

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE TECNOLOGIA
CARRERA DE QUIMICA INDUSTRIAL



PROYECTO DE GRADO
“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA CONVERTIR
RESIDUOS SOLIDOS URBANOS EN GAS DE SINTESIS”

Para optar al título de Licenciado en Química Industrial

POSTULANTE: Delfín Espinoza Valeriano

TUTOR: PhD. Miguel Yucra Rojas

La Paz – Bolivia

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Universidad Mayor de San Andrés, institución que acoge a todos los estudiantes que empiezan su formación profesional. A la facultad de tecnología en específico a la carrera de Química Industrial, al plantel docente que durante estos años compartieron sus conocimientos, a los miembros del jurado y tutor quienes me guiaron para lograr el objetivo.

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a Dios, que me ha dado toda la Fuerza para llegar a cumplir mis metas y el Honor que me ha dado para continuar hacia a delante. A mi familia quien presencio los malos y buenos momentos durante mi etapa de formación.

INDICE

CAPITULO I: ANALISIS DEL CONTEXTO.....	1
1.1. Gestión de residuos sólidos.....	2
1.1.2. Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia	19
1.1.3. Gestión de residuos sólidos en el municipio de El Alto.....	33
1.2. Formulación del problema	44
1.3. Objetivo general.....	47
1.3.1. Objetivos específicos	47
1.4. Justificación	47
1.4.1. Justificación Ambiental.....	47
1.4.2. Justificación Social	48
1.4.3. Justificación Tecnológica.....	48
1.4.4. Justificación Académica	48
CAPITULO II: MARCO TEORICO.....	49
2.1. Marco conceptual.....	49
2.2. Marco referencial	51
2.2.1. Tecnologías de conversión de residuos sólidos urbanos.....	51
2.2.1.1. Conversión Biológica.....	51
2.2.1.2. Conversión térmica	52
2.2.2. Clasificación de las tecnologías	52
2.2.2.1. Pirolisis, Incineración y gasificación por plasma.....	53
2.2.2.1.1. Ventajas y desventajas	54
2.2.3. Instalaciones de plantas de conversión biológica.....	57
2.2.3.1. Instalaciones comerciales de plantas de biogás en Asia y Europa.	57
2.2.3.2. Instalaciones comerciales de plantas de biogás en América Latina.....	59
2.2.4. Instalaciones de plantas con tecnologías de conversión térmica.....	60
2.2.4.1. Instalaciones comerciales en Europa y Asia	62
2.2.4.2. Instalaciones Comerciales en América Latina	76
2.2.4.3. Beneficios/ventajas de la tecnología de gasificación por Plasma	78
2.2.4.4. Gasificación por plasma y otras tecnologías de tratamiento térmico.....	81
2.3. Contribución al proyecto del marco referencial.....	83

CAPITULO III: PROPIEDADES DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS.....	86
3.1. Clasificación de los residuos sólidos	87
3.2. Composición de los residuos sólidos urbanos.....	88
3.3. Propiedades Físicas de Los Residuos Sólidos Urbanos	90
3.3.1. Humedad	90
3.3.2. Peso Específico	91
3.4. Propiedades Químicas de los Residuos Sólidos Urbanos	93
3.4.1. Análisis Físico.....	93
3.4.2. Punto de fusión de la ceniza.....	95
3.4.3. Análisis elemental los componentes de residuos sólidos urbanos	96
3.4.4. Contenido Energético de los Componentes de los RSU	97
CAPITULO IV: TECNOLOGIA DE PLASMA.....	99
4.1. Que es el plasma	99
4.1.1. La Evolución tecnológica de Plasma	100
4.1.2. Ventajas de la tecnología de gasificación por plasma.....	100
4.1.3. Ventajas de la gasificación por plasma frente a la incineración	101
4.1.4. El proceso de la gasificación por Plasma en la eliminación de residuos	102
4.1.5. Características del proceso de gasificación por plasma	103
4.2. Reacciones químicas involucradas en el proceso.....	106
4.3. Estudio del proceso de Gasificación	107
4.3.1. Control y retratamiento de los residuos	108
4.3.2. El reactor de Gasificación por Plasma	108
4.3.3. El sistema de antorcha de plasma	110
4.3.4. Unidad de separación de aire	111
4.3.5. Limpieza del gas de síntesis.....	112
4.3.6. Control y uso del slag.....	113
4.3.7. Subproductos del proceso	114
4.4. Layout del Proceso.....	115
CAPITULO V: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	117
5.1. Características del Prototipo	117
5.2. Tipos de Reactores de Gasificación	117
5.2.1. Lecho fijo o cama móvil	118

