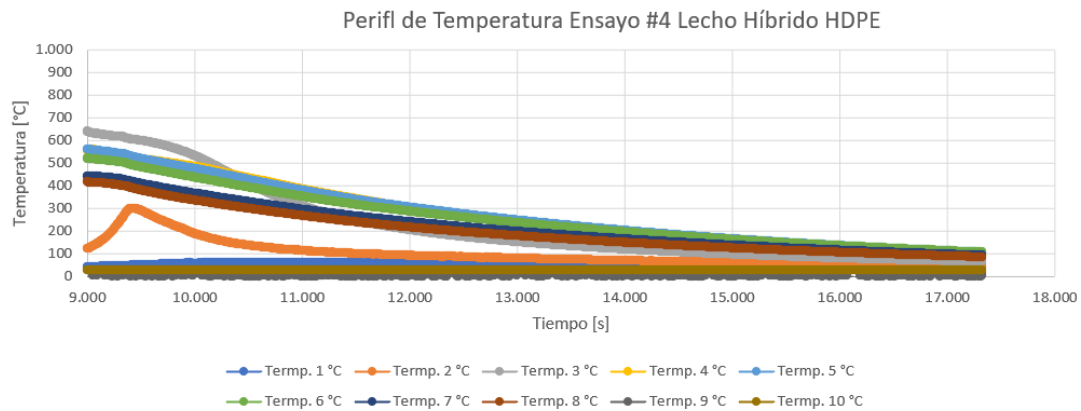


Gráfico 6: Temperatura vs tiempo para el enfriamiento, ensayo #4.



Figura 39: Masa café adheridas a esferas de alúmina durante ensayo estático de gasificación HDPE.

### 5.1.5 ENSAYO #5 LECHO HÍBRIDO PET.

Para este ensayo, se utilizaron 120 gramos de PET triturado, y tamizado, con una granulometría entre 4-10 [mm]. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 2 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 2$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. Debido a la alza de presión constante que tuvo el ensayo #4, se decidió mantener el gasificador abierto durante toda la experiencia, tanto para este como para los futuros ensayos sin rotación, por lo que no fue posible monitorear presión y temperatura de salida. Durante pequeños lapsos de tiempo, una pequeña llama sale del interior del gasificador, la cual es casi imperceptible, siendo posible apreciarla solo desde ciertos ángulos. Se observa que, una vez quemado el RSU, las esferas se agrupan ocupando la mitad del área transversal del cilindro cerámico, de manera similar a la figura 37, durante el ensayo #4 de HDPE.

En el gráfico 7 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador, los cuales se desarrollan de manera heterogénea, ya que cada termopar alcanzó peaks distintos de temperatura. Además, los termopares 3 y 4 tienen un comportamiento inusual por dos razones. La primera es que la curva de crecimiento sigue una tendencia logarítmica, a diferencia del crecimiento usual, el cual es aproximadamente lineal y de manera rápida. La segunda razón, es que la curva del termopar 3 se desarrolló y alcanzó un peak primero que la curva 4, lo cual demuestra que el frente de llama no tuvo un avance parejo a lo largo del lecho híbrido. En cuanto a las temperaturas, estas estuvieron bajo lo esperado. Solo 3 de los 7 termopares registrados alcanzaron los 600 [°C], teniendo un peak máximo en el termopar 3, con 676 [°C]. Se puede observar el perfil de la velocidad de avance del frente de llama en el gráfico 8. En promedio, la velocidad de avance fue de 0,0110 [cm/s] en el lecho híbrido, mayor a los ensayos anteriores. En total, el ensayo duró 5.700 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama llegó al termopar 2.

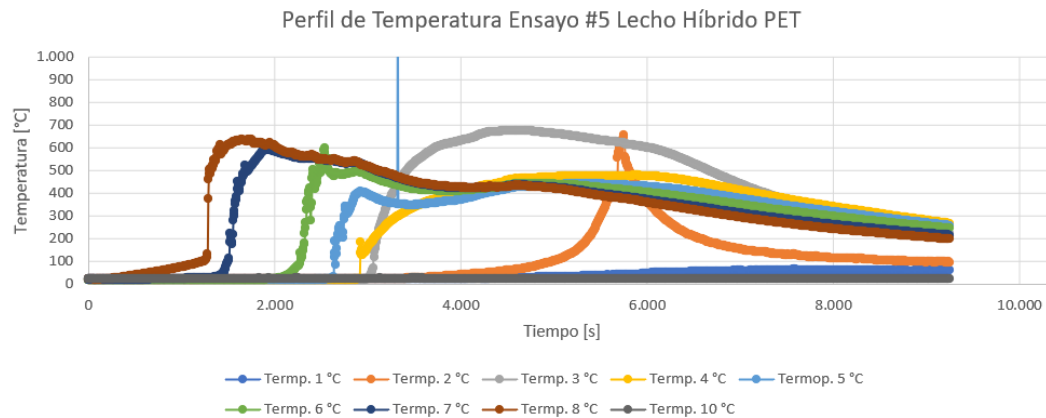


Gráfico 7: Temperatura vs tiempo ensayo #5.



Gráfico 8: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #5.

Al momento de apagar la llama, se observa que las esferas de alúmina y las paredes del cilindro cerámico están teñidas de negro, debido al hollín generado por la gasificación. A pesar de que se dejó correr el aire por un periodo de una hora una vez apagada la llama, este aire no fue capaz de remover la capa de hollín generada por la gasificación. Una vez retiradas las esferas, se puede observar que una pequeña cantidad de ellas se encuentran cubiertas por una sustancia negra y brillante, como se puede observar en la figura 40. Estas esferas fueron lavadas y lijadas, pero no fue posible eliminar la sustancia de la superficie. Aparentemente, esta sustancia estaba impregnada en la superficie. Una de las esferas fue partida en trozos pequeños, y se pudo observar que

el interior de ellas permanecía de color blanco. Se retiro una gran cantidad de ceniza negra desde el interior del gasificador, las cuales se pueden observar en la figura 41.



Figura 40: Esferas retiradas desde el interior del gasificador, recubiertas por una sustancia negra y brillante.



Figura 41: Ceniza negra retirada desde el interior del gasificador.

#### **5.1.6 ENSAYO #6 LECHO HÍBRIDO PAPEL BLANCO.**

Para este ensayo, se utilizaron 85 gramos de papel blanco triturado, y tamizado, con una granulometría bajo 10 [mm]. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y

residuos, y se distribuyeron entre el termopar 2 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P2 = 22$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P3 = 17$  [mbar]. La presión en ambas líneas fue disminuyendo a lo largo del ensayo, llegando a un mínimo de  $P2 = 4$  [mbar] y  $P3 = 0$  [mbar], luego de 6.840 [s] encendida la llama. Durante ciertos intervalos de tiempo, pequeñas cantidades de ceniza blanca salen del interior del gasificador. Cerca de una hora y media después de iniciado el ensayo, una pequeña llama sale del interior del gasificador. Una vez quemado el RSU, las esferas se agrupan ocupando la mitad del área transversal del cilindro cerámico, al igual que en los ensayos anteriores.

En el gráfico 9 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. El termopar 8 alcanzó un peak altísimo, superior a los 900 [°C]. El tiempo requerido para que el termopar 8 llegué a su máximo fue mayor al usual, demorando cerca de 4000 [s]. El termopar 7 desarrolló el mismo perfil que el termopar 8, pero alcanzando menor temperatura. Los demás termopares tuvieron una curva de crecimiento con menor pendiente, alcanzando peaks de temperatura cada vez menores, a medida que el frente de llama avanzaba. Solo dos termopares superaron los 700 [°C] (Termopar 5 y 8), alcanzando un máximo de 906 [°C] en el termopar 8. Se puede observar el perfil de la velocidad de avance del frente de llama en el gráfico 10, la cual varió considerablemente en el último tramo del lecho híbrido. En promedio, la velocidad de avance fue de 0,0100 [cm/s] en el lecho híbrido. En total, el ensayo duró 9.960 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama alcanzaba el termopar 2.

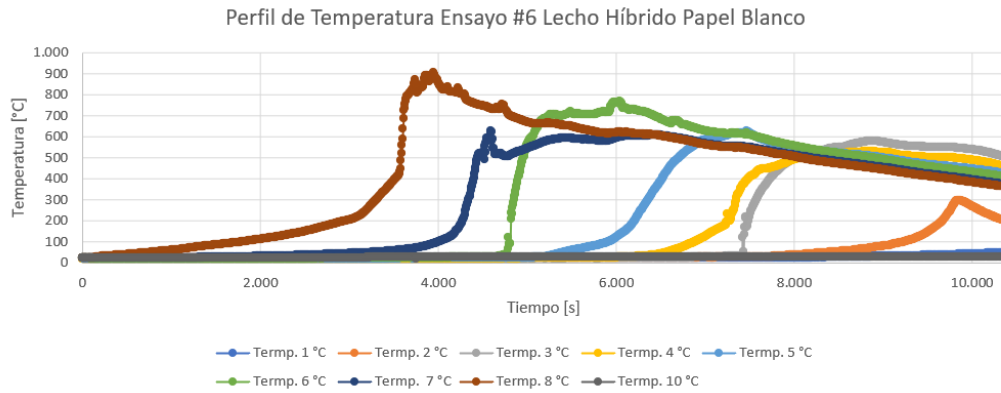


Gráfico 9: Temperatura vs tiempo ensayo #6.

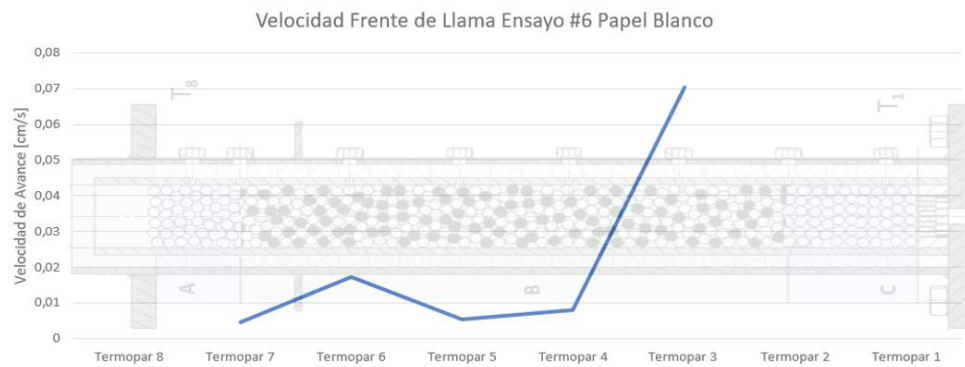


Gráfico 10: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #6.

Una vez retiradas las esferas, se puede apreciar que tanto estas como las paredes del gasificador están impregnadas de ceniza blanca, como se aprecia en la figura 42. Esta ceniza fue retirada con una brocha para ser masada, y se puede apreciar en la figura 43. La ceniza retirada tiene una masa de 5 gramos.



Figura 42: Cenizas presentes en las esferas y el interior del cilindro cerámico.



Figura 43: Ceniza recolectada para ser masada.

#### 5.1.7 ENSAYO #7 LECHO HÍBRIDO CARTON.

Para este ensayo, se utilizaron 85 gramos de cartón triturado, y tamizado, con una granulometría bajo 10 [mm]. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 2 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 17$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 13$  [mbar]. La presión en ambas líneas fue disminuyendo a lo largo del ensayo, llegando a un mínimo de  $P_2 = 3$  [mbar] y  $P_3 = 0$  [mbar], luego de 6.120 [s] encendida la llama.

Durante ciertos intervalos de tiempo, pequeñas cantidades de ceniza blanca salen del interior del gasificador. Cerca de una hora después de iniciado el ensayo, una llama de gran tamaño, cercana a los 20 [cm], sale del interior del gasificador, la cual se puede apreciar en la figura 44. Luego de 600 [s] de su aparición, esta llama fue cambiando de tonalidad, hasta ser prácticamente imperceptible. Una vez quemado el RSU, las esferas se agrupan ocupando la mitad del área transversal del cilindro cerámico, al igual que en los ensayos anteriores.



Figura 44: Llama que sale del interior del gasificador, durante gasificación de cartón.

En el gráfico 11 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. El frente de llama demoró cerca de 3.000 [s] en alcanzar el termopar 8, con un peak de 984 [°C], la temperatura más alta alcanzada hasta ahora. Los demás termopares se desarrollaron de manera similar entre ellos, alcanzando todos un peak entre los 600 [°C] y los 700 [°C]. El avance no fue parejo, ya que la distancia entre las curvas varía entre los distintos termopares, avanzando el frente demasiado rápido en alguno de ellos. Se puede observar el perfil de velocidad de avance del frente de llama en el gráfico 12, el cual tuvo un aumento considerable en la parte media del lecho híbrido. En promedio, la velocidad de avance

fue de 0,0070 [cm/s] en el lecho híbrido. En total, el ensayo duró 9.480 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama alcanzaba el termopar 2.

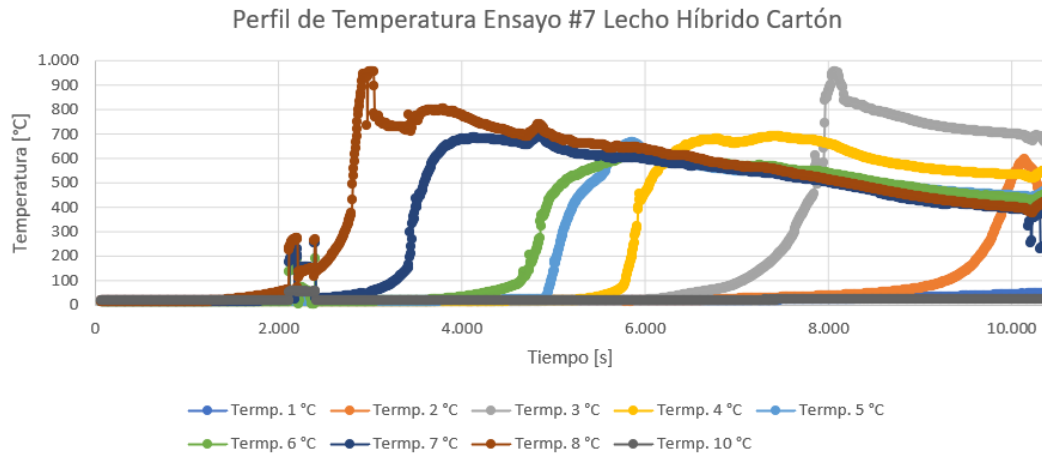


Gráfico 11: Temperatura vs tiempo ensayo #7.

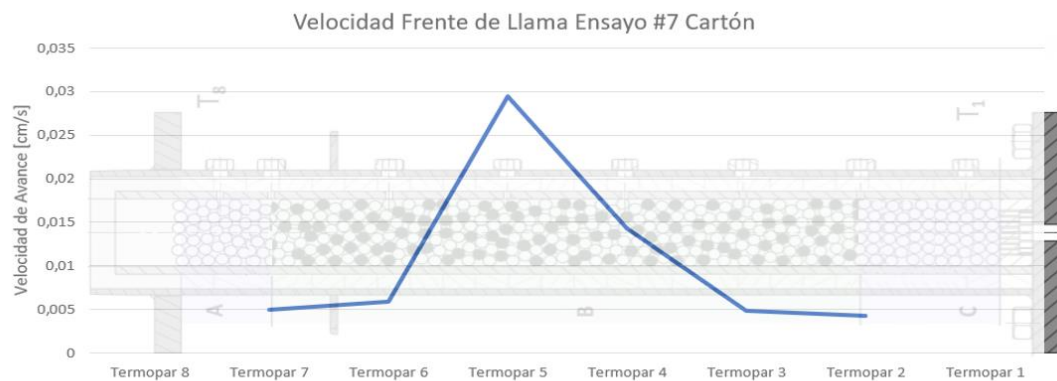


Gráfico 12: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #7.

Una vez retiradas las esferas, se puede apreciar que tanto estas como las paredes del gasificador están impregnadas de ceniza blanca. Esta ceniza fue retirada con una brocha para ser masada, y se puede apreciar en la figura 45. La ceniza retirada tiene una masa de 6 gramos.



Figura 45: Ceniza retirada desde el interior del gasificador, luego de gasificar cartón.

#### **5.1.8 ENSAYO #8 LECHO HÍBRIDO ALGODÓN.**

Para este ensayo, se utilizaron 93 gramos de algodón. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 2 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 14$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 9$  [mbar]. La presión en ambas líneas fue disminuyendo a lo largo del ensayo, llegando a un mínimo de  $P_2 = 5$  [mbar] y  $P_3 = 1$  [mbar], luego de 6.840 [s] encendida la llama. Durante ciertos intervalos de tiempo, pequeñas cantidades de ceniza salen del interior del gasificador. Una vez quemado el RSU, las esferas se agrupan ocupando la mitad del área transversal del cilindro cerámico, al igual que en los ensayos anteriores.

En el gráfico 13 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. El frente de llama demoró un poco más de 2.000 [s] en alcanzar el termopar 8, con un primer peak de 915 [°C]. En general, las curvas tienen un comportamiento anómalo, con constantes alzas y bajadas de temperatura. Incluso algunos de los termopares tienen más de un peak. La mitad de los

termopares superó los 700 [°C], mientras que el resto estuvieron entre los 600 [°C] y los 700 [°C]. La velocidad de avance cambio constantemente a lo largo del ensayo, aumentando considerablemente en el último tramo del lecho híbrido. Se puede observar el perfil de velocidad de avance del frente de llama en el gráfico 14. En promedio, la velocidad de avance fue de 0,0096 [cm/s] en el lecho híbrido. En total, el ensayo duró 9.060 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama alcanzaba el termopar 2.

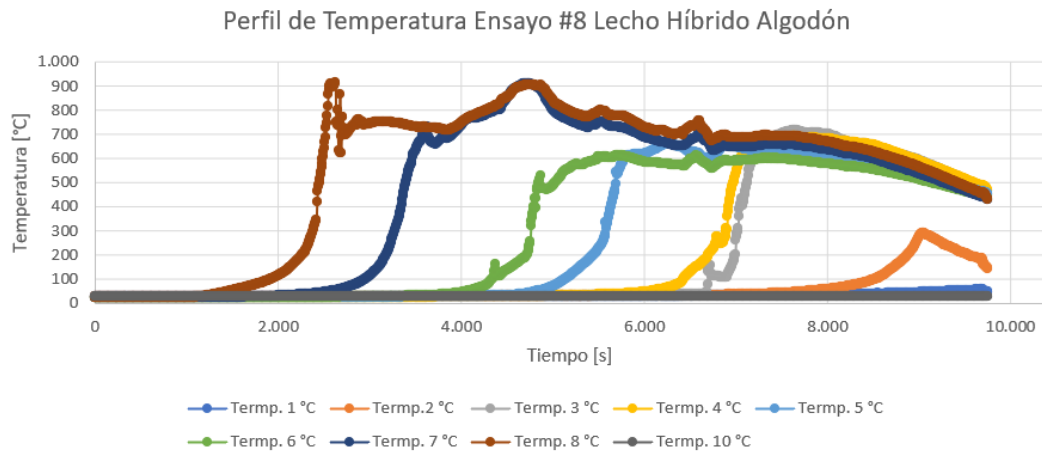


Gráfico 13: Temperatura vs tiempo ensayo #8.



Gráfico 14: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #8.

Una vez retiradas las esferas, se puede apreciar que tanto estas como las paredes del gasificador están impregnadas de ceniza café. Esta ceniza fue retirada con una brocha

para ser masada, y se puede apreciar en la figura 46. La ceniza retirada tiene una masa de 4 gramos.