5.2.2.	Lecho fluidizado	119
5.2.3.	Flujo arrastrado	121
5.3.	Elección del reactor.....	121
5.4.	Aspectos generales de diseño del prototipo	123
5.4.1.	Fluidización.....	124
5.4.2.	Etapas de Gasificación en Lecho Fluidizado	124
5.4.2.1.	Secado/Volatilización	124
5.4.2.2.	Pirolisis	124
5.4.2.3.	Gasificación	125
5.4.3.	Agentes gasificantes.....	125
5.4.4.	Sistema Gas – Solido en lecho fluidizado.....	126
5.4.5.	Clasificación de geldart de partículas	127
5.4.6.	Velocidad del gas y U/Umf.....	129
5.4.7.	Tiempo de residencia	130
5.4.8.	Conversión de partículas	132
5.5.	Descripción global del proceso de gasificación por plasma	132
5.6.	Diseño del prototipo.....	134
5.6.1.	Diseño del reactor de gasificación por plasma.....	134
5.6.1.1.	Diseño del reactor de lecho fluidizado.....	134
5.6.1.2.	Dimensiones del reactor.....	137
5.6.1.3.	Aislamiento Critico del Reactor.....	140
5.6.1.4.	Diseño del reactor en AutoCAD Plant 3D	141
5.6.2.	Diseño del Condensador	145
5.6.3.	Diseño del ciclón separador	146
5.6.3.1.	Ciclón.....	146
5.6.3.2.	Teoría de separadores de ciclón.....	148
5.6.3.3.	Diseño del ciclón.....	149
5.6.4.	Diseño del lavador de gases	154
5.6.4.1.	Filtración	154
5.6.4.2.	Ecuaciones de diseño de un filtro.....	155
5.6.4.2.1.	Filtración a presión constante.....	155

5.6.4.2.2.	Filtración continua	155
5.6.4.3.	Dimensionamiento del filtro	158
5.6.4.4.	Lavador de gases (scrubber).....	160
5.6.4.4.1.	Diagrama del lavador de gases.....	161
5.6.4.4.2.	Dimensiones del lavador de gases.....	162
5.7.	Construcción del prototipo.....	167
5.7.1.	Componentes del sistema de gasificación.....	168
5.7.1.1.	Tolva de materia prima	168
5.7.1.2.	Compresor de aire	169
5.7.1.3.	Arco eléctrico con antorchas de plasma.....	170
5.7.1.3.1.	Arco eléctrico.....	170
5.7.1.3.2.	Torchas de plasma.....	170
5.7.1.3.3.	Torcha DC de arco no transferido.....	172
5.7.1.3.4.	Torcha de DC de arco transferido	173
5.7.1.3.5.	Torcha seleccionada para el prototipo.....	174
5.7.1.4.	Reactor de gasificación por plasma.....	175
5.7.1.5.	Intercambiador de calor	177
5.7.1.6.	Aislamiento critico.....	178
5.7.1.7.	Ciclón separador de partículas	178
5.7.1.8.	Lavador de gases con filtro de lecho empacado.....	179
5.7.1.9.	Compresor para el gas de síntesis	181
5.7.1.10.	Sensor de monóxido de carbono	182
5.7.1.11.	Sensor de temperatura.....	182
5.7.1.12.	Sensor de humedad	183
5.7.1.13.	Resumen de componentes del equipo de gasificación	184
5.8.	Ensamblaje del prototipo	185
CAPITULO VI: SIMULACION Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO		187
6.1.	Reacciones químicas en la gasificación de RSU.....	187
6.2.	Simulación del proceso en Aspen Hysys v8.8	188
6.2.1.	Determinación de las variables de operación por simulación	188
6.2.1.1.	Datos teóricos de entrada al reactor	189

6.2.1.2.	Simulación en el reactor.....	190
6.2.1.2.1.	Selección de componentes	191
6.2.1.2.2.	Selección del paquete de fluido.....	191
6.2.1.2.3.	Adición de las reacciones químicas	192
6.2.1.2.4.	Especificación de flujos de entrada.....	192
6.2.1.2.5.	Especificación del reactor de conversión.....	194
6.2.1.2.6.	Composición teórica del gas de síntesis.....	195
6.2.1.2.7.	Operación del reactor	196
6.2.1.2.8.	Comparación de datos teóricos con la simulación	204
6.2.1.3.	Variables de operación determinadas.....	207
6.2.2.	Simulación del proceso completo	208
6.2.2.1.	Introducción de las condiciones de operación.....	209
6.2.2.2.	Selección de componentes y paquete de fluido.....	210
6.2.2.3.	Adición de las reacciones químicas	211
6.2.2.4.	Diagrama de Simulación.....	212
6.2.2.4.1.	Balace de Materia en la simulación	214
6.2.2.4.1.1.	Balace en el Reactor.....	214
6.2.2.4.1.2.	Balace en el proceso.....	214
6.2.2.4.2.	Composición del gas de síntesis en la simulación.....	215
6.2.2.4.2.1.	Composición del gas a la salida del reactor	215
6.2.2.4.2.2.	Composición del gas al final del proceso.....	215
6.3.	Simulación del proceso por balance de materia con reacción química.....	216
6.3.1.	Diagrama de balance	217
6.3.2.	Balace de Materia con reacción química en el reactor.....	220
6.3.3.	Composición del gas de síntesis a las salidas del reactor.....	220
6.3.6.	Comparación de la composición gas de síntesis	222
6.4.	Balace de energía	222
6.5.	Funcionamiento del prototipo	227
6.5.2.	Arranque del sistema de plasma.....	228
6.5.3.	Funcionamiento del reactor de gasificación.....	228
6.5.4.	Funcionamiento del ciclón y el filtro	229

6.5.5.	Funcionamiento del sistema de succión y compresión	230
6.10.	Aplicaciones del gas Síntesis (Syngas)	236
6.10.1.	Usos energéticos	236
6.10.2.	Usos en la obtención de materias - Síntesis química	236
CAPITULO VII: REQUERIMIENTO Y COSTO DEL PROTOTIPO		238
7.1.	Requerimientos	238
7.1.1.	Requerimiento de equipos.....	238
7.1.2.	Requerimiento de materia prima e insumos.....	240
7.1.3.	Requerimiento de servicios de producción	240
7.2.	Costos de diseño y construcción del prototipo.....	240
7.2.1.	Costos de diseño.....	240
7.2.2.	Costos de construcción.....	241
7.3.	Costos de puesta en marcha	243
7.4.	Costo total de del prototipo.....	245
7.5.	Costo de producción del gas de síntesis	246
7.6.	Costo de producción para 1 m ³ de gas de síntesis.....	247
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		248
8.1.	Conclusiones	248
8.2.	Recomendaciones	251
BIBLIOGRAFIA.....		252
ANEXOS.....		261
Anexo 1:	Costo para una planta comercial de gasificación por plasma llave en mano	261
Anexo 2:	Sensor de monóxido de carbono MQ-7.....	263
Anexo 3:	Sensor de gas MQ-2	264
Anexo 4:	fotos tomadas de los componentes del prototipo.....	264
Anexo 4:	Análisis de composición del gas de síntesis.....	267
Anexo 5:	Análisis de presencia de contaminantes en el gas de síntesis.....	268
INDICE DE GRAFICOS		
<i>Grafico 1:</i>	<i>Nueva fuente de materia prima</i>	<i>1</i>
<i>Grafico 2:</i>	<i>Fuente de Energía no aprovechada</i>	<i>2</i>
<i>Grafico 3:</i>	<i>Manejo Inadecuado de Residuos Sólidos</i>	<i>3</i>
<i>Grafico 4:</i>	<i>Basura doméstica (Quito Ecuador).....</i>	<i>5</i>