Figura 46: Ceniza presente en el interior del gasificador, luego de gasificar algodón.

#### **5.1.9 ENSAYO #9 LECHO HÍBRIDO MEZCLA DE RSU.**

Una vez gasificados cada uno de los materiales que lograron ser triturados en condiciones óptimas, se procede a realizar un ensayo de gasificación utilizando una mezcla de todos ellos. La composición utilizada está basada en estudios realizados por el grupo de manejo eficiente de la energía (GIMEL) de la Universidad de Medellín, Colombia [39]. En la tabla 8, se observa la composición recomendada por el estudio, y como esta fue ajustada a los materiales disponibles para nuestro gasificador.

Tabla 8: Composición recomendada por GIMEL y composición utilizada en el ensayo #9.

| <b>MATERIAL</b>  | <b>% COMPOSICIÓN<br/>GIMEL</b> | <b>% COMPOSICIÓN<br/>UTILIZADA</b> |
|------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Materia Orgánica | 66,57                          | -                                  |
| Papel            | 11,02                          | 37,1                               |
| Cartón           | 2,43                           | 8,2                                |
| Plástico         | 12,64                          | 42,6                               |
| Tetra Pack       | 3,35                           | -                                  |
| Textiles         | 3,6                            | 12,1                               |
| Cuero            | 0,38                           | -                                  |
| <b>Total</b>     | <b>100</b>                     | <b>100</b>                         |

Utilizando como 100% el volumen disponible para el lecho híbrido (0,6 L), se separan volúmenes en base a la composición recomendada, los cuales posteriormente eran masados. Los volúmenes y masas correspondientes se observan en la tabla x. El porcentaje correspondiente a plástico fue dividido a partes iguales entre PET y HDPE.

Tabla 9: Detalle de composición utilizada, en volumen y masa, para el ensayo #9.

| <b>MATERIAL</b> | <b>%COMPOSICIÓN<br/>UTILIZADA</b> | <b>VOLUMEN (L)</b> | <b>MASA (GR.)</b> |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|
| Papel           | 37,1                              | 0,22               | 32                |
| Cartón          | 8,2                               | 0,05               | 7                 |
| HDPE            | 21,3                              | 0,13               | 46                |
| PET             | 21,3                              | 0,13               | 22                |
| Algodón         | 12,1                              | 0,07               | 11                |
| <b>Total</b>    | <b>100</b>                        | <b>0,6</b>         | <b>118</b>        |

Una vez lista la mezcla, se mezcló con un volumen igual de esferas, y fue distribuido entre las termocupas 2 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 8$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 5$  [mbar]. La presión en ambas líneas fue disminuyendo a lo largo del ensayo, llegando a un mínimo de  $P_2 = 5$  [mbar] y  $P_3 = 1$  [mbar], luego de 5.820 [s] encendida la llama. Una vez quemado el RSU, las esferas se agrupan ocupando la mitad del área transversal del cilindro cerámico, al igual que en los ensayos anteriores. No se observan cenizas emitidas desde el interior del gasificador durante el ensayo.

En el gráfico N° 15 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocupas ubicadas a lo largo del gasificador. El frente de llama demoró cerca de 3.000 [s]. Se ve que las curvas tienen un avance parejo, aunque el perfil de crecimiento es más cercano a un polinomio de tercer grado, que, a uno lineal, como en ensayos anteriores. El último tramo de crecimiento se acerca a una curva logarítmica, en donde pareciera que la temperatura convergerá a un punto, para luego descender de manera pareja y con pendiente constante en todos los termopares. La temperatura máxima alcanzada fue de 810 [°C], en el termopar 2. Los termopares 2, 5, 7 y 8 sobrepasaron los 700 [°C], los termopares 3 y 4 se mantuvieron sobre los 600 [°C], mientras que el termopar 6 alcanzó un máximo de solo 523 [°C]. Se puede que el termopar 5 comenzó su curva de descenso de temperatura casi al mismo tiempo que el termopar 6. La velocidad de avance cambio constantemente a lo largo del ensayo, aumentando considerablemente en la mitad del lecho híbrido, cuádruplicando la velocidad alcanzada en el tramo inicial. Se puede observar el perfil de velocidad de avance del frente de llama en el gráfico N°16. En promedio, la velocidad de avance fue de 0,0073 [cm/s] en el lecho híbrido. En total, el ensayo duró 9.240 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama alcanzaba el termopar 2.

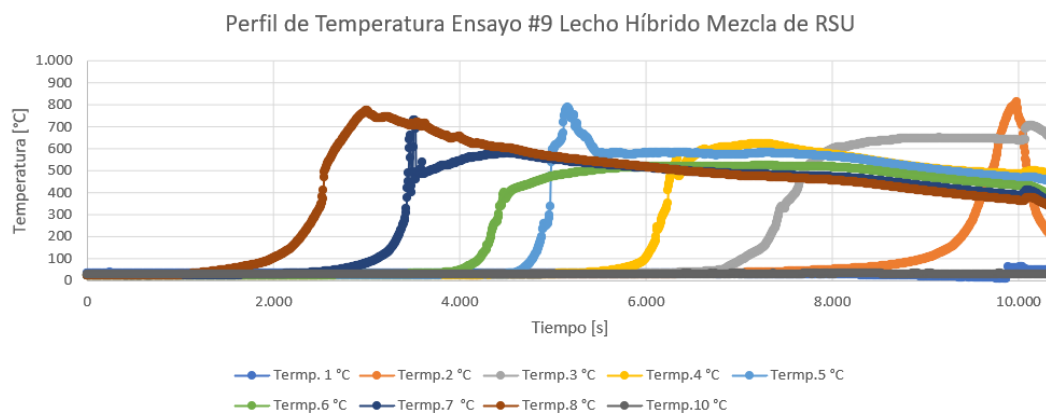


Gráfico 15: Temperatura vs tiempo ensayo #9.

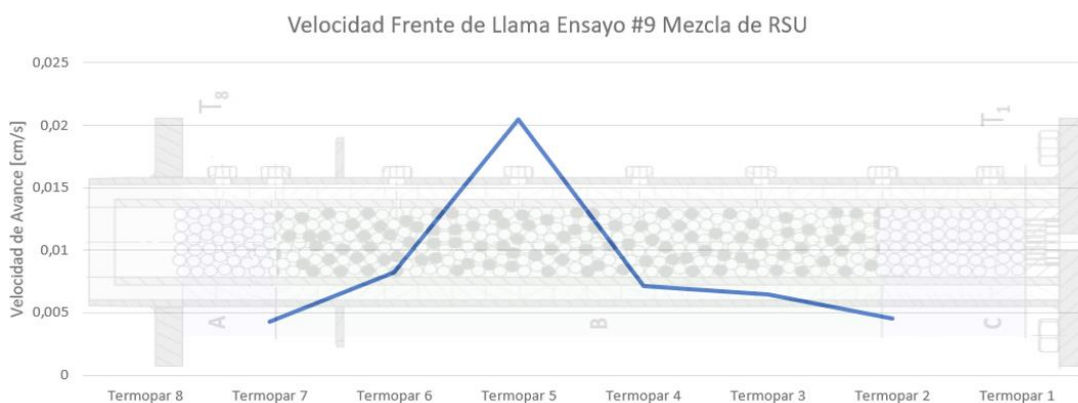


Gráfico 16: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #9.

Una vez retiradas las esferas, el único desecho presente es una pequeña cantidad de cenizas café, las cuales no pudieron ser cuantificadas. No se produjo ninguno de los desechos observados en la gasificación de HDPE y PET.

#### 5.1.10 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS ESTÁTICOS (0 RPM).

En base a los ensayos de lecho inerte, se puede observar que, a mayor velocidad de filtración, mayores son las temperaturas alcanzadas, y mayor es la velocidad de avance del frente de llama. En todos los ensayos se observó un comportamiento parejo en el perfil de temperatura, para cada uno de los termopares.

En cuanto a los ensayos con lecho híbrido, son muchos los puntos a considerar. Las temperaturas máximas alcanzadas, y los perfiles de temperatura en general, variaron considerablemente, tanto entre ensayos, como entre termopares, para cada uno de los ensayos. El material con un comportamiento más uniforme fue el HDPE, con el cual los perfiles tuvieron un comportamiento similar para todos los termopares, además de alcanzar temperaturas similares, y dentro del rango óptimo, para cada uno de ellos. En cambio, los demás materiales tuvieron comportamientos completamente distintos entre ellos. Las curvas no seguían una tendencia, y las temperaturas alcanzadas variaban considerablemente entre un material y otro. En cuanto al avance del frente de llama, el HDPE contó con un avance parejo, variando solo un 20% su velocidad a lo largo del lecho híbrido. Los demás materiales, variaron considerablemente su velocidad a lo largo del ensayo, llegando algunas a aumentar en un 700% su velocidad, como en el caso del papel, o definitivamente, perdiendo un grosor continuo del lecho, como es el caso del PET, en donde el frente de llama abarcó dos termocuplas al mismo tiempo. Esta inestabilidad del frente se ve incrementada en materiales que se consumen de manera rápida, como el papel y el cartón, y también puede ser provocada por los vacíos generados al momento de consumirse los residuos, los cuales provocan un acomodamiento brusco por parte de las esferas. Se espera que al gasificar con el gasificador rotando, este problema sea solucionado, y el frente sea estabilizado. Se puede observar en el gráfico 17, la comparación de la velocidad de avance de todos los ensayos estáticos con lecho híbrido realizados, en el cual se aprecia que la velocidad en el ensayo #4 de HDPE se mantuvo constante, comparado con las grandes fluctuaciones en los otros ensayos.

Durante el ensayo de HDPE se observó un aumento constante de la presión, la cual se vio aliviada una vez se comenzó a retirar la tapa del gasificador. Se piensa que el aumento de presión se debe a que la ceniza actúa como tapón en el orificio de salida de gases, disminuyendo el área de esta. Este problema debería ser resuelto una vez el equipo comience a rotar, ya que el constante giro del cuerpo retirará las cenizas que se acumulan en el orificio de salida de la tapa.

La media luna observada luego de finalizar los ensayos de lecho híbrido demuestra que las esferas no decantan al final del cuerpo una vez gasificados los residuos, por lo que se decide incrementar el ángulo de inclinación a 45°, para vencer el ángulo de reposo de las esferas.

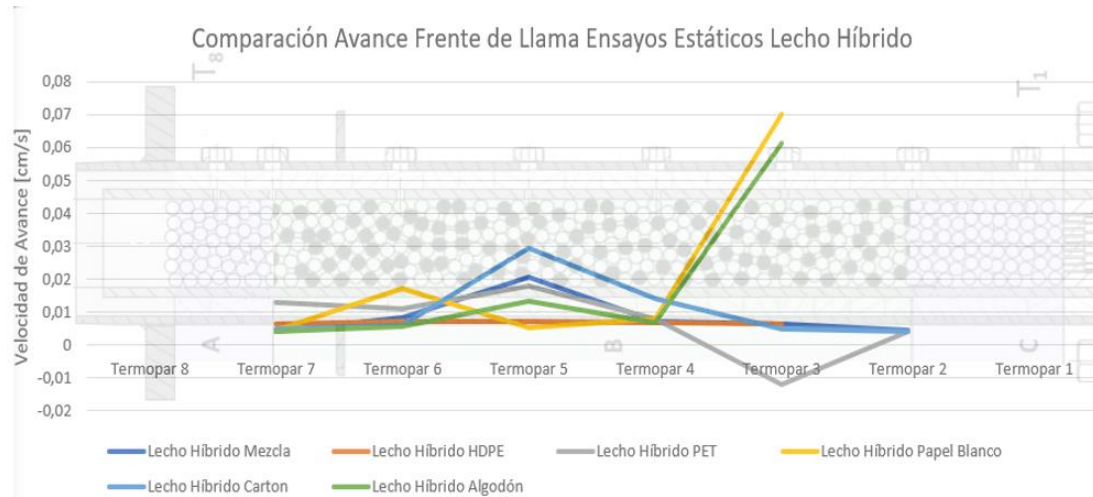


Gráfico 17: Avance frente de llama vs espacio durante distintos ensayos de gasificación.

En cuanto a los desechos producidos, está dentro de lo esperado. Cenizas y material particulado en todos los materiales, y alquitranes en los ensayos con plásticos, observados como la masilla café en el ensayo de HDPE, y el recubrimiento negro en los ensayos de PET.

## 5.2 ENSAYOS CON ROTACIÓN (15 RPM).

Una vez disponible el módulo de adquisición de datos inalámbrico, es posible realizar los ensayos con rotación. Estos ensayos tienen como objetivo observar el comportamiento del frente de llama durante un ensayo con rotación, la cual debería estabilizar su desarrollo a lo largo del gasificador. La primera tanda de ensayos tuvo como objetivo validar un correcto funcionamiento y montaje del módulo recién adquirido, asegurando que los perfiles térmicos tengan un comportamiento dentro de

lo esperado, en relación con los ensayos anteriores. Todos los ensayos fueron realizados con una velocidad de filtración  $V_f = 40[cm/s]$ ,  $\phi = 0,87[-]$ , una inclinación de  $45^\circ$  y rotando a 15 RPM. Como la idea del giro del gasificador es principalmente estabilizar el frente de llama en el lecho híbrido, el ensayo comienza con un régimen estático, y momentos antes de que el frente de llama alcance el lecho híbrido, es cuando se procede a rotar el gasificador e instalar la tapa. Se aprovecha el giro del cuerpo para una fácil instalación de la tapa.

Para esta tanda de ensayo, se contó con el ducto de canalización de gases, que permitía dirigir los gases hacia la campana de escape, además de incorporar la sonda testo y permitir la extracción de muestras para cromatografía. Sin embargo, al momento de llevar las muestras de cromatografía al laboratorio para realizar el respectivo análisis, se observó que estas se encontraban prácticamente vacías, y por temas de pandemia, no fue posible realizar mas pruebas. En cuanto a la sonda TESTO, esta pudo ser ocupada solo una vez para ensayos de lecho inerte, también por motivos de pandemia. Es por esto que se omitirán el análisis de los gases obtenidos, centrándonos netamente en un análisis térmico de los ensayos. De igual manera, se especifica para cada ensayo el momento en el que las muestras de cromatografía fueron extraídas, en caso de que la extracción afectara de alguna manera el perfil térmico obtenido y el desarrollo del frente de llama.

### **5.2.1 ENSAYO #10 LECHO INERTE.**

Este ensayo tuvo como objetivo principal comprobar un correcto funcionamiento del módulo de adquisición de datos inalámbrico, por lo que solo se hizo énfasis en las temperaturas registradas. En el gráfico 18 se observa el perfil térmico del ensayo. Se observa que las curvas de cada termopar siguen la tendencia que han tenido los ensayos de lecho inerte hasta ahora. Los máximos se encuentran dentro de lo esperado, superando todos los termopares los  $700 [^\circ C]$ . La máxima temperatura fue alcanzada por el termopar 5, alcanzando los  $1.200 [^\circ C]$ . El termopar 8 alcanzó cerca de  $1.200 [^\circ C]$  en alcanzar su máximo, momento en el cual el gasificador fue tapado, y se comenzó la

rotación. La velocidad del frente de llama se mantuvo estable a lo largo del lecho, con una variación máxima de un 20%. La velocidad promedio fue de 0,0047 [cm/s]. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico 19. El ensayo tuvo una duración de 8.000 [s], apagando la llama una vez el termopar 4 alcanzara su máximo.

Comparando con el ensayo estático de lecho inerte, y  $V_f = 40$  [cm/s], los resultados se encuentran dentro de lo esperado, asumiendo una variación producto de la rotación del gasificador. De esta manera se comprueba un correcto funcionamiento del módulo inalámbrico, en cuando a la lectura de temperatura se trata, a excepción del sensor correspondiente al termopar 1, el cual marcó 0 [°C] la mayoría del tiempo, y oscilando de manera aleatoria cada cierto periodo de tiempo.

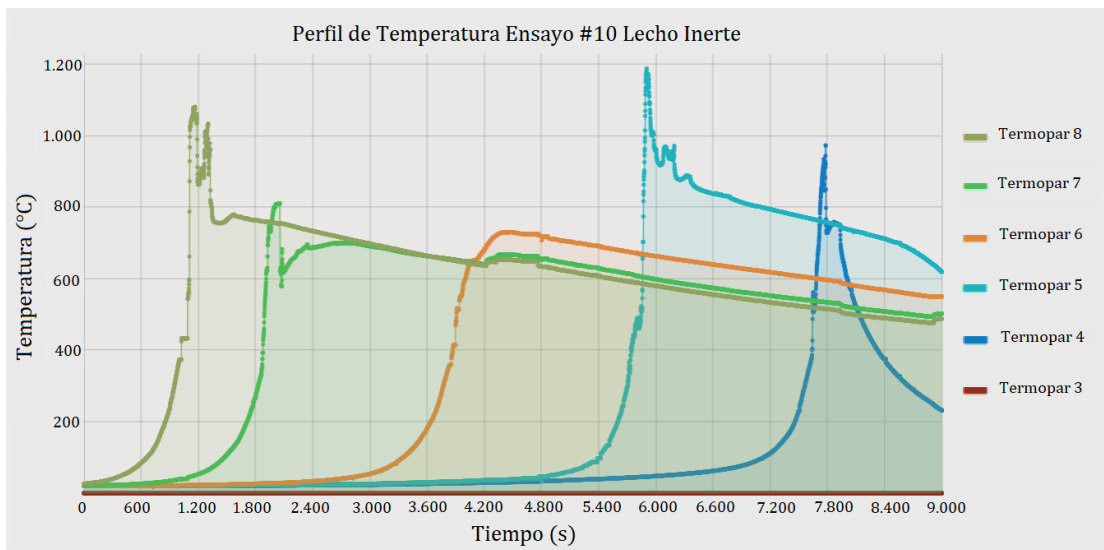


Gráfico 18: Temperatura vs tiempo ensayo #10.

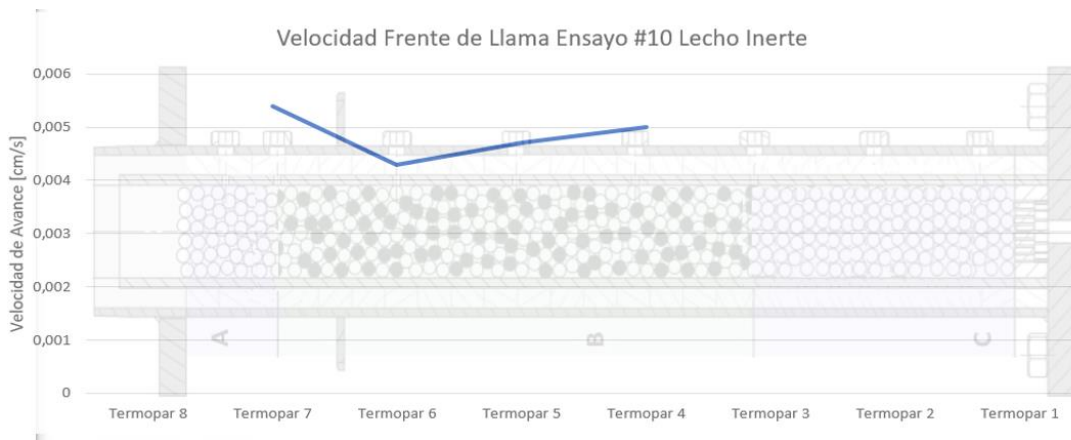


Gráfico 19: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #10.

### 5.2.2 ENSAYO #11 LECHO HÍBRIDO HDPE-PET.

Este ensayo tiene como objetivo observar el comportamiento del gasificador, al gasificar RSU y rotar el equipo al mismo tiempo. Se espera que al momento de tapar el gasificador, la presión en las distintas líneas no suba de manera constante como en el ensayo #4, y se estabilice en algún momento. Además, se mantiene la llama encendida hasta que llegue a la altura que se encuentra acoplado el módulo de adquisición de datos, para ver cómo afecta una temperatura elevada de la zona a las carcasas de plástico que protegen los equipos. Cabe destacar que este ensayo se tuvo que realizar 2 veces, debido a que, por motivos de fuerza mayor, los operadores tuvieron que retirarse del taller mucho antes de que el gasificador hiciera un barrido completo del lecho híbrido. Al día siguiente, al querer vaciar el gasificador para repetir el ensayo, se observó que se formó una masa de residuos justo en donde se apagó la llama, la cual impedía que las esferas de la parte inferior del gasificador fueran retiradas del interior de este. Al momento de instalar el módulo en el gasificador, este se instaló al revés, quedando ubicado el termopar 8 en el sensor 1, el cual no tiene una lectura correcta. Por esta razón, los gráficos obtenidos para el ensayo #11 no tiene medición de temperatura para el termopar 8.

En los gráficos 20 y 21 se observan los dos barridos realizados al lecho híbrido con HDPE y PET. El desarrollo de los termopares fue homogéneo, observándose temperaturas dentro del rango óptimo de gasificación en todos los casos. Se realizó un barrido completo del lecho híbrido, y se continuó gasificando, con la intención de que el frente de llama llegará lo mas cerca al termopar 1 posible. Sin embargo, al momento de que el frente de llama pasará por la parte inferior del gasificador, el módulo inalámbrico y su batería comenzaron a calentarse progresivamente, hasta llegar al punto en que la carcasa protectora de la batería no resistió, derritiéndose en la unión con la abrazadera sujetadora. De esta manera, se tuvo que detener la rotación, y posteriormente el ensayo, ya que la batería quedo colgando y ponía en peligro la integridad del módulo de adquisición de datos. Para los siguientes ensayos, se procederá a disminuir el largo del lecho híbrido, ubicándolo entre los termopares 7 y 3, de tal manera que los aparatos de adquisición de datos estén a salvo de las altas temperaturas producidas por el frente de llama.

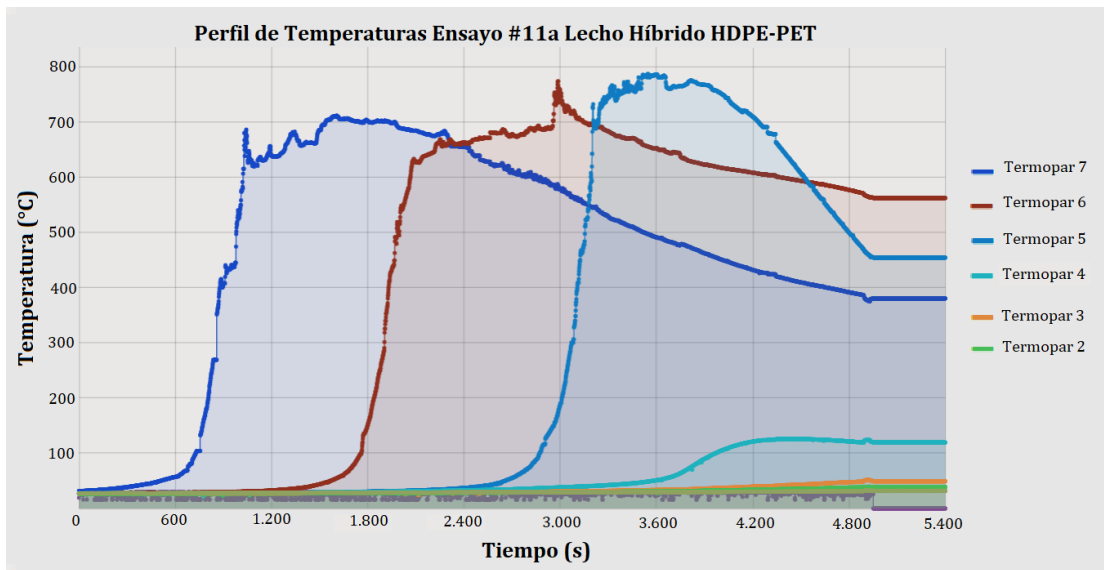


Gráfico 20: Temperatura vs tiempo ensayo #11a.

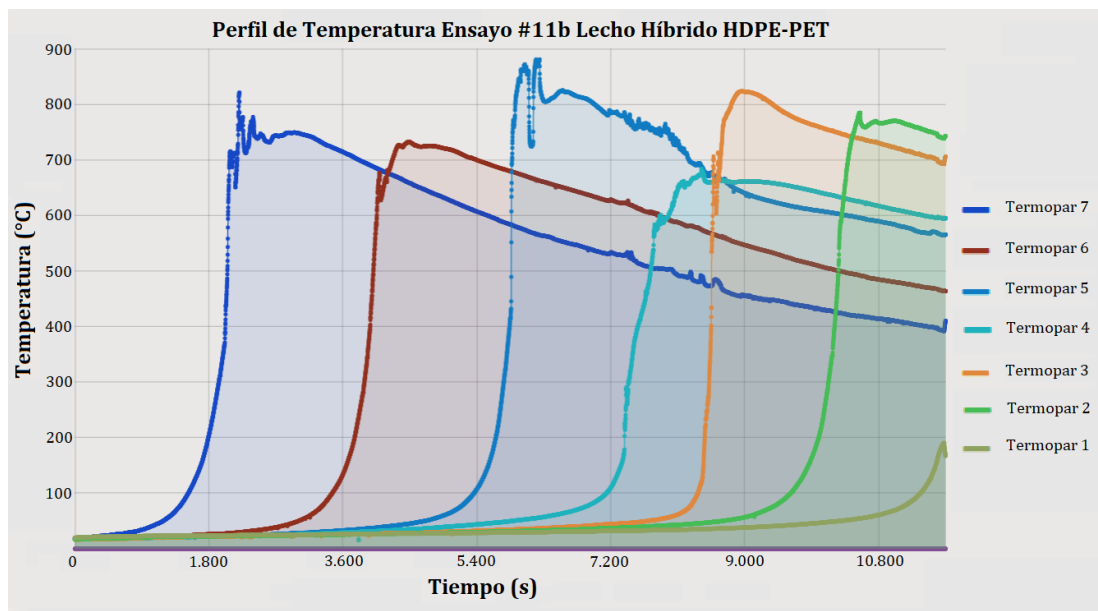


Gráfico 21: Temperatura vs tiempo ensayo #11b.

### 5.2.3 ENSAYO #12 LECHO HÍBRIDO PET.

Para este ensayo, se utilizaron 110 gramos de PET triturado. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 3 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. El gasificador fue tapado 2.040 [s] luego de iniciado el ensayo, en el momento en que el termopar 8 elevaba su temperatura. La presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 7$  [mbar], mientras que la presión de gas sube a  $P_3 = 4$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 5$  [mbar]. La presión en todas las líneas aumentó constantemente, hasta estabilizarse en los siguientes valores:  $P_2 = 16$  [mbar],  $P_3 = 11$  [mbar] y  $P_s = 13$  [mbar]. La rotación fue interrumpida por un par de minutos, a los 3780 [s] y a los 6720 [s], para corregir la conexión de la termocupla con el cable de compensación correspondiente.

En el gráfico 22 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. En comparación al ensayo estático de

PET (Ensayo #5), se observa que los perfiles se desarrollan de forma más pareja, teniendo todos ellos curvas de temperatura similares. Todos alcanzan temperaturas dentro de los rangos esperados, a excepción del termopar 7, el cual solo alcanzó los 668 [°C]. Además, todos los termopares demoran aproximadamente el mismo tiempo en desarrollarse. El peak de temperatura fue de 832 [°C], alcanzado por el termopar 5. Debido a la ruptura del filamento de la termocupla ubicada a la salida de los gases, no fue posible registrar temperaturas de salida. El frente de llama demora cerca de 2.400 [s] en alcanzar el termopar 8, y tuvo un promedio de avance de 0,0010 [cm/s] dentro del lecho híbrido. Su comportamiento fue estable, variando un máximo de un 30% dentro del lecho híbrido. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico 23. En total, el ensayo duro 6.900 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama llegó al termopar 3.

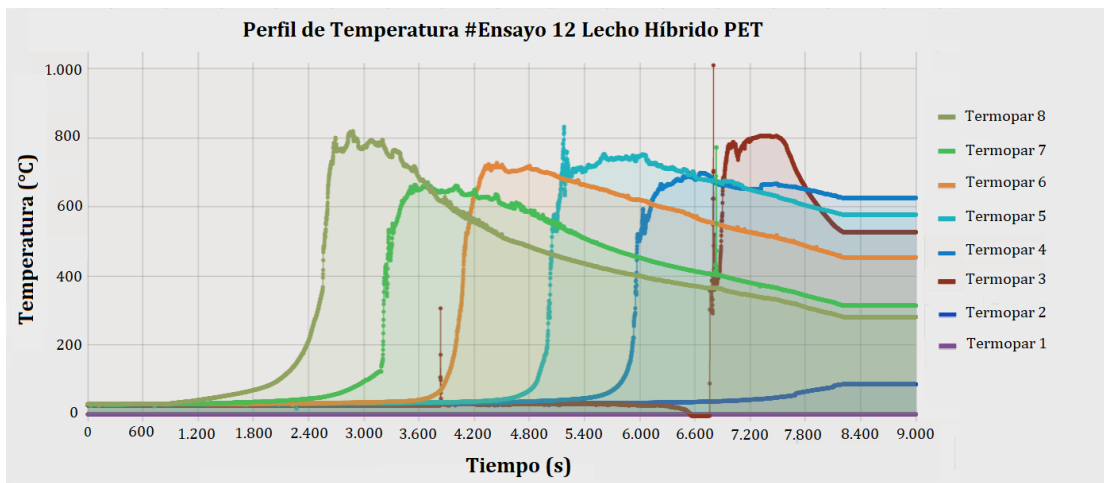


Gráfico 22: Temperatura vs tiempo ensayo #12.

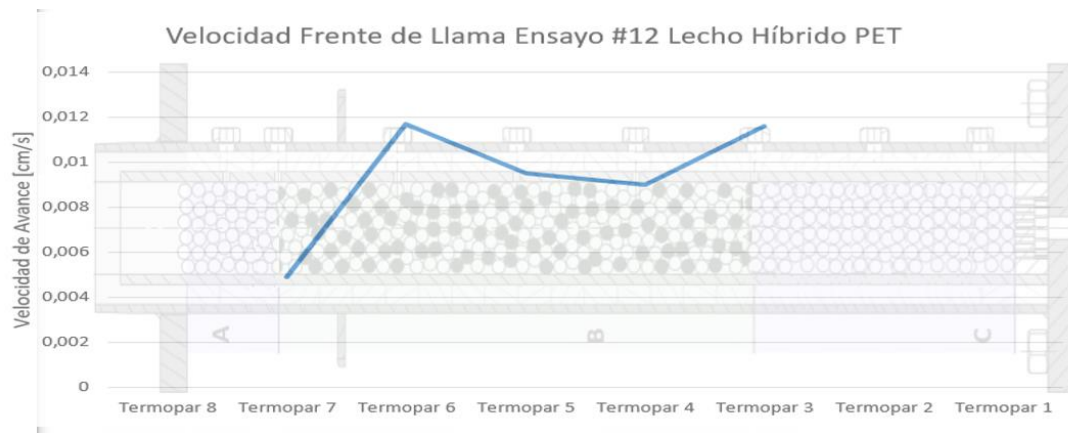


Gráfico 23: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #12.

Al momento de retirar las esferas, se observa la presencia de ceniza negra, la cual no fue posible recolectar, ya que el sistema de transmisión dificulta la manipulación del gasificador. Una vez vaciado el gasificador, se observaron un par de esferas que quedaron pegadas a las paredes del cilindro cerámico, lo cual se puede observar en la figura 47. Fue necesario golpear reiteradas veces las esferas con una varilla para que estas se despegaran de las paredes, sin embargo, permanecieron pegadas entre sí, como se observa en la figura 48. La masilla que une las esferas es similar a la producida por el HDPE en el ensayo #4, pero con una tonalidad más oscura. Se acumuló el condensado del gas en un frasco ubicado en la parte inferior del conducto de escape de los gases, el cual se aprecia en la figura 49.

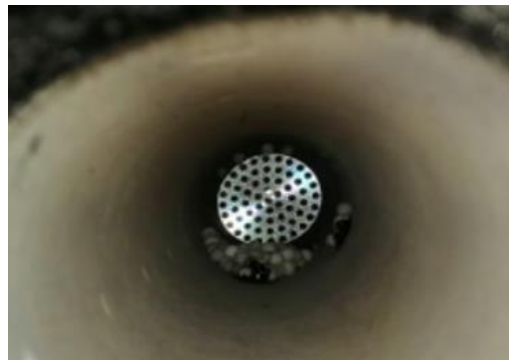


Figura 47: Esferas pegadas en la pared del cilindro cerámico, luego de la gasificación de PET con rotación.

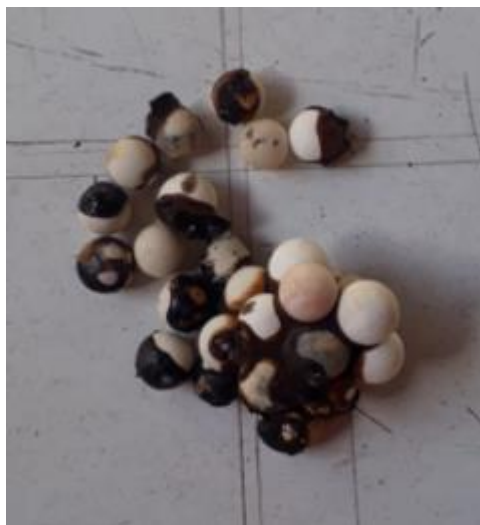


Figura 48: Esferas retiradas del interior del gasificador, luego de la gasificación de PET con rotación.



Figura 49: Condensado generado durante la gasificación.

#### 5.2.4 ENSAYO #13 LECHO HÍBRIDO HDPE.

Para este ensayo, se utilizaron 200 gramos de HDPE triturado. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 3 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. El gasificador fue tapado 1.680 [s] luego de iniciado

el ensayo, en el momento en que el termopar 8 alcanzaba su máximo. La presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 15$  [mbar], mientras que la presión de gas sube a  $P_3 = 11$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 12$  [mbar]. Una vez alcanzado el lecho híbrido, se observa que las agujas de todos los manómetros se encuentran oscilando, dentro de un rango de 1 [mbar], por lo que en todo momento la presión en la línea de aire oscila entre 15-16 [mbar], la de gas entre 10-11 [mbar], y la de salida entre 11-12 [mbar]. Se observaron filtraciones de gas en las termocuplas 4 y 7, las cuales ocurrieron en el momento en que el frente de llama pasaba por la posición correspondiente a estos termopares.

En el gráfico 27 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Todas las curvas siguen la misma tendencia, diferenciándose solamente en las temperaturas máximas alcanzadas. Las curvas 3, 4 y 8 alcanzan el peak, y descienden bruscamente, para luego seguir creciendo. Todos los termopares se desarrollaron por sobre los 700 [°C], alcanzando un peak de 832 [°C] en el termopar 3. La temperatura de salida se mantuvo entre los 250 [°C] y 350 [°C], y se puede observar su perfil en el gráfico 28. El frente de llama demora cerca de 1.200 [s] en alcanzar el termopar 8, y tuvo un promedio de avance de 0,0073 [cm/s] en el lecho híbrido. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico 29. En total, el ensayo demoró 7.800 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama llegó al termopar 3.

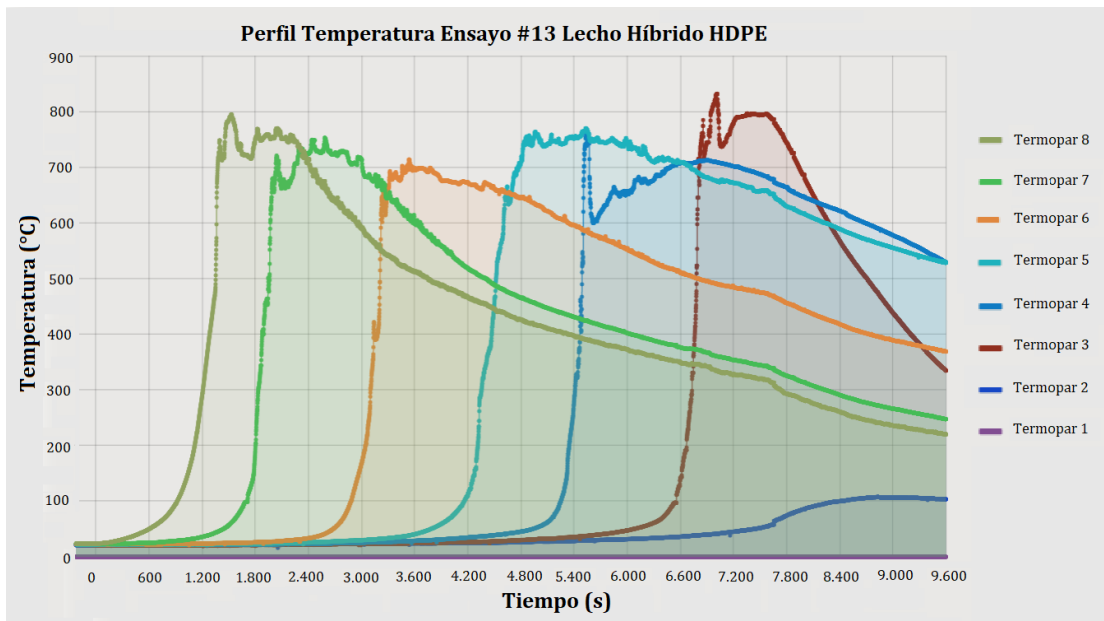


Gráfico 24: Temperatura vs tiempo ensayo #13.

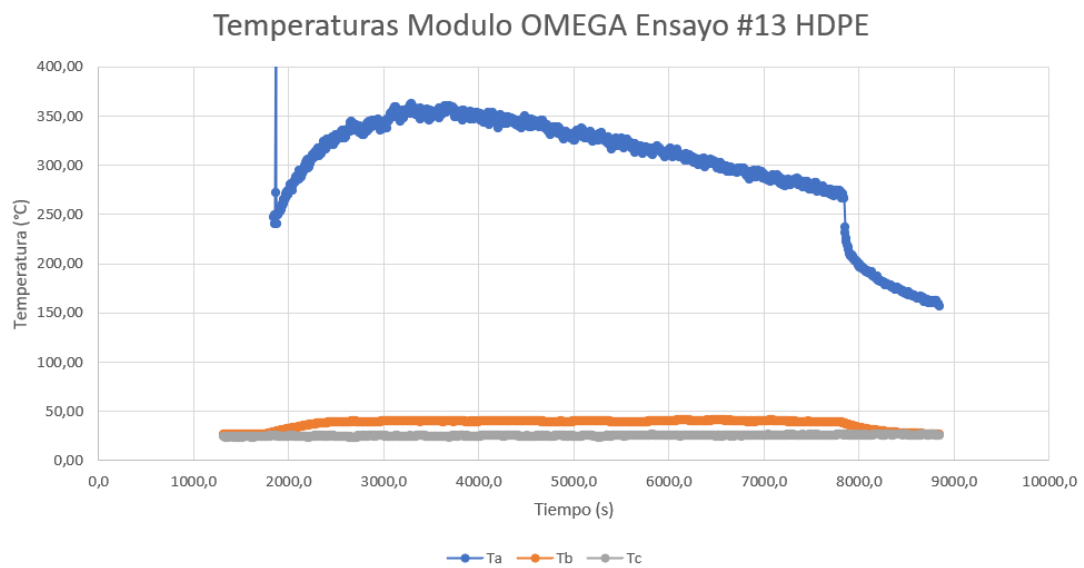


Gráfico 25: Temperatura vs tiempo módulo OMEGA ensayo #13.