<i>Grafico 5: Relleno Sanitario Colapsado en Costa Rica</i>	7
<i>Grafico 6: Reciclaje Informal en Relleno Sanitario de Colombia</i>	9
<i>Grafico 7: Reciclaje en américa latina</i>	11
<i>Grafico 8: Aprovechamiento térmico de residuos sólidos urbanos</i>	12
<i>Grafico 9: Recolección eficiente de RSU en Costa Rica</i>	13
<i>Grafico 10: Costos de recolección de RSU en América Latina</i>	14
<i>Grafico 11: Práctica común de disposición final de RSU</i>	15
<i>Grafico 12: Porcentajes de disposición final de RSU</i>	16
<i>Grafico 13: Practica común de disposición final de residuos sólidos urbanos</i>	18
<i>Grafico 14: Gestión de Residuos Solidos</i>	20
<i>Grafico 15: Generación de RSU en Bolivia</i>	22
<i>Grafico 16: Generación de Residuos Sólidos por Categoría Poblacional [ton/día]</i>	23
<i>Grafico 17: Generación total de residuos sólidos En Ton./día</i>	24
<i>Grafico 18 Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos en Bolivia</i>	26
<i>Grafico 19: Escaso reciclaje del residuo solido</i>	27
<i>Grafico 20: Practicas de reciclaje</i>	28
<i>Grafico 21: Implementación de puntos de acopio</i>	29
<i>Grafico 22 Servicio de recolección por cantidad de habitantes</i>	30
<i>Grafico 23 : Tipos de sitios disposición final a nivel nacional</i>	30
<i>Grafico 24: Formas y porcentajes de disposición final en Bolivia</i>	31
<i>Grafico 25: Relleno sanitario colapsado</i>	32
<i>Grafico 26: Relleno sanitario de Villa Ingenio de El Alto</i>	34
<i>Grafico 27: Tipos de Residuo Solidos Generados en El Alto</i>	35
<i>Grafico 28 : Relleno Sanitario Colapsado</i>	36
<i>Grafico 29: Materiales reciclables en el Municipio de El Alto</i>	37
<i>Grafico 30: Cantidad de residuos sólidos recolectados</i>	38
<i>Grafico 31: Relleno sanitario de Villa Ingenio totalmente colapsado</i>	39
<i>Grafico 32: Relleno sanitario de Villa Ingenio del municipio de El Alto colapsado</i>	42
<i>Grafico 33: Análisis causa efecto</i>	45
<i>Grafico 34: Pirámide del ciclo de disposición final de los residuos sólidos urbanos</i>	51
<i>Grafico 35: Tecnologías de conversión térmica y biológica</i>	52
<i>Grafico 36: Residuos empacados para conversión térmica</i>	60
<i>Grafico 37: Desechos listos para ser procesados en Noruega</i>	65
<i>Grafico 38: Incineración controlada</i>	67
<i>Grafico 39: MEPL, planta de gasificación por plasma de residuos Sólidos Urbanos</i>	69
<i>Grafico 40: Gas de síntesis se quema en una cámara secundaria para crear energía en una turbina</i>	71
<i>Grafico 41: Planta de plasma para residuos sólidos urbanos de Tees Valley</i>	74
<i>Grafico 42: Ubicación del centro de Wuhan Kaidi planta de Plasma</i>	75
<i>Grafico 43: Planta de gasificación de RSU en Costa Rica</i>	76
<i>Grafico 44: Relleno sanitario de villa ingenio</i>	86