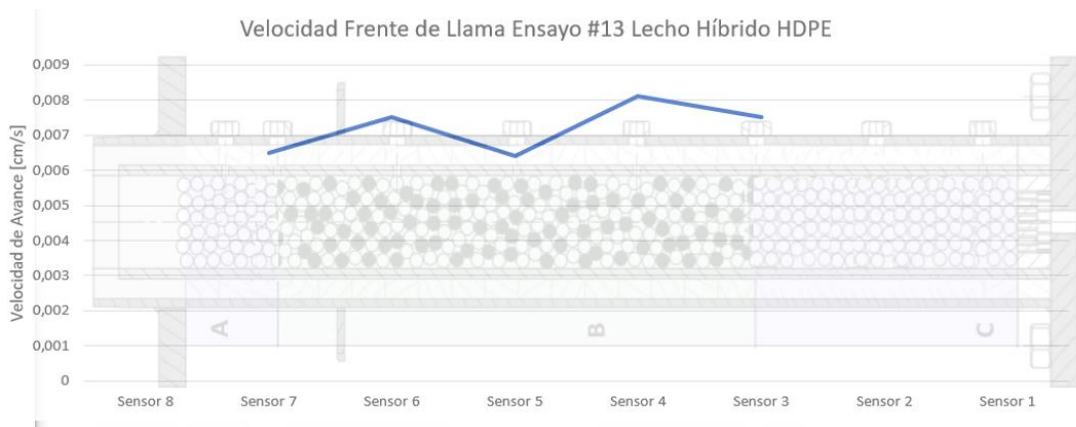


Gráfico 26: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #13.

Al momento de retirar las esferas, se notó la presencia de ceniza negra, la cual fue imposible de recolectar. Una vez retiradas las esferas del interior del gasificador, se pudo observar un gran número de ellas, mayor al del ensayo anterior, adheridas a la pared del cilindro cerámico, como se observa en la figura X. Fueron retiradas de la misma manera que las esferas adheridas en el ensayo #12, y la composición de la masilla parecía ser la misma. El condensado acumulado fue masado, registrando una masa de 78 gramos.



Figura 50: Esferas pegadas en la pared del cilindro cerámico, luego de la gasificación de PET con rotación.

### 5.2.5 ENSAYO #14 LECHO HÍBRIDO MEZCLA DE RSU.

Para este ensayo, se utilizó la misma lógica que el ensayo de mezcla anterior (Ensayo #9). Se mantuvo la composición recomendada por la GIMEL, y se aplicó al nuevo espacio disponible para el lecho híbrido. Los volúmenes y las masas utilizadas se registran en la tabla 10. Los residuos fueron mezclados con un volumen igual de esferas, y distribuidos a lo largo de los termopares 3 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 6$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 2$  [mbar]. El gasificador fue tapado 1.260 [s] luego de iniciado el ensayo, en el momento en que la temperatura del termopar 8 comenzaba a crecer. Sin embargo, mientras la tapa era instalada, uno de los guantes del operador se vio atorado en los flanges del gasificador, por lo que el giro se detuvo bruscamente, hasta que el guante fuera retirado. El giro fue reanudado luego de 3600 [s]. La presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 10$  [mbar], mientras que la presión de gas sube a  $P_3 = 6$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 5$  [mbar]. La presión fue aumentando constantemente en todas las líneas, hasta alcanzar un máximo de  $P_2 = 14$  [mbar] en la línea de aire,  $P_3 = 9$  [mbar] en la línea de gas y  $P_s = 10$  [mbar] a la salida, luego de transcurridos 3.780 [s]. Luego de esto, la presión disminuyó en todas las líneas. Los últimos valores registrados fueron  $P_2 = 14$  mbar,  $P_3 = 9$  mbar y  $P_s = 10$  mbar, luego de 6.480 [s]. Se observaron filtraciones de gas en las termocuplas 6, 5 y 3, las cuales ocurrieron en el momento en que el frente de llama pasaba por la posición correspondiente a estos termopares. Se detuvo el giro a los 3.960 [s] y a los 5.340 [s], para reparar la conexión de los termopares 5 y 3 respectivamente.

Tabla 10: Composición de mezcla, en volumen y masa, utilizada en ensayo #14.

| <b>MATERIAL</b> | <b>%COMPOSICIÓN<br/>UTILIZADA</b> | <b>VOLUMEN (L)</b> | <b>MASA (GR.)</b> |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|
| Papel           | 37,1                              | 0,20               | 29                |
| Cartón          | 8,2                               | 0,05               | 6                 |
| HDPE            | 21,3                              | 0,12               | 39                |

|              |            |             |            |
|--------------|------------|-------------|------------|
| PET          | 21,3       | 0,12        | 24         |
| Algodón      | 12,1       | 0,06        | 10         |
| <b>Total</b> | <b>100</b> | <b>0,55</b> | <b>108</b> |

En el gráfico 27 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Las curvas 8, 7 y 6 tienen un desarrollo parejo, difiriendo solo en el máximo de temperatura alcanzado. Las curvas 5 y 4 muestran un comportamiento inusual, sobre todo en la parte final del crecimiento, en donde la temperatura oscila por un amplio lapsus de tiempo, cercano a los 500 [s]. Se puede ver un salto brusco de temperatura en los termopares 5 y 3, el cual es causado por el error en la conexión de sus respectivas termocuplas. En general, las temperaturas alcanzadas fueron bajas, logrando solo 2 termopares dentro del lecho híbrido superar los 700 [°C], correspondientes al inicio (termopar 7) y final (termopar 3) de este. El termopar 6 alcanzó los 680 [°C], mientras que los termopares 4 y 5 se mantuvieron bajo los 600 [°C]. El peak fue logrado por el termopar 3, alcanzando los 869 [°C]. La temperatura de salida se mantiene entre los 250 [°C] y los 350 [°C], pudiéndose observar su perfil en el gráfico 28. El frente de llama demora cerca de 1.800 [s] en alcanzar el termopar 8, y tuvo un promedio de avance de 0,0110 [cm/s] en el lecho híbrido. La velocidad de avance tuvo una variación considerable en la parte final del lecho híbrido, aumentando en un 320% entre el termopar 5 y 4, y disminuyendo en un 226 % entre el termopar 4 y 3. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico 29. En total, el ensayo demoró 6.720 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama llegó al termopar 3.

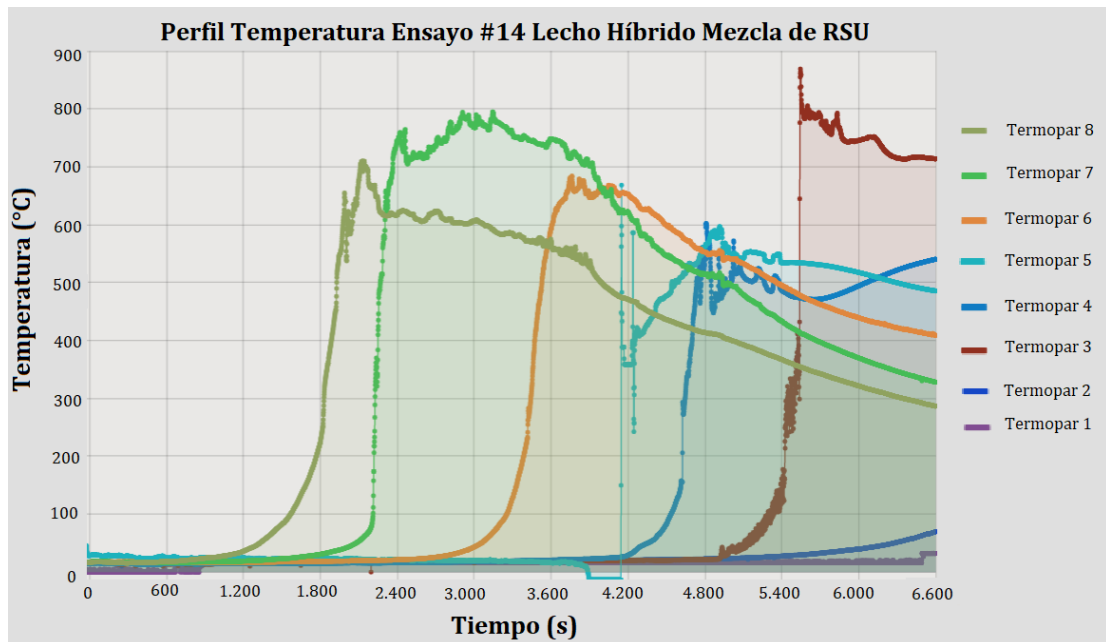


Gráfico 27: Temperatura vs tiempo ensayo #14.

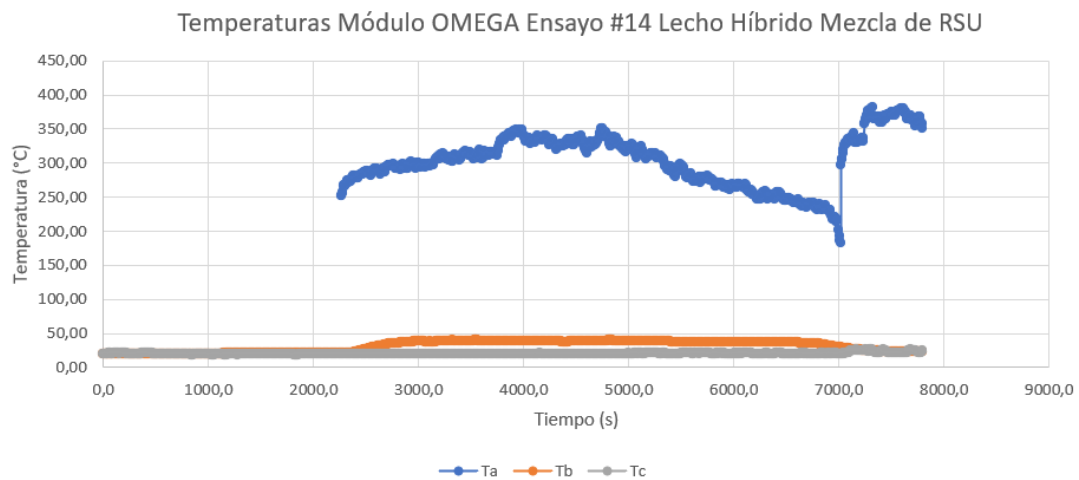


Gráfico 28: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #14.

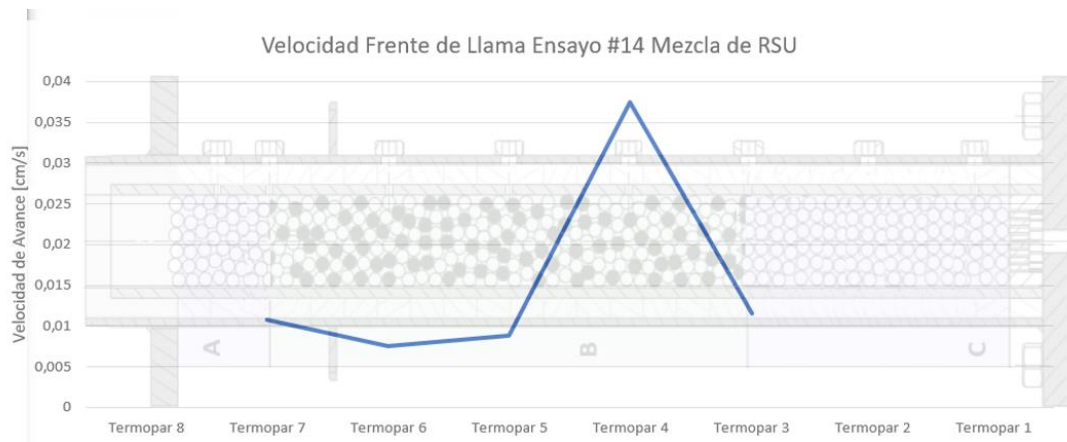


Gráfico 29: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #14.

Al momento de retirar las esferas, se encontraron pequeñas cantidades de ceniza café, y una cantidad menor de esferas cubiertas por la masilla café presente en los ensayos de plástico anteriores. Se sigue acumulando la misma cantidad de condensado en el frasco de recolección, el cual no fue masado.

#### 5.2.6 ENSAYO #15 LECHO INERTE.

Los siguientes 4 ensayos tenían como objetivo original caracterizar los gases productos generados por la gasificación de los residuos, por lo que se mantienen los mismos parámetros usados en los ensayos anteriores (#10, #12, #13 y #14). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las muestras obtenidas no pudieron ser analizadas de manera correctas, por lo que se utilizó esta tanda de ensayos para contrastar lo obtenido en los ensayos #10, #12, #13 y #14. El ensayo #15 consiste en un ensayo de lecho inerte, para caracterizar la línea base, utilizando la sonda TESTO 350 para medición de emisiones en tiempo real, y se retiraron muestras para análisis de cromatografía. Además, se cambiaron las conexiones de gas, reemplazando la cañería de cobre por una manguera para gas.

Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. El gasificador fue tapado 600 [s] luego de iniciado el ensayo, en el momento en que el termopar 8 comenzaba a elevar

su temperatura. La presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 13$  [mbar], mientras que la presión de gas se mantuvo en  $P_3 = 0$  [mbar]. Luego de tapado, la presión se mantuvo constante en todas las líneas. En el segundo 880 [s] se instala la sonda TESTO 350 en el ducto de escape. Se extrajeron 2 muestras para cromatografía, una a los 3.120 (s) y la otra a los 7.440 (s).

En el gráfico N° 30 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Todas las curvas siguen la misma tendencia, diferenciándose solamente en las temperaturas máximas alcanzadas, superando todas los 700 [°C]. El peak máximo de temperatura fue de 896 [°C], alcanzado por el termopar 5. La temperatura de salida registrada en el momento de tapar el gasificador fue de 300 [°C], la cual tuvo un leve ascenso, para posteriormente descender de manera constante durante todo el ensayo, hasta alcanzar los 200 [°C]. El perfil completo se observa en el gráfico N°31. El frente de llama demora cerca de 2.000 [s] en alcanzar el termopar 8, y tuvo un promedio de avance de 0,0044 [cm/s]. El avance fue parejo en todo momento, teniendo una variación máxima de velocidad de tan solo un 10%. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico N°32. En total, el ensayo demoró 11.040 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama llegó al termopar 3.

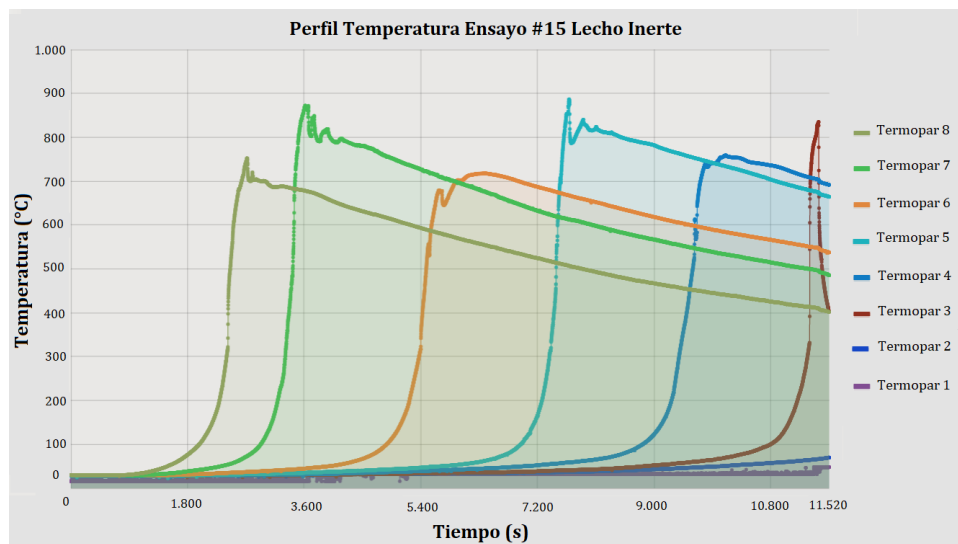


Gráfico 30: Temperatura vs tiempo ensayo #15.

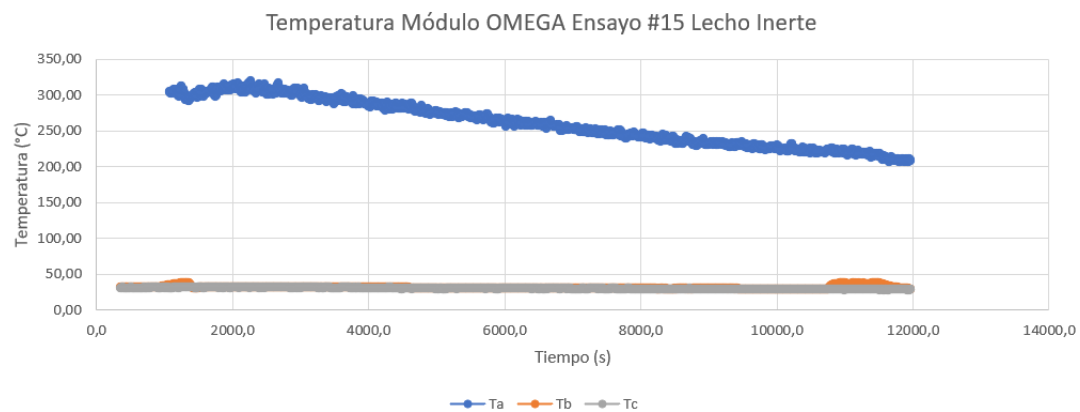


Gráfico 31: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #15.

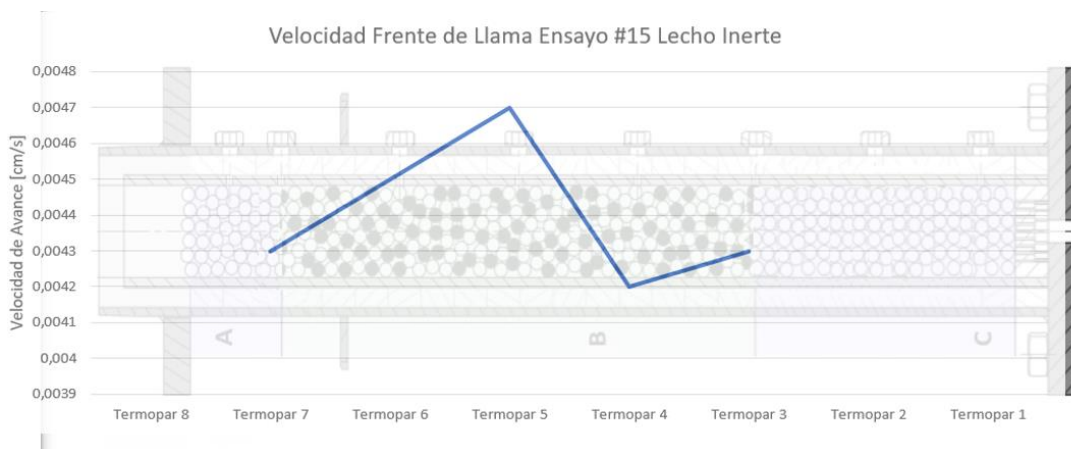


Gráfico 32: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #15.

### 5.2.7 ENSAYO #16 LECHO HÍBRIDO PET.

Para este ensayo, se utilizaron 110 gramos de PET triturado. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 3 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P2 = 3$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P3 = 0$  [mbar]. El gasificador fue tapado 660 [s] luego de iniciado el ensayo, en el momento en que el termopar 8 elevaba su temperatura. La presión de

la línea de aire subió a  $P_2 = 9$  [mbar], mientras que la presión de gas se mantuvo en  $P_3 = 0$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 9$  [mbar]. La presión en la línea de aire y la salida del gas aumentó durante casi todo el ensayo, alcanzando un último registro de  $P_2 = 17$  [mbar] y  $P_s = 16$  [mbar] a los 4.320 [s]. Se extrajeron 2 muestras para cromatografía, la primera a los 2.700 [s], y la segunda a los 4.080 [s]. Se observaron filtraciones a través del termopar 3, el termopar de salida, y de la tapa del gasificador.

En el gráfico N°33 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Se observa un comportamiento parejo, demorándose todos los termopares tiempos similares en desarrollarse. Además, todos los termopares dentro del lecho híbrido alcanzaron peaks cercanos a los 700 [°C]. El peak de temperatura del ensayo fue de 880 [°C], alcanzado por el termopar 8. La temperatura de salida se mantuvo entre los 200 [°C] y 300 [°C], y su perfil se puede observar en el gráfico N°34. El frente de llama demoró cerca de 1.500 [s] en alcanzar el termopar 8, y tuvo un promedio de avance de 0,0100 [cm/s] en el lecho híbrido. Su comportamiento relativamente estable, variando un máximo de un 26% dentro del lecho híbrido. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico N°35. En total, el ensayo duró 6.360 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama llegó al termopar 3.

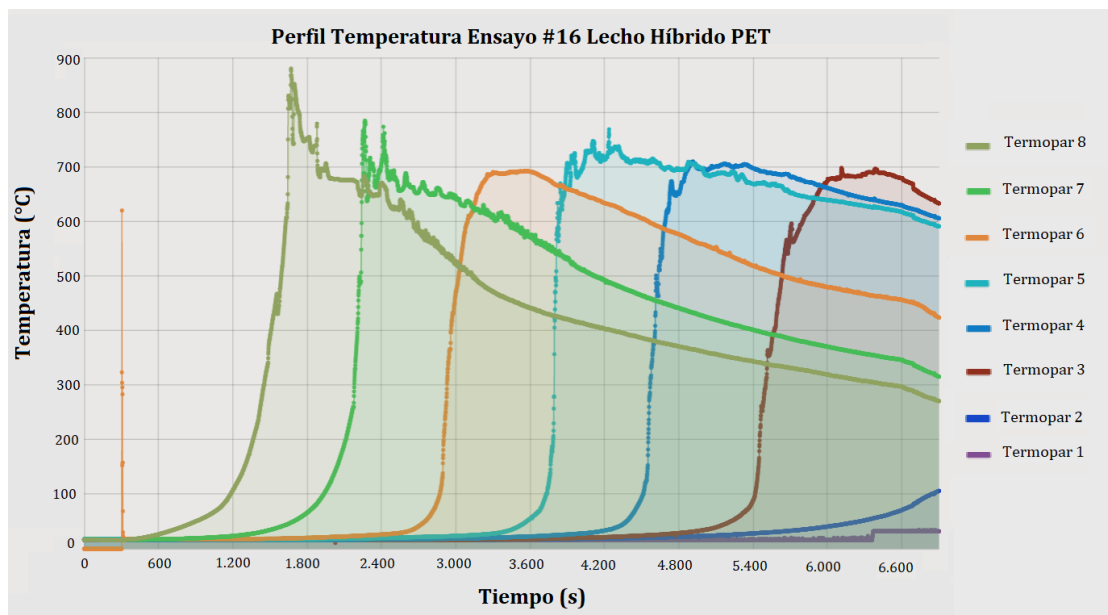


Gráfico 33: Temperatura vs tiempo ensayo #16.

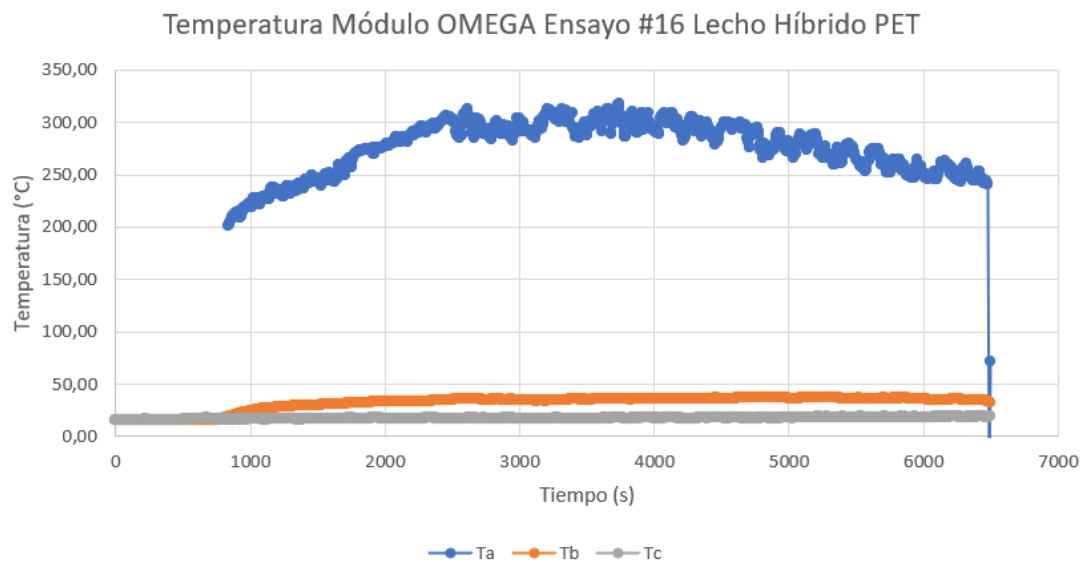


Gráfico 34: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #16.

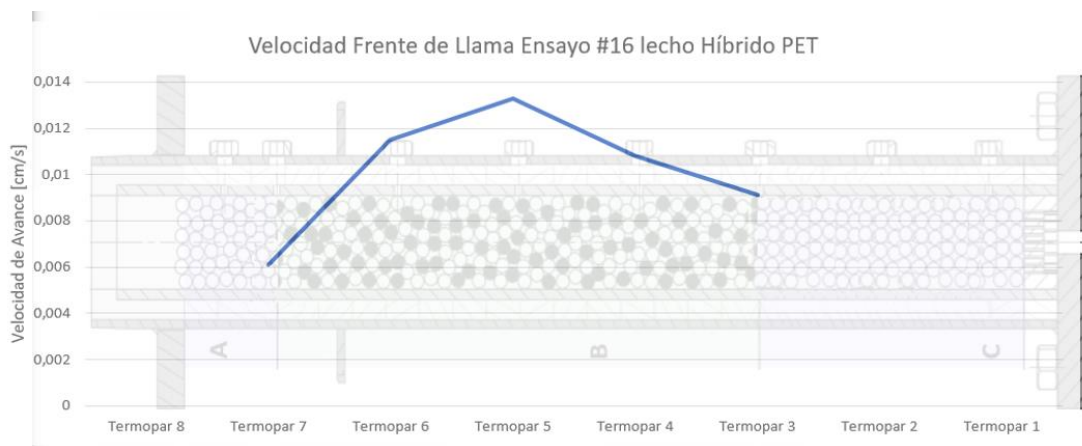


Gráfico 35: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #16.

Los desechos generados fueron idénticos al del ensayo #12, ceniza negra y una pequeña cantidad de esferas adheridas a las paredes del gasificador, además del condensado acumulado en el frasco de recolección del tubo de escape.

#### 5.2.8 ENSAYO #17 MEZCLA DE RSU.

Para este ensayo, se utilizó la misma lógica que en los ensayo de mezcla anteriores (Ensayo #9). Se mantuvo la composición recomendada por la GIMEL, y se aplicó al nuevo espacio disponible para el lecho híbrido. Los volúmenes y las masas utilizadas se registran en la tabla 11. Los residuos fueron mezclados con un volumen igual de esferas, y distribuidos a lo largo de los termopares 3 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 6$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. El gasificador fue tapado 540 [s] luego de iniciado el ensayo, en el momento en que la temperatura del termopar 8 comenzaba a crecer. La presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 11$  [mbar], mientras que la presión de gas se mantuvo en  $P_3 = 0$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 8$  [mbar]. Transcurridos 300 [s] la presión se estabilizó en  $P_2 = 17$  [mbar] en la línea de aire,  $P_3 = 0$  [mbar] en la línea de gas y  $P_s = 15$  [mbar] a la salida. Se extrajeron 2 muestras para cromatografía, la primera a los 2.640 [s], mientras que la segunda fue retirada a los 4.500 [s]. Se observaron filtraciones de gas en la termocupla 8.

Tabla 11: Composición usada, en volumen y masa, en ensayo #17.

| <b>MATERIAL</b> | <b>%COMPOSICIÓN<br/>UTILIZADA</b> | <b>VOLUMEN (L)</b> | <b>MASA (GR.)</b> |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|
| Papel           | 37,1                              | 0,20               | 29                |
| Cartón          | 8,2                               | 0,05               | 6                 |
| HDPE            | 21,3                              | 0,12               | 39                |
| PET             | 21,3                              | 0,12               | 24                |
| Algodón         | 12,1                              | 0,06               | 10                |
| <b>Total</b>    | <b>100</b>                        | <b>0,55</b>        | <b>108</b>        |

En el gráfico N° 36 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Las curvas siguen una tendencia normal, a excepción de la curva 4, que disminuyó su pendiente de crecimiento al llegar a los 400 [°C], siendo incluso sobrepasada por la curva del termopar 3, que alcanzó un peak en un tiempo menor. En general, las temperaturas alcanzadas fueron bajas, logrando solo 3 termopares dentro del lecho híbrido superar levemente los 700 [°C] (termopar 7,6 y 3). El termopar 5 alcanzó los 630 [°C], mientras que los termopares 8 y 4 se mantuvieron bajo los 600 [°C]. El peak fue logrado por el termopar 3, alcanzando los 715 [°C]. La temperatura de salida se mantiene entre los 250 [°C] y los 380 [°C], pudiéndose observar su perfil en el gráfico N°37. El frente de llama demora cerca de 2.000 [s] en alcanzar el termopar 8, y tuvo un promedio de avance de 0,0110 [cm/s] en el lecho híbrido. La velocidad de avance tuvo una variación considerable entre el termopar 5 y 4, aumentando en un 102 %. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico N°38. En total, el ensayo demoró 6.180 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama comenzó a llegar al termopar 2.

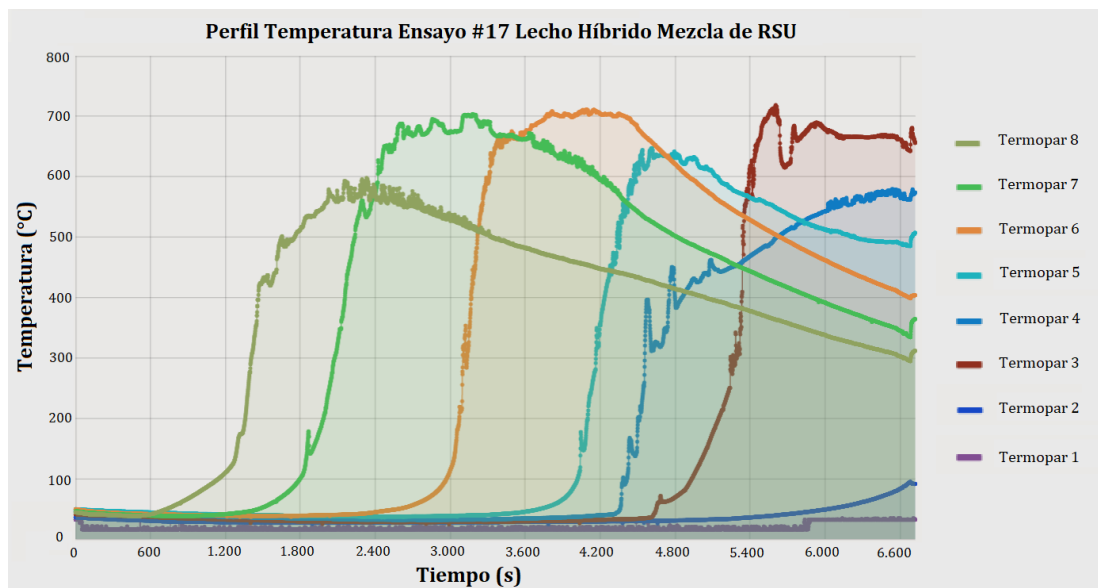


Gráfico 36: Temperatura vs tiempo ensayo #17.

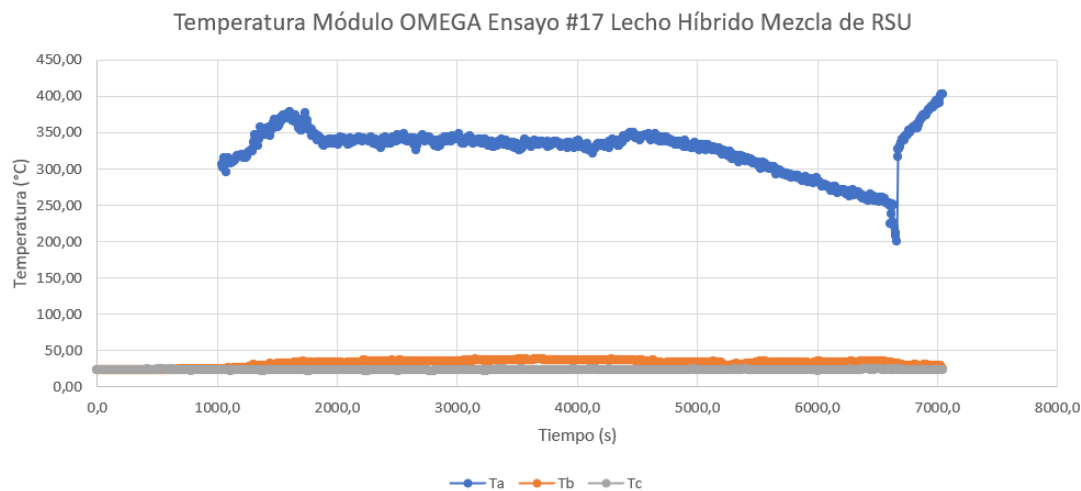


Gráfico 37: Temperatura vs tiempo Módulo OMEGA ensayo #17.

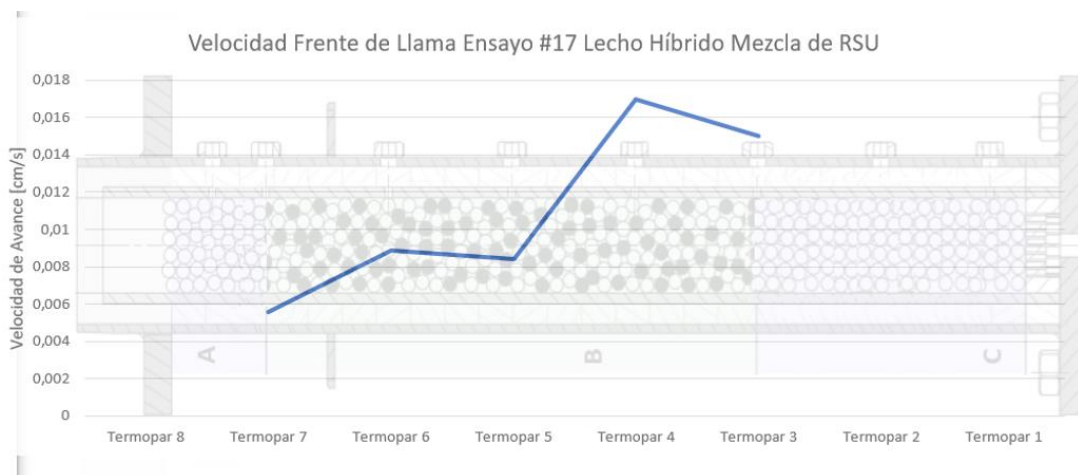


Gráfico 38: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #17.

Los desechos de gasificación fueron idénticos al ensayo #14, cenizas café y una pequeña cantidad de condensado acumulado en el frasco ubicado debajo del tubo de escape.

### 5.2.9 ENSAYO #18 LECHO HÍBRIDO HDPE.

Para este ensayo, se utilizaron 200 gramos de HDPE triturado. Se mezclaron volúmenes iguales de esferas y residuos, y se distribuyeron entre el termopar 3 y 7. Al momento de iniciar el ensayo, la presión de la línea de aire fue de  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. El gasificador fue tapado 600 [s] luego de iniciado el ensayo, en el momento en que el termopar 8 elevaba su temperatura. La presión de la línea de aire subió a  $P_2 = 13$  [mbar], mientras que la presión de gas se mantuvo en  $P_3 = 0$  [mbar]. La presión de salida registrada fue de  $P_s = 12$  [mbar]. La presión en la línea de aire y la salida del gas aumentó durante gran parte del ensayo, alcanzando un último registro de  $P_2 = 15$  [mbar] y  $P_s = 15$  [mbar] a los 3.540 [s]. Se extrajeron 2 muestras para cromatografía, la primera a los 3.240 [s], y la segunda a los 5.460 [s]. No se observaron filtraciones.

En el gráfico N°39 se observa el perfil de temperaturas en el tiempo, de cada una de las termocuplas ubicadas a lo largo del gasificador. Se observa un comportamiento

parejo, demorándose todos los termopares tiempos similares en desarrollarse. Las curvas 7 y 5 crecen bruscamente, para luego descender y continuar creciendo de manera más lenta. Todos los termopares superaron los 700 [°C], a excepción del termopar 6, que alcanzó los 694 [°C]. El peak de temperatura del ensayo fue de 856 [°C], alcanzado por el termopar 5. La temperatura de salida se mantuvo entre los 170 [°C] y 280 [°C], y su perfil se puede observar en el gráfico N°40. El frente de llama demoro cerca de 2.000 [s] en alcanzar el termopar 8, y tuvo un promedio de avance de 0,0070 [cm/s] en el lecho híbrido. Su comportamiento fue parejo, variando un máximo de un 36% dentro del lecho híbrido. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico N°41. En total, el ensayo duro 8.160 [s]. Se apagó la llama una vez que el frente de llama llegó al termopar 3.