<i>Grafico 45: Clasificación de los residuos sólidos</i>	<i>87</i>
<i>Grafico 46: Composición de los residuos sólidos urbanos</i>	<i>88</i>
<i>Grafico 47: Composición de los RSU Orgánicos</i>	<i>89</i>
<i>Grafico 48: Composición de los RSU Inorgánicos.....</i>	<i>89</i>
<i>Grafico 49: Generación diaria de RSU Orgánicos e Inorgánicos</i>	<i>90</i>
<i>Grafico 50: Rango de temperaturas en el proceso de gasificación por plasma.....</i>	<i>103</i>
<i>Grafico 51: Esquema básico del reactor de gasificación</i>	<i>109</i>
<i>Grafico 52: Antorcha de plasma.....</i>	<i>111</i>
<i>Grafico 53: Proceso de gasificación por plasma</i>	<i>115</i>
<i>Grafico 54: Proceso de gasificación por etapas.....</i>	<i>116</i>
<i>Grafico 55: Gasificador de lecho fijo en flujo ascendente</i>	<i>118</i>
<i>Grafico 56: Gasificador de Lecho Fluidizado</i>	<i>120</i>
<i>Grafico 57: Reactor de lecho fluidizado</i>	<i>123</i>
<i>Grafico 58: Regímenes de Fluidización.....</i>	<i>128</i>
<i>Grafico 59: Fluidización y regiones</i>	<i>129</i>
<i>Grafico 60: Tiempo de residencia para partículas de 1 mm, 2 mm y 3 mm de diámetro respectivamente, con velocidad del gas de 1,6 m/s.....</i>	<i>130</i>
<i>Grafico 61: Diagrama esquemático del proceso de gasificación por plasma.....</i>	<i>133</i>
<i>Grafico 62: Diagrama del reactor de gasificación de lecho fluidizado</i>	<i>138</i>
<i>Grafico 63: Vista frontal Del reactor diseñado en Plant 3D.....</i>	<i>142</i>
<i>Grafico 64: Vista lateral Del reactor</i>	<i>143</i>
<i>Grafico 65: Vista Lateral del Reactor</i>	<i>143</i>
<i>Grafico 66: Vista Lateral derecha del reactor</i>	<i>144</i>
<i>Grafico 67: Vista General y medidas del reactor.....</i>	<i>144</i>
<i>Grafico 68: Zona de Gasificación de Reactor</i>	<i>145</i>
<i>Grafico 69: Condensador</i>	<i>146</i>
<i>Grafico 70: Funcionamiento del ciclón.....</i>	<i>147</i>
<i>Grafico 71: Separador de ciclón gas-sólido.....</i>	<i>148</i>
<i>Grafico 72: Medidas de un ciclón.....</i>	<i>150</i>
<i>Grafico 73: Vista frontal del ciclón</i>	<i>153</i>
<i>Grafico 74: Medidas del filtro</i>	<i>160</i>
<i>Grafico 75: Diagrama de lavador de gases tipo scrubber</i>	<i>161</i>
<i>Grafico 76: Dimensiones del lavador de gases</i>	<i>162</i>
<i>Grafico 77: Vista frontal del lavador de gases scrubber.....</i>	<i>163</i>
<i>Grafico 78: Vista posterior del lavador de gases scrubber.....</i>	<i>163</i>
<i>Grafico 79: Vista lateral y vista interior del lavador de gases scrubber</i>	<i>164</i>
<i>Grafico 80: Vista del empaque al interior scrubber y retenedor de gotas r.....</i>	<i>164</i>
<i>Grafico 81: Vista frontal del reactor más el lavador de gases.....</i>	<i>165</i>
<i>Grafico 82: Vista lateral del reactor y lavador de gases.....</i>	<i>165</i>
<i>Grafico 83: Vista general del prototipo completo</i>	<i>166</i>
<i>Grafico 84: Vista general y completo del prototipo más accesorio</i>	<i>166</i>

<i>grafico 85: tolva de materia prima</i>	168
<i>Grafico 86: Compresor de Aire</i>	169
<i>Grafico 87: Fuente de potencia comercial CUT-60 Plasma Inverter</i>	170
<i>Grafico 88: Esquema de una torcha de plasma</i>	171
<i>Grafico 89: Esquema de torcha de arco no transferido</i>	172
<i>Grafico 90: Esquema de una torcha de arco transferido</i>	173
<i>Grafico 91: Esquema y despiece del cabezal de corte</i>	174
<i>Grafico 92: Reactor de gasificación por plasma, construido</i>	175
<i>Grafico 93: Zona de plasma</i>	176
<i>Grafico 94: Cambiador de calor</i>	177
<i>Grafico 95: Aislamiento de reactor (vista interna)</i>	178
<i>Grafico 96: Ciclón separador de partículas</i>	179
<i>Grafico 97: Filtro tipo Scrubber</i>	180
<i>Grafico 98: Compresor de gas y su unidad de almacenamiento</i>	181
<i>grafico 99; Sensor de CO MQ-7</i>	182
<i>grafico 100: Sensor de temperatura</i>	183
<i>Grafico 101: Prototipo ensamblado</i>	185
<i>Gráfico 102: Arranque del sistema de plasma</i>	228
<i>Gráfico 103: Condiciones del reactor en el momento del arranque</i>	229
<i>grafico 104: Ciclón y filtro en funcionamiento</i>	229
<i>Gráfico 105: Sistema de succión y compresión</i>	230
<i>Gráfico 106: Control de CO</i>	230
<i>Grafico 107: Prototipo en funcionamiento</i>	231
<i>Gráfico 108: Prototipo en funcionamiento</i>	232
<i>grafico 109: grado de conversión de C</i>	233