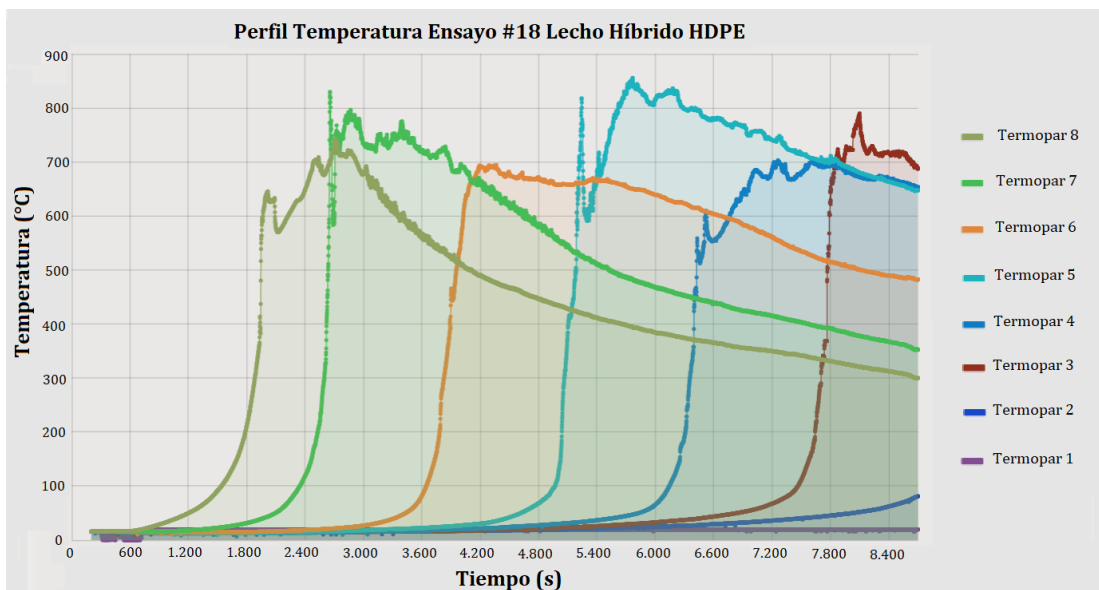


Gráfico 39: Temperatura vs tiempo ensayo #18.

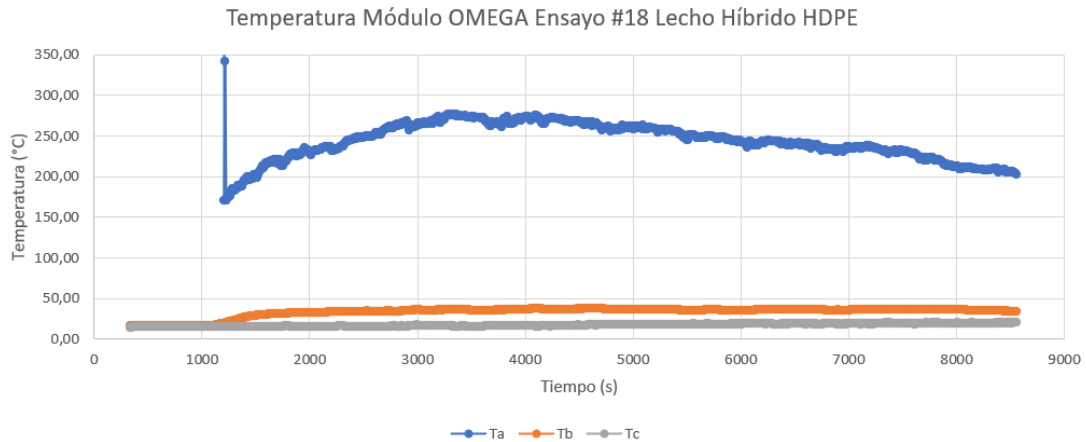


Gráfico 40: Temperatura vs tiempo módulo OMEGA ensayo #18.

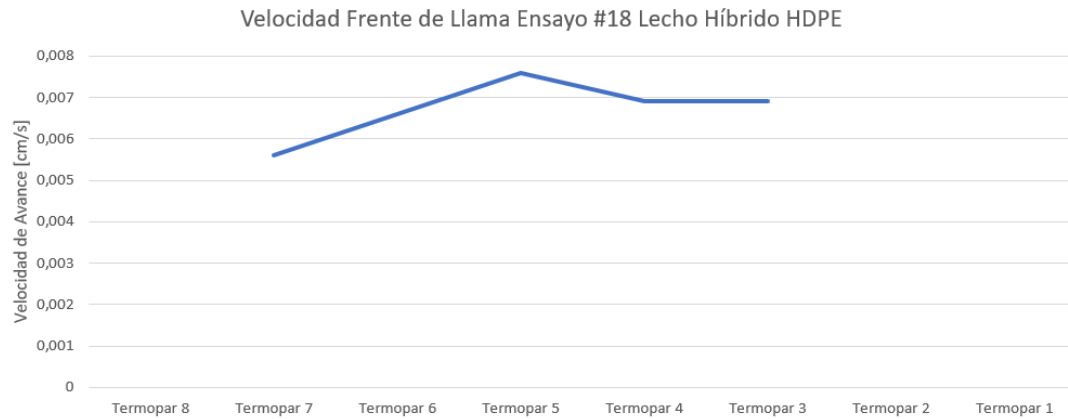


Gráfico 41: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #18.

### 5.2.10 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE ENSAYOS CON ROTACIÓN.

El efecto de la rotación en la gasificación se puede analizar en base al cambio que tienen las temperaturas alcanzadas, el desarrollo del frente de llama, y las presiones registradas entre un ensayo y otro. Por temas de tiempo, solo fue posible hacer un contraste de ensayos con y sin rotación utilizando como combustible sólido el HDPE, PET, y una mezcla de RSU.

En cuanto a las temperaturas, se observa que la tendencia general fue que las temperaturas máximas alcanzadas por cada termopar aumentasen al momento de

aplicar la rotación. Sin embargo, la temperatura promedio tendió a bajar. Se puede observar en las curvas enseñadas en los gráficos 18,22, 24 y 27, que al aplicar la rotación, la curva de cada termopar, una vez alcanzado el máximo de temperatura, tiene una pendiente de enfriamiento mayor a la de un ensayo sin rotación. Esto debido a que la rotación aumenta el coeficiente de convección entre el gasificador y el ambiente, lo cual hace que, a pesar de que las temperaturas máximas alcanzadas sean mayores en los ensayos con rotación, las temperaturas promedio sean menores en estos. Se puede observar en las tablas 12, 13 y 14, las temperaturas máximas y promedio alcanzadas por cada termopar, para cada uno de los ensayos de HDPE, PET y mezcla, con y sin rotación. Para los ensayos de HDPE y PET, se observan curvas de temperatura más parejas y homogéneas en los ensayos con rotación, a diferencia de los ensayos sin rotación, en donde cada curva lograba un comportamiento propio. Un ejemplo claro es al gasificar PET, en donde se observó que, sin rotación, se obtuvieron perfiles térmicos que no se repitieron en ningún ensayo, en donde incluso el termopar 3 se desarrolló antes de que el termopar 4 lo hiciera. Sin embargo, en los ensayos con mezcla y rotación, no se observó una completa homogeneidad de los perfiles térmicos. Al comienzo del lecho híbrido, entre los termopares 7 y 5 para el ensayo #14, y entre el termopar 7 y 4 para el ensayo #17 (ambos con rotación) los perfiles se desarrollaron de manera pareja, difiriendo solo en las temperaturas máximas alcanzadas. Entre los termopares 5 y 3 para el ensayo #14, y entre el termopar 4 y 3 para el ensayo #17, en la última parte del lecho híbrido, es donde los perfiles térmicos mostraron un comportamiento inusual, con crecimiento de temperaturas inestables y de mayor pendiente.

Tabla 12: Temperaturas máximas y promedio para cada termopar, durante ensayos de gasificación de HDPE.

|                                | <b>Temperatura</b>   | <b>T8</b> | <b>T7</b> | <b>T6</b> | <b>T5</b> | <b>T4</b> | <b>T3</b> |
|--------------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Ensayo#4 HDPE<br/>0 RPM</b> | <b>Promedio [°C]</b> | 482       | 446       | 423       | 360       | 272       | 191       |
|                                | <b>Máxima [°C]</b>   | 740       | 700       | 724       | 752       | 888       | 706       |
|                                | <b>Promedio [°C]</b> | 410       | 383       | 356       | 316       | 223       | 129       |

|                                         |                      |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Ensayo#13</b><br><b>HDPE 15 RPM</b>  | <b>Máxima [°C]</b>   | 795 | 753 | 714 | 770 | 761 | 832 |
| <b>Ensayo #18</b><br><b>HDPE 15 RPM</b> | <b>Promedio [°C]</b> | 376 | 392 | 358 | 337 | 214 | 122 |
|                                         | <b>Máxima [°C]</b>   | 742 | 830 | 694 | 856 | 703 | 790 |

Tabla 13: Temperaturas máximas y promedio para cada termopar, durante ensayos de gasificación de PET.

|                                        | <b>Temperatura</b>   | <b>T8</b> | <b>T7</b> | <b>T6</b> | <b>T5</b> | <b>T4</b> | <b>T3</b> |
|----------------------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Ensayo #5</b><br><b>PET 0 RPM</b>   | <b>Promedio [°C]</b> | 389       | 349       | 269       | 219       | 203       | 286       |
|                                        | <b>Máxima [°C]</b>   | 635       | 596       | 597       | 441       | 478       | 676       |
| <b>Ensayo#12</b><br><b>PET 15 RPM</b>  | <b>Promedio [°C]</b> | 388       | 338       | 337       | 287       | 195       | 126       |
|                                        | <b>Máxima [°C]</b>   | 819       | 668       | 728       | 832       | 701       | 800       |
| <b>Ensayo #16</b><br><b>PET 15 RPM</b> | <b>Promedio [°C]</b> | 360       | 345       | 336       | 325       | 251       | 167       |
|                                        | <b>Máxima [°C]</b>   | 880       | 785       | 692       | 769       | 710       | 698       |

Tabla 14: Temperaturas máximas y promedio para cada termopar, durante ensayos de gasificación de mezcla.

|                                           | <b>Temperatura</b>   | <b>T8</b> | <b>T7</b> | <b>T6</b> | <b>T5</b> | <b>T4</b> | <b>T3</b> |
|-------------------------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Ensayo #9</b><br><b>Mezcla 0 RPM</b>   | <b>Promedio [°C]</b> | 443       | 363       | 309       | 318       | 244       | 191       |
|                                           | <b>Máxima [°C]</b>   | 769       | 731       | 522       | 782       | 623       | 648       |
| <b>Ensayo#14</b><br><b>Mezcla15 RPM</b>   | <b>Promedio [°C]</b> | 349       | 380       | 282       | 226       | 195       | 191       |
|                                           | <b>Máxima [°C]</b>   | 710       | 795       | 680       | 600       | 602       | 869       |
| <b>Ensayo #17</b><br><b>Mezcla 15 RPM</b> | <b>Promedio [°C]</b> | 364       | 386       | 334       | 259       | 211       | 189       |
|                                           | <b>Máxima [°C]</b>   | 598       | 704       | 712       | 648       | 610       | 719       |

Para la velocidad de avance del frente de llama, cada uno de los residuos tuvo resultados distintos al aplicar la rotación. El avance del frente de llama en el ensayo sin rotación de HDPE fue relativamente parejo, por lo que no hubo un cambio considerable al momento de gasificar el material con rotación. Los perfiles de velocidad de avance

para todos los ensayos de HDPE se enseñan en el gráfico 42. Para el caso del PET, el cambio fue importante. En el ensayo sin rotación se observó un comportamiento inusual del frente de llama con subidas bruscas de velocidad, y con un grosor excesivo, logrando que se desarrollara antes el termopar 3 que el termopar 4. Al gasificar este material con rotación, la velocidad se mantuvo relativamente estable dentro del lecho híbrido, obteniéndose perfiles parejos en los ensayos #12 y #16, los cuales se muestran en el gráfico 43. Para el ensayo de mezcla, los resultados obtenidos no son concluyentes ya que, para los 2 ensayos con rotación realizados, los resultados fueron completamente opuestos. Comparando con el ensayo sin rotación, el ensayo #12 muestra un aumento considerable de velocidad dentro del lecho híbrido, mientras que en el ensayo #17, el comportamiento es más parejo, manteniendo la velocidad una mayor estabilidad dentro del lecho híbrido, con variaciones menores a las obtenidas en el ensayo sin rotación. La tabla 15 muestra un resumen de las velocidades de frente de llama obtenidas en cada uno de los ensayos a comparar.

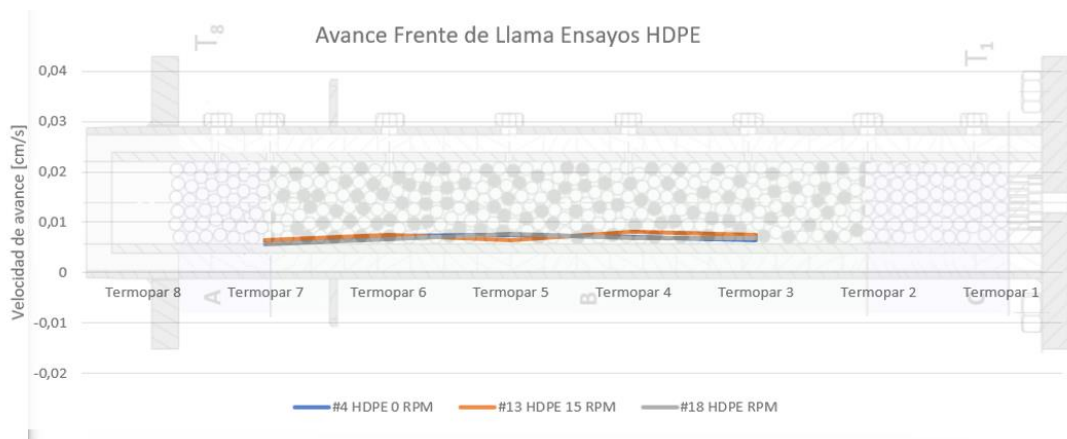


Gráfico 42: Avance frente de llama para ensayos de gasificación de HDPE.

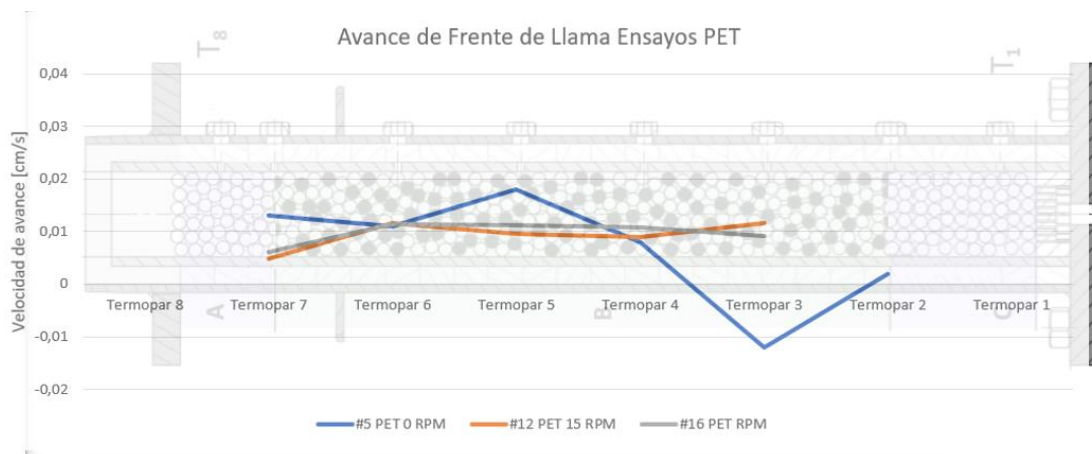


Gráfico 43: Avance frente de llama para ensayos de gasificación de PET.

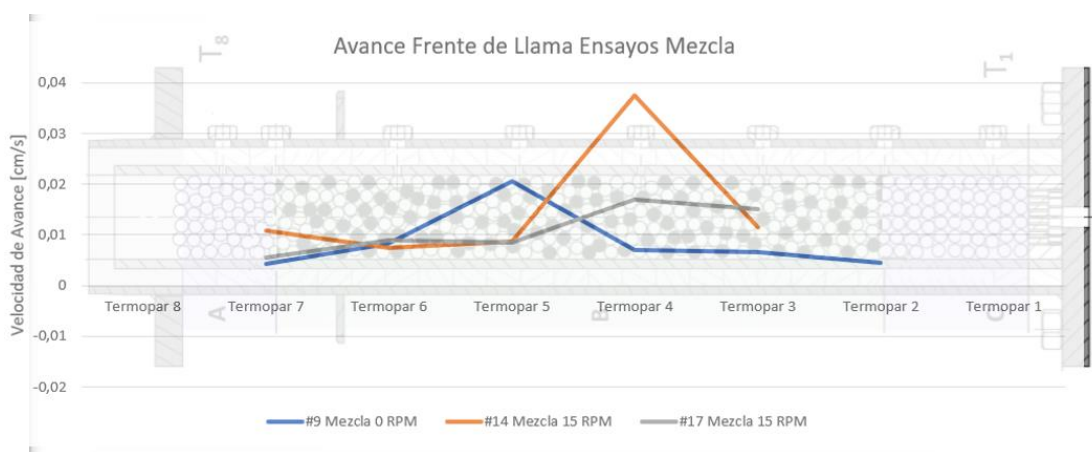


Gráfico 44: Avance frente de llama para ensayos de gasificación de mezcla de RSU.

Tabla 15: Velocidades alcanzadas por el frente de llama entre cada termopar para cada uno de los ensayos, y sus respectivos promedios dentro del lecho híbrido.

|                              | $V_{T7}$<br>[cm/s] | $V_{T6}$<br>[cm/s] | $V_{T5}$<br>[cm/s] | $V_{T4}$<br>[cm/s] | $V_{T3}$<br>[cm/s] | $\bar{V}_{LH}$<br>[cm/s] |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| <b>Ensayo#4 HDPE 0 RPM</b>   | 0,0063             | 0,0073             | 0,0074             | 0,0070             | 0,0064             | 0,0070                   |
| <b>Ensayo#13 HDPE 15 RPM</b> | 0,0065             | 0,0075             | 0,0064             | 0,0081             | 0,0075             | 0,0073                   |

|                                |        |        |        |        |         |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| <b>Ensayo#18 HDPE 15 RPM</b>   | 0,0056 | 0,0066 | 0,0076 | 0,0069 | 0,0069  | 0,0070 |
| <b>Ensayo#5 PET 0 RPM</b>      | 0,0130 | 0,0110 | 0,0180 | 0,0080 | -0,0120 | 0,0110 |
| <b>Ensayo#12 PET 15 RPM</b>    | 0,0049 | 0,0117 | 0,0095 | 0,0090 | 0,0116  | 0,0100 |
| <b>Ensayo#16 PET 15 RPM</b>    | 0,0061 | 0,0115 | 0,0113 | 0,0108 | 0,0091  | 0,0100 |
| <b>Ensayo#9 Mezcla 0 RPM</b>   | 0,0043 | 0,0082 | 0,0205 | 0,0071 | 0,0065  | 0,0073 |
| <b>Ensayo#14 Mezcla 15 RPM</b> | 0,0108 | 0,0075 | 0,0088 | 0,0375 | 0,0115  | 0,0110 |
| <b>Ensayo#17 Mezcla 15 RPM</b> | 0,0056 | 0,0089 | 0,0084 | 0,0170 | 0,0150  | 0,0110 |

Con respecto a las presiones, el aumento de esta era más lento al momento de aplicar la rotación, logrando estabilizarse en algún punto del ensayo, el cual varió entre cada experiencia. Una vez gasificado todo el residuo cargado, la presión disminuía a los valores iniciales del ensayo.

Durante los últimos 3 ensayos, se registró la potencia requerida por el sistema de transmisión, a través de la incorporación de un Wattmetro al tablero electrónico. En promedio, la potencia requerida por el sistema de transmisión fue de 52,8 [W], y considerando un tiempo promedio de rotación de 6.300 [s], se registra un consumo promedio de 0,09 [kWh] por ensayo. De la misma forma, se contabilizó el tiempo en el cual el compresor funcionaba durante todos los ensayos con rotación, teniendo un promedio de funcionamiento de 1.720 [s]. Considerando que el compresor tiene una potencia de 3 [HP], equivalente a 2,2 [kW], se tiene un consumo promedio por ensayo de 1,05 [kWh]. La trituración también fue considerada para el cálculo del consumo energético, cronometrando el tiempo en que se demoraban en triturarse el HDPE y el PET, y pesando el residuo triturado obtenido. Se calculo que la trituradora puede

triturar HDPE a una razón de 0,76 [gr/s], mientras que el PET lo hace a una razón de 0,28 [gr/s]. Considerando que la potencia del motor de la trituradora es de 7,5 [kW], el consumo por residuo triturado es de 2,74 [Wh/gr] para el HDPE, y de 7,44 [Wh/gr] para el PET. Sabiendo que para un ensayo de gasificación de HDPE se utilizan 200 [gr] de este material, se tiene un consumo de energía por trituración por ensayo de HDPE de 0,548 [kWh]. Para el caso del PET, se utilizan 110 [gr] para un ensayo con rotación, por lo que la energía necesaria para triturar esta cantidad de material es de 0,818 [kWh]. De esta manera, la energía consumida por un ensayo de gasificación promedio de HDPE es de 1,69 [kWh], mientras que, para un ensayo de PET, la energía consumida es de 1,96 [kWh].

## **6. ACOUPLE DE GASIFICADOR ROTATORIO A MÓDULO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.**

Para el acondicionamiento del gas y posterior generación eléctrica, se cuenta con una unidad modular de generación, la cual es parte de un gasificador de biomasa, denominado GEK Power Pallet (a partir de ahora, unidad GEK). La unidad GEK permite realizar el proceso completo de gasificación, y posterior generación de energía.

### **6.1 UNIDAD GEK.**

La unidad GEK, utilizando pellet de madera como combustible, se encarga de generar Syngas, tratarlo e inyectarlo a un motor de combustión, para la generación de energía eléctrica a través del acople a una unidad generadora. Los elementos participantes y sus respectivas funciones se presentan a continuación.

#### **6.1.1 TOLVA DE ALMACENAMIENTO.**

Consiste en un recipiente metálico de forma cilíndrica, de un volumen de 0,1 [ $m^3$ ], en el cual se almacena el combustible, asegurando una operación de 4 a 6 horas continuas.

El combustible sale por la parte inferior, y entra a un tornillo sin fin, el cual se encarga de dirigirlo hacia el gasificador.

#### **6.1.2 GASIFICADOR DE TIRO INVERTIDO.**

La gasificación es realizada en un gasificador de tiro invertido, cuyo funcionamiento general ha sido previamente explicado en el punto 3.2.2.2. Cuenta con 5 entradas de aire, y una pequeña antorcha que le da el encendido al gasificador, a través del uso de propano. Parte importante de este gasificador es la campana de reducción, la cual se encarga de controlar la velocidad del flujo, y por ende del tiempo de residencia de los gases en las distintas zonas del equipo. En la parte inferior, cuenta con un agitador, el cual permite que las cenizas y otros desechos producidos en el proceso, sean retirados del interior del gasificador. Al salir el Syngas del gasificador, este pasa por el tornillo sin fin, con el objetivo de precalentar el combustible previo a la gasificación.

#### **6.1.3 CICLÓN SEPARADOR.**

Luego de transferir calor al combustible a través del tornillo sin fin, el Syngas pasa por el ciclón, el cual se encarga de decantar el material particulado. Tanto el material particulado como algún condensado caen en una trampa ubicada en la parte inferior del ciclón.

#### **6.1.4 FILTRO SECO.**

Posterior al ciclón, el Syngas entra al filtro seco, el cual consiste en un recipiente cilíndrico, de un volumen de  $0,06 [m^3]$ , que esta lleno de pellet de madera en su interior, que se encarga de retener la humedad del Syngas, material particulado que no fue separado en el ciclón, e incluso alquitranes.

#### **6.1.5 MOTOR DE COMBUSTION INTERNA Y GENERADOR ELÉCTRICO.**

Ya condicionado el Syngas, este es inyectado a un MCI. El motor utilizado es un motor KUBOTA DG 9782, de 10 [kW] de potencia de generación, el cual está diseñado para

funcionar con gas natural. Este motor esta acoplado a un generador eléctrico Meccalte, el cual se encarga de generar electricidad, entregando una salida de corriente trifásica. La unidad cuenta con una extensión de corriente, la cual se puede conectar a alguna resistencia, para ocupar la energía generada de forma inmediata.

#### **6.1.6 SENSORES Y CONTROL.**

Parte importante de la operación es el sistema de control. Todos los equipos y etapas mencionadas anteriormente cuentan con sensores, los cuales permiten, de manera autónoma, dar el paso del Syngas desde una etapa a otra. Partiendo por la alimentación, la cual es regulada por un sensor de nivel presente en el gasificador, que regula el funcionamiento del tornillo sin fin. Dentro del gasificador, existen 2 termocuplas que monitorean constantemente la temperatura. Si la temperatura de gasificación no es óptima (bajo los 750 [°C]), el gas es dirigido a la chimenea, a través de la activación de 3 ventiladores, en donde se produce la ignición de este, para ser liberado al ambiente. En el caso contrario, en donde la temperatura es mayor a los 750 [°C], el Syngas sigue el camino normal hacia la unidad generadora. Para un correcto funcionamiento del motor, la unidad cuenta con un tubo Venturi de admisión de aire, el cual regula la entrada de aire en base a los requerimientos que tenga el motor.

Para la regulación y calibración de todos los sensores nombrados anteriormente, la unidad GEK cuenta con un panel de control, el cual centraliza todas las funciones de la unidad.



Figura 51: Desglose de partes de unidad GEK

## 6.2 ACOUPLE GASIFICADOR PROTOTIPO A UNIDAD GEK.

Se realizaron 3 ensayos acoplando el gasificador a la unidad GEK, en los cuales se analizó el comportamiento de ambos equipos. La conexión se realizó a través del flexible anaconda de alta temperatura, el cual dirigía los gases desde la junta rotatoria de salida del gasificador, a una válvula de bola ubicada entre el separador ciclónico y el filtro seco. La selección de esta entrada se debe a que el Syngas producido por el gasificador tiene la opción de ser dirigido por dos caminos. Al accionarse el motor, la succión producida hace pasar el Syngas por el filtro seco, para luego ser inyectado al motor. En caso de no estar en condiciones de ser inyectado al motor, se accionan los ventiladores, los cuales dirigen el Syngas hacia la antorcha, para que sea quemado antes de liberarse al ambiente.

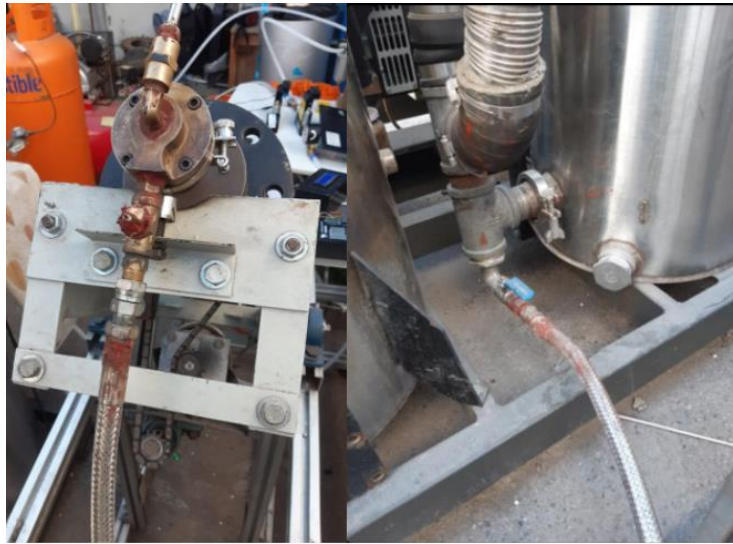


Figura 52: Acople de gasificador a unidad GEK.

### 6.2.1 ACONDICIONAMIENTO UNIDAD GEK.

Previo al acople del gasificador a la unidad GEK, se hicieron una serie de pruebas de funcionamiento del motor Kubota y la unidad generadora, para familiarizarse con el equipo. Para esto, se hizo funcionar el motor con un cilindro de 45 [kg] de GLP, mismo que se utilizaba para los ensayos de gasificación. El GLP era inyectado a través de una válvula de bola ubicada a la salida del filtro seco. Durante los primeros intentos, se notó que había una serie de válvulas que no permitían una correcta regulación de aire a la entrada del motor, por lo que este no lograba tener un correcto arranque. Se cerraron todas las entradas, dejando la regulación de aire solo al tubo Venturi de admisión. Luego de estos arreglos, el motor lograba arrancar, pero luego de 15-30 [s] operando, se apagaba, ya que el combustible entregado era demasiado para el aire ingresado por el tubo Venturi. Se procedió a cerrar parcialmente las válvulas de salida de GLP del cilindro y de entrada a la unidad GEK, hasta encontrar un punto de operación óptima del motor, en donde podía funcionar indefinidamente sin detenerse. Se conectó la unidad de generación a un motor eléctrico, el cual comenzaba a funcionar, comprobando que la unidad GEK era capaz de generar electricidad. A pesar de lograr

el funcionamiento de la unidad, el juego de válvulas para lograr una inyección óptima de GLP no era suficiente para asegurar el funcionamiento ensayo tras ensayo, ya que la posición que debían tener las válvulas era difícil de determinar, y por ende de replicar. Es por esto que se decidió utilizar un controlador de flujo disponible en Artificio, el cual, a pesar de no encontrarse calibrado, serviría para tener un valor de referencia de la cantidad de GLP que se debía inyectar. Se conectó el cilindro de GLP al controlador de flujo, y este a la unidad GEK. Se abrieron las válvulas por completo, y se reguló la entrada de GLP solo con el regulador de flujo. Se logró un funcionamiento óptimo del motor con un flujo de  $30 \text{ [} \frac{\text{lt}}{\text{min}} \text{]}$ . Una vez estudiado el funcionamiento de la unidad GEK, se procede a acoplar el gasificador al GEK.

### **6.2.2 ENSAYO #1 ACOUPLE GASIFICADOR A GEK.**

En el primer ensayo de acople, se conectó el gasificador a la unidad GEK, con la intención de probar el funcionamiento de los ventiladores, y que el Syngas realmente fuera dirigido hacia la antorcha. Además, se buscaba estudiar como afectaba la succión al desarrollo de las temperaturas y el frente de llama. Durante este ensayo, no se inyectó el Syngas al motor KUBOTA.

Se cargo el gasificador con 200 gramos de HDPE, y se ejecutó el ensayo manteniendo los parámetros típicos:  $V_f = 40 \text{ [cm/s]}$ ,  $\Phi = 0,87 \text{ [-]}$  y  $15 \text{ [RPM]}$ . A los  $780 \text{ [s]}$  de iniciado el ensayo se acopla el gasificador a la unidad GEK, manteniendo los ventiladores a una potencia mínima. La presión registrada a los  $1.140 \text{ [s]}$  fue de  $P_2 = 7 \text{ [mbar]}$  para la línea de aire,  $P_3 = 0 \text{ [mbar]}$  para la línea de gas y  $P_s = 5 \text{ [mbar]}$  para la salida de los gases. A los  $1.800 \text{ [s]}$ , se cierra la válvula manual que permite el paso del gas a la chimenea, con el objetivo de ver si el Syngas se direccionaba hacia el motor, sin necesidad de que este estuviera funcionando y, por ende, succionando el Syngas. A través del calentamiento de las mangueras por las cuales pasaba el Syngas, se comprobó que, al no haber succión, este se dirigía hacia el tornillo sin fin, para luego entrar al gasificador de la unidad GEK. A los  $2.040 \text{ [s]}$  se abrió nueva la válvula de paso hacia la chimenea, manteniendo la succión a mínima potencia. A los  $2.820 \text{ [s]}$ , se aumenta al

máximo la potencia de los ventiladores. La presión en la línea de aire baja a  $P_2 = 5$  [mbar] y la presión de salida disminuye a  $P_s = 3$  [mbar]. A los 3.000 [s], se detienen los ventiladores, y la presión sube a  $P_2 = 10$  [mbar] en la línea de aire, y a  $P_s = 8$  [mbar] a la salida de los gases. A los 5.160 [s], se apagó la llama, cuando el termopar 4 estaba llegando a su máximo.

Comparando con los ensayos anteriores de HDPE con rotación, se nota un cambio en el perfil de temperatura del termopar 6, enseñado en el gráfico 45. El termopar 6 estaba en pleno desarrollo cuando se aumentó al máximo la potencia de los ventiladores, para luego ser apagados. La pendiente de crecimiento del termopar 6 fue más leve que la de los demás termopares, y alcanzó una temperatura menor a cualquiera de los ensayos de HDPE anteriores, no pudiendo alcanzar los 700 [°C]. En cuanto al desarrollo del frente de llama, se observa una variación considerable de este al acercarse y alejarse al termopar 6. Al acercarse al termopar 6, la velocidad del frente disminuyó en un 42% con respecto al termopar anterior, mientras que al alejarse aumentó en un 135 %. Hay que recordar que, de todos los materiales gasificados, el HDPE había demostrado el comportamiento más parejo en cuanto al avance de frente de llama. El perfil de la velocidad de avance del frente de llama se puede observar en el gráfico N°46.

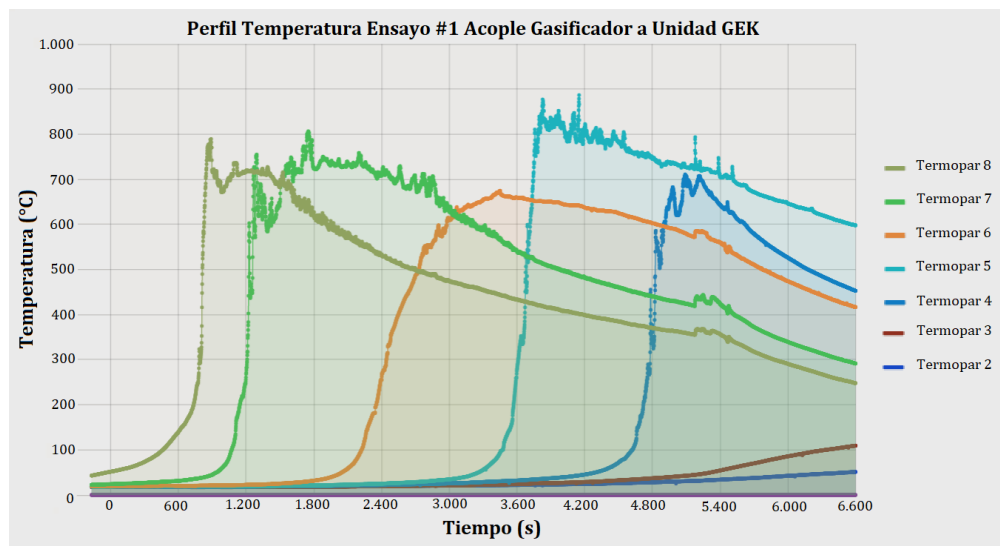


Gráfico 45: Temperatura vs tiempo ensayo #1 acople gasificador a unidad GEK.

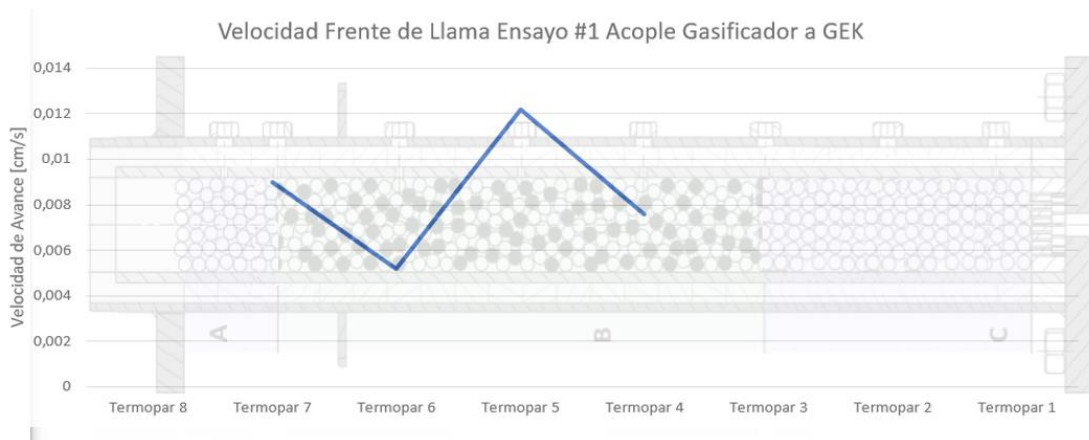


Gráfico 46: Velocidad frente de llama vs espacio ensayo #1 acople gasificador a unidad GEK.

### 6.2.3 ENSAYO #2 ACOPLA GASIFICADOR A GEK.

Se es sabido de antemano, que la gasificación de los residuos bajo los parámetros trabajados hasta ahora no es suficiente para alimentar al motor, y obtener un correcto funcionamiento por parte de este. Es por esto que se decidió inyectar la mayor cantidad de GLP posible al gasificador, enriqueciendo el Syngas producido por los RSU. Para esto, se probaron diferentes flujos de mezcla, variando el parámetro  $\Phi$  y la velocidad de filtración, de manera de estudiar el comportamiento del frente de llama bajo estos parámetros, y el máximo de combustible que se puede inyectar sin que se apague la llama. Por motivos de fuerza mayor, no se disponía del módulo inalámbrico de adquisición de datos, por lo que el ensayo realizado fue sin rotación y sin ser tapado. Al no tener tapa, no era posible conectar el gasificador a la unidad GEK.

Al momento de vaciar el gasificador, se observó que el remanente de HDPE que no se alcanzó a gasificar en el ensayo anterior se solidificó, formando un tapón que no permitía un vaciado completo del gasificador. Se rellenó el espacio vacío solo con esferas, y se procedió a encender la llama, siguiendo los parámetros utilizados en ensayos anteriores,  $\Phi = 0,87 [-]$  y  $V_f = 40 [cm/s]$ . Durante el ensayo, se fue cambiando constantemente los flujos de aire y GLP, para lograr distintos valores de

$\Phi$  y  $V_f$ , buscando inyectar la mayor cantidad de GLP posible. Los cambios realizados se muestran en la tabla 16, en el tiempo respectivo que se realizaron.

Tabla 16: Valores de  $\Phi$  y velocidad de filtración utilizados en el ensayo #2 de acople de gasificador a unidad GEK.

| <b>Tiempo [s]</b> | <b><math>\Phi</math> [–]</b> | <b><math>V_f</math> [cm/s]</b> |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 780               | 1                            | 40                             |
| 1.440             | 1,5                          | 40                             |
| 2.220             | 2                            | 40                             |
| 2.760             | 2,5                          | 40                             |
| 3.540             | 3                            | 40                             |
| 4.080             | 3,5                          | 40                             |
| 4.140             | 4                            | 40                             |
| 4.320             | 5                            | 40                             |
| 4.500             | 6                            | 40                             |
| 4.740             | 5                            | 40                             |
| 4.800             | 4                            | 40                             |
| 4.920             | 1                            | 40                             |
| 4.980             | 1                            | 50                             |

Al trabajar con un  $\Phi > 1$ , se observa que el frente de llama comienza a desplazarse aguas abajo, lo cual se evidencia en el constante aumento de la temperatura del termopar 7 y 8, los cuales alcanzaron temperaturas cercanas a los 1.000 [°C]. El frente de llama se mantuvo en la parte superior del gasificador, hasta los 4.920 [s], momento en el que el parámetro  $\Phi$  volvió a ser calibrado a 1, comenzando a desplazarse el frente de llama aguas arriba. Mientras se gasificaba con una mezcla rica en combustible, se observó una llama de gran tamaño, cercana a los 30 [cm], saliendo del interior del gasificador en todo momento, la cual se puede observar en la figura 53. Una vez el frente de llama alcanzó el termopar 5, se apagó la llama, a los 7.080 [s].

En base a lo observado en el ensayo, es necesario esperar un tiempo mayor antes de utilizar un  $\Phi > 1$ , para que el frente de llama pueda ingresar sin problemas al lecho híbrido.

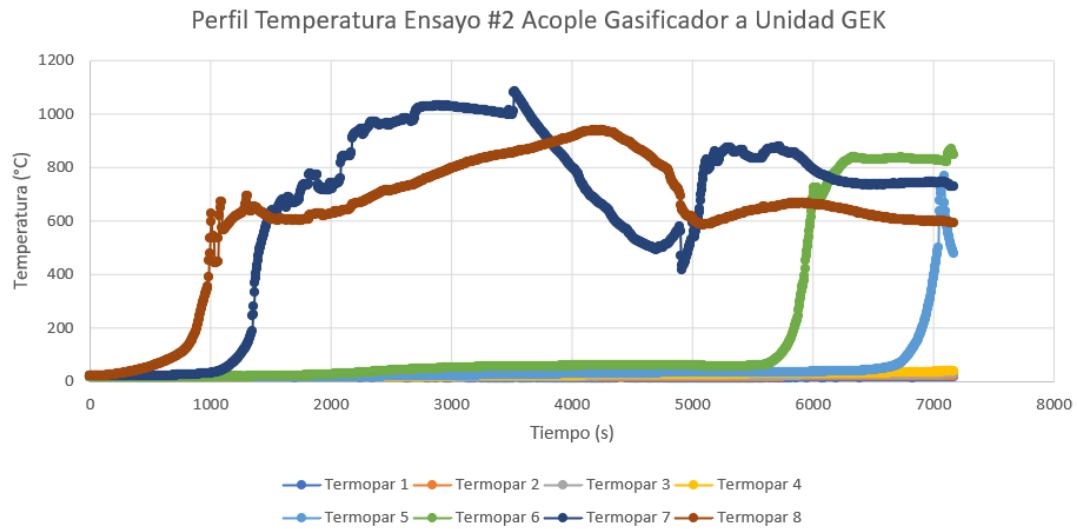


Gráfico 47: Temperatura vs tiempo ensayo #2 acople gasificador a unidad GEK.



Figura 53: Llama proveniente desde el interior del gasificador, durante inyección de mezcla rica de combustible.

#### 6.2.4 ENSAYO #3 ACOUPLE GASIFICADOR A GEK.

Una vez estudiado el funcionamiento de la unidad GEK, y el comportamiento del gasificador ante mezclas ricas en combustible, se procede a realizar un ensayo en donde se inyecta el Syngas producido por el gasificador a la unidad GEK. Al preparar el gasificador para el ensayo, se notó que el tapón de HDPE solidificado producido en el ensayo #1 aún estaba presente, por lo que solo fue necesario llenarse el espacio restante, cerca de 0,45 [Lt], con 160 gramos de HDPE. Se procedió a encender la llama, utilizando un  $\Phi = 0,87$  y  $V_f = 40$  [cm/s]. La presión inicial en la línea de aire fue de  $P_2 = 5$  [mbar], mientras que en la línea de gas fue de  $P_3 = 0$  [mbar]. El gasificador fue tapado a los 2.280 [s], comenzando simultáneamente la rotación. La presión comenzó a subir, y se estabilizó a los 5.340 [s], entregando un valor de  $P_2 = 13$  [mbar] en la línea de aire y  $P_s = 11$  [mbar] a la salida del gasificador. A los 5.880 [s], se variaron los flujos de aire y GLP, hasta alcanzar un  $\Phi = 6,5$ , manteniendo la velocidad de filtración constante. El detalle de la variación de los flujos durante el ensayo se observa en la tabla 17. Mientras se regulaban los flujos de mezcla del gasificador, se encendió la unidad GEK utilizando el galón de GLP auxiliar. Para regular la inyección de GLP auxiliar, se utilizó el regulador de flujo mencionado en el punto 6.2.1, seteando un flujo de 30 [lt/min]. A los 6.360 [s], una vez el motor estabilizara su operación, se abrió la válvula de paso hacia el filtro seco, y se comenzó la inyección del Syngas al motor. Inmediatamente se sintió el cambio en el funcionamiento del motor, el cual aumento sus revoluciones de forma brusca. Debido al exceso de combustible inyectado, el motor se apagó. Se cortó el paso del gas auxiliar, y se intentó encender la unidad GEK solo con el Syngas producido, sin embargo, esto no dio resultados. Como el GLP inyectado al gasificador era el máximo permitido por el controlador de flujo, se procedió a bajar la velocidad de filtración a 32 [cm/s], aumentando de esta forma a un  $\Phi = 10$ . Nuevamente se intentó encender el motor solo con el Syngas del gasificador, pero esto no fue posible. Se cortó el paso del Syngas, y se encendió el motor solo utilizando el GLP auxiliar. Una vez estabilizado el motor, se procedió a manipular el controlador de flujo auxiliar, para disminuir el GLP auxiliar que se le inyectaba al motor. A medida

que el flujo de GLP auxiliar disminuía, se abría poco a poco la válvula que daba el paso del Syngas al motor, asegurando una operación estable del motor. Se logró abrir por completo la válvula de paso del Syngas, en el momento que el regulador de flujo de GLP auxiliar marcaba 10 [lt/min], con una operación estable del motor. Se deja operar por cerca de 20 minutos, y se comienza a bajar el flujo de GLP auxiliar, buscando en qué punto el motor se apaga. A los 9.060 [s], luego de que el regulador auxiliar llegara a 3 [lt/min], el motor se apaga, debido a una inyección insuficiente de combustible. Se procede a apagar la llama. Durante los momentos que el motor se encontraba en funcionamiento con inyección de Syngas, la presión de la línea de aire en el gasificador se mantuvo en  $P_2 = 4$  [mbar], mientras que la presión de salida se mantuvo en  $P_s = 4$  [mbar].

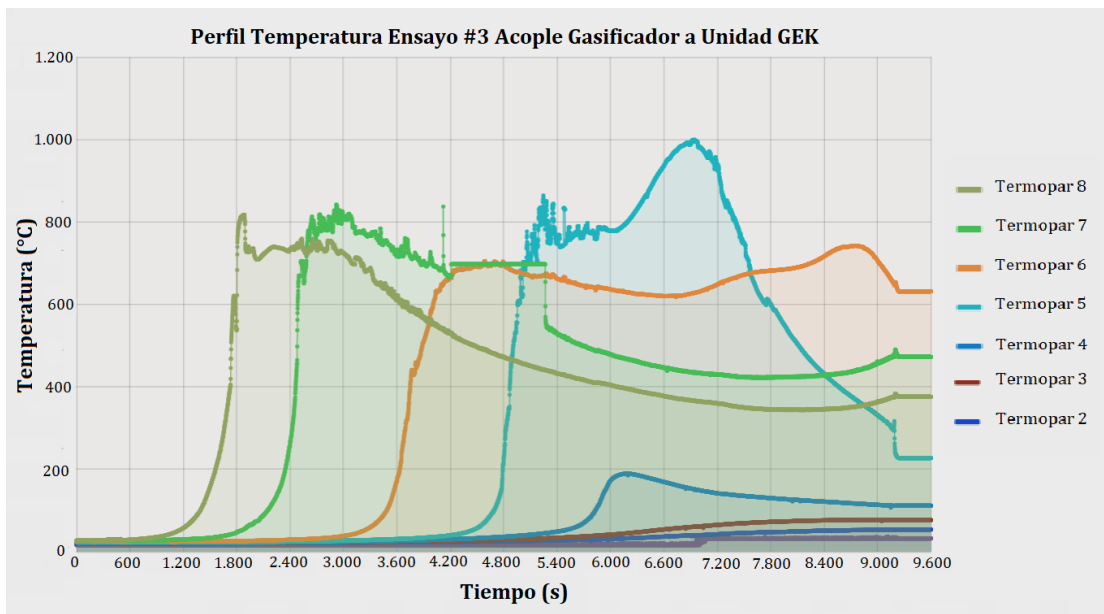


Gráfico 48: Temperatura vs tiempo ensayo #3 acople gasificador a unidad GEK.

Tabla 17: Valores de  $\Phi$  y velocidad de filtración utilizados en el ensayo #2 de acople de gasificador a unidad GEK.

| Tiempo [s] | $\Phi$ [–] | $V_f$ [cm/s] |
|------------|------------|--------------|
| 0          | 0,8        | 40           |
| 240        | 0,9        | 40           |
| 5.880      | 2          | 40           |
| 5.940      | 3          | 40           |
| 6.000      | 4          | 40           |
| 6.060      | 5          | 40           |
| 6.120      | 6          | 40           |
| 6.180      | 6,5        | 40           |
| 6.720      | 10         | 32           |

#### 6.2.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS ENSAYOS CON ACOPLE DEL GASIFICADOR A LA UNIDAD GEK.

Si bien no se pudo lograr una operación de la unidad GEK solo con la inyección del Syngas producido por el gasificador, se logró reducir considerablemente la inyección del GLP auxiliar para el apoyo a la generación, lo cual demuestra que efectivamente el Syngas producido por el gasificador cuenta con un poder calorífico considerable, el cual aún está pendiente de ser cuantificado. Además, se observó que la succión, ya sea de los ventiladores o del motor, tiene influencia en las presiones de entrada y salida del gasificador, y en el desarrollo del frente de llama y las temperaturas alcanzadas.

## 7. CONCLUSIONES

Se operó un gasificador rotatorio inclinado de medios porosos inertes variando los siguientes parámetros de operación: rotación, utilizando 0 y 15 [RPM], inclinación, variando de 30° a 45°, flujos de premezcla, probando con velocidades de filtración de 20, 30 y 40 [cm/s], y composición de la carga, gasificando papel blanco, cartón, algodón, PET, HDPE y mezcla. La aplicación de rotación se realizó con los 3 últimos.

Una de las principales innovaciones de esta tecnología corresponde a la rotación del cuerpo del gasificador. Al hacer el contraste entre ensayos con y sin rotación, se observó una mejora en la estabilización de la presión, la estabilidad del frente de llama a lo largo del ensayo, y mejores temperaturas máximas alcanzadas. No obstante, el trabajo con mezcla estuvo al debe, ya que los resultados obtenidos tuvieron variaciones considerables entre un ensayo y otro. Se recomienda estudiar otras composiciones de mezcla, que permitan un comportamiento más estable entre ensayos. Se observó que, a mayor velocidad de filtración, mayores eran las temperaturas alcanzadas, y mayor el avance del frente de llama, por lo que se seleccionó una velocidad de filtración de 40 [cm/s] como parámetro de trabajo para la mayoría de los ensayos. Finalmente, los resultados obtenidos con gasificación con 30° muestran que las esferas no se acomodan de buena manera luego de gasificarse el sólido, por lo que se establece un ángulo de 45° como parámetro de operación.

De todos los materiales gasificados, el que tuvo un mejor comportamiento fue el HDPE. Sus perfiles térmicos fueron homogéneos en todo momento, incluso en los ensayos sin rotación. De la misma manera, el avance del frente de llama fue estable para todos los ensayos. Con este material se alcanzaron temperatura óptimas de gasificación, superiores a 700 °C. Su alta densidad permitió que se cargara una masa de casi el doble de la utilizada en los ensayos con otros materiales. Hay que considerar que, dentro de todos los residuos, es el que tiene un mayor poder calorífico. Incluso en la trituración, su comportamiento fue destacable, ya que entre todos los materiales fue

el que generó menos polvillo, y su tiempo de trituración por unidad de masa es menor al de otros materiales, como el PET.

La tecnología fue respaldada con la experiencia de acople final a la unidad GEK, en la cual se demostró que el gasificador era capaz de, con ayuda de una pequeña inyección de gas auxiliar, alimentar un motor de un conjunto generador, y producir electricidad. El siguiente paso corresponde en escalar el gasificador, de forma que sea capaz de trabajar bajo todos los parámetros estudiados, y de manera independiente, logrando así una constante generación de energía eléctrica y/o térmica en base a residuos sólidos urbanos, alternativa de alto beneficio social y ambiental, que pretende solucionar una de las grandes problemáticas de la sociedad actual, la excesiva generación de residuos.

## REFERENCIAS.

- [1] Ministeria de Energía, Gobierno de Chile, *Energía 2050, Política Energética de Chile*, Chile.
- [2] Sistema Nacional de Información Municipal.2016
- [3] Akwasi A. Boateng, *Rotary Kilns, Transport Phenomena and Transport Processes*, USA, 2008.
- [4] M. A. M. Al-Moussawi, *A Study on the Failure of Steel Chains in Rotary Cement Kilns*, 2018.
- [5] Zisheng Zhang, Yuanqing Wu, Hong Li, Xingang Li, Xin Gao, *A simple step-change method to determine mean residence time in rotary kiln and a predictive model at low inclination*, 2008.
- [6] John Sullivan, Charles Maier, Oliver Ralston, *Passage of solid particles through rotary cylindrical kiln*, Washington, USA, 1927.
- [7] Wladimir J. Ssatarin, Arkadi S. Kisselhoff, *Nuevo método para el cálculo de hornos rotatorios de cemento*, Charkow, URSS, 1968.
- [8] D. Ramanenka, G. Gustafsson, P. Jonsén, *Influence of heating and cooling rate on the stress state of the brick lining in a rotary kiln using finite element simulations*, 2019.
- [9] Santiago Orduz Aladino, *Diseño mecánico de horno rotatorio de funcionamiento horizontal*, Santiago de Cali, Colombia, 2012.
- [10] Myriam Ramayo Ramos, *Dimensionamiento de un horno rotatorio para la producción de Clinker de cemento Portland*, Cádiz, España, 2008.
- [11] ThyssenKrupp Technologies, *Horno rotatorio de Polysius. Pieza central de la Técnica de Calor*.
- [12] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Octava Edición.
- [13] Ferninand P. Beer, E. Russell Johnston Jr., John T. DeWolf, David F. Mazurek, *Mecánica de Materiales*, Quinta Edición.
- [14] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, *Carbon Dioxide emissions from the global cement industry*, 2001.

- [15] Francisco Galleguillos Fuenzalida, *Estudio de variables operacionales en un horno rotatorio piloto para la empresa IDIEM*, Santiago, Chile, 2019.
- [16] Castello, A., *Diseño de un reactor continuo de Gasificación de Biomasa*.
- [17] Olguín, H., Perez, L., Toledo, M., *Optimización de Procesos de Combustión en Medios Porosos Inertes usando Algoritmos Genéticos*.
- [18] Zaichenko, A., Zhirnov, A., *Filtration Combustion Front Stabilization*.
- [19] D. N. Podlesniy, A. Yu. Zaichenko, E. A. Salgansky, and M. V. Salganskaya, *Stability of the Front of Filtration Combustion of Bidisperse Fuel Mixture in an Inclined Rotating Gas Generator*, Moscow oblast, Russia
- [20] S.K. Sansaniwal, K. Pal, M.A. Rosen, S.K. Tyagi, *Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review*, 2017.
- [21] Steffano Consonni, Lidia Lombardi, Federico Viganò, *Municipal Solid Waste to Energy Technology*, 2017.
- [22] Fanbin Menga, Qingbang Maa, Hongde Wang, Yueyang Liua, Donghai Wang, *Effect of gasifying agents on sawdust gasification in a novel pilot scale bubbling fluidized bed system*, 2019.
- [23] Xiwen Yao, Yonglu Hu, Ji Ge, Xingzong Ma, Jianyu Mao, Lu Sun, Keqiang Xu, Kaili Xu, *A comprehensive study on influence of operating parameters on agglomeration of ashes during biomass gasification in a laboratory-scale gasification system*, 2020.
- [24] Organización Mundial de la Salud, *Las dioxinas y sus efectos en la salud humana*, 2016 [En línea] [Citado el 24 de junio del 2020] \url{https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health}
- [25] Rui-zhi Zhang, Yong-hao Luo, Ren-hao Yin, *Experimental study on dioxin formation in an MSW gasification-combustion process: An attempt for the simultaneous control of dioxins and nitrogen oxides*, 2018.
- [26] Comisión Nacional del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, *Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile*, 2010
- [27] Mi Yan, Hongcai Su, Dwi Hantoko, Ekkachai Kanchanatip, Fauziah Binti Shahul Hamid, Sicheng Zhang, Guobin Wang, Zhang Xu, *Experimental study on the energy*

*conversion of food waste via supercritical water gasification: Improvement of hydrogen production*, 2019.

[28] Hongcai Su, Dwi Hantoko, Mi Yan, Yi Cai, Ekkachai Kanchanatip, Jianyong Liu, Xuanyou Zhou, Sicheng Zhang, *Evaluation of catalytic subcritical water gasification of food waste for hydrogen production: Effect of process conditions and different types of catalyst loading*, 2019.

[29] Jingwei Chen, Yi Fan, Xiaohuan Zhao, Jiaqiang E, Wenwen Xu, Feng Zhang, Gaoliang Liao, Erwei Leng, Shuai Liu, *Experimental investigation on gasification characteristic of food waste using supercritical water for combustible gas production: Exploring the way to complete gasification*, 2019.

[30] Hongcai Su, Wenjuan Liao, Jingyi Wang, Dwi Hantoko, Zhihao Zhou, Hongyu Feng, Jiahao Jiang, Mi Yan, *Assessment of supercritical water gasification of food waste under the background of waste sorting: Influences of plastic waste contents*, 2020.

[31] Wei Su, Changqing Cai, Ping Liu, Wei Lin, Baorui Liang, Hui Zhang, Zhiliang Ma, Hongzhi Ma, Yi Xing, Weimin Liu, *Supercritical water gasification of food waste: Effect of parameters on hydrogen production*, 2020.

[32] Gabriela Ionescu, Cosmin Mărculescu, Adrian Badea, *Alternative solutions for MSW to energy*, Rumania, 2011.

[33] ASTM International, *Norma ASTM WK20632, New Practice for Coding Plastic Items for Resin Identification Purposes*, 2008.

[34] Reza Alipour Moghadam Esfahani, Luigi Osmieri, Stefania Specchia, Suzana Yusup, Ahmad Tavasoli, Akbar Zamaniyan, *H<sub>2</sub>-rich syngas production through mixed residual biomass and HDPE waste via integrated catalytic gasification and tar cracking plus bio-char upgrading*, 2016.

[35] Bin Bai, Yigang Liu, Hua Zhang, Fayuan Zhou, Xiaodong Han, Qiuxia Wang, Hui Jin, *Experimental investigation on gasification characteristics of polyethylene terephthalate (PET) microplastics in supercritical water*, 2019.

[36] Min-Hwan Cho, Young-Kon Choi, Joo-Sik Kim, *Air gasification of PVC (polyvinyl chloride)-containing plastic waste in a two-stage gasifier using Ca-based additives and Ni-loaded activated carbon for the production of clean and hydrogen-rich producer gas*, Seoul, Republic of Korea, 2015.

[37] Isam Janajreh, Idowu Adeyemi, Sherien Elagroudy, *Gasification feasibility of polyethylene, polypropylene, polystyrene waste and their mixture: Experimental studies and modeling*, 2020.

[38] Hui Zhou, Aihong Meng, Yanqiu Long, Qinghai Li and Yanguo Zhang, *Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics*, China, 2014.

[39] Néstor D. Montiel-Bohórquez Juan F. Pérez, *Generación de Energía a partir de Residuos Sólidos Urbanos. Estrategias Termodinámicas para Optimizar el Desempeño de Centrales Térmicas*, Medellín Colombia