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: generación percapita de residuos sólidos urbanos en américa latina y el caribe</i>	6
<i>Tabla 2: Generación de RSU per cápita</i>	8
<i>Tabla 3: Países de América Latina y el Caribe^a: modalidades de prestación del servicio de recolección por tamaño de población (Porcentaje de población cubierta)</i>	13
<i>Tabla 4: Países de América Latina y el Caribe ^a: formas de disposición final por tamaño de población, disposición por población (En porcentajes)</i>	17
<i>Tabla 5: Generación de residuos sólidos por distrito en El Alto</i>	34
<i>Tabla 6: Vida útil del relleno sanitario de Villa Ingenio</i>	40
<i>Tabla 7: Ventajas y desventajas de la incineración</i>	54
<i>Tabla 8: Ventajas y desventajas de la Pirolisis</i>	55
<i>Tabla 9: Ventajas y desventajas de gasificación por plasma</i>	56
<i>Tabla 10: instalaciones operativas y uevas con la tecnologia de plasma</i>	63
<i>Tabla 11: Especificaciones del gas de síntesis después de la limpieza</i>	80
<i>Tabla 12: Gasificación por plasma vs incineración</i>	82

<i>Tabla 13: Contenido de humedad de los RSU</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 14: Peso específico de los RSU</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 15: Contenido de: Humedad, Materia Volátil, Carbono Fijo, y No Combustibles (Cenizas), en los RSU</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 16: Contenido de C, H, O, N, S, y Cenizas (en Base Seca) en los RSU.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 17: Análisis Último de Componentes de los RSU</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 18: Contenido Energético en los RSU</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 19: Gasificación por plasma frente a la incineración</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 20: Modo de contacto en reactores de lecho</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 21: Tipos de agentes gasificantes y usos de los gases producto de la gasificación</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 22: Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 23: Relaciones estándares para ciclones de alta eficiencia</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 24: Resumen de componentes de gasificación.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabla 25: Composición típica del gas de síntesis (Bridgwater 1995)</i>	<i>195</i>
<i>Tabla 26: Datos obtenidos de la simulación</i>	<i>205</i>

RESUMEN

A nivel mundial cada vez se genera más residuos sólidos alcanzando desde 7.000 y 10.000 millones de toneladas cada día, donde la gestión inadecuada se ha convertido en uno de los mayores problemas, y en uno de los principales retos a los que debe enfrentarse la sociedad actual debido a su impacto ambiental, social y económico. La producción de residuos ha existido siempre de manera natural en toda actividad humana y seguirá existiendo. El 83 % de Todos estos volúmenes de residuos generados son depositados en un relleno sanitario, un método de disposición final practicado por la mayoría de los países. A nivel nacional la generación diaria alcanza a 6.475 tn de los cuales el 80% son depositados en rellenos sanitarios y vertederos clandestinos, y solo un 10% es reciclado. En EL Alto la generación diaria es 540 tn de la misma manera el 88% son dirigidos al relleno sanitario causando daños irreversibles, el restante en vertederos clandestinos y recicladores informales.

Cada vez producimos más basura. La cuestión es que hacer con ella. Los rellenos sanitarios ya nos son la solución, ¿debemos apostar por el reciclaje?, estamos preparados para este desafío? o se debería buscar medios alternativos de disposición final?

El relleno sanitario de El Alto ya colapso el 2015 pero se lo sigue utilizando, por lo que el fin de este proyecto fue desarrollar un medio alternativo para lograr reducir los volúmenes de residuos sólidos mediante la tecnología de gasificación por plasma. El plasma descompone basura a temperaturas altas en ausencia de oxígeno sin quemarlo y queda gases ricos en energía.

Se determinaron las propiedades de los residuos sólidos urbanos como ser: contenido elemental, humedad, carbono fijo y volátil. Estos datos indican que los residuos existentes en el relleno sanitario están cargados de energía, por lo que se procedió a diseñar un prototipo con la ayuda del AutoCAD Plant 3D, una vez diseñado, se construyó todo el sistema de gasificación.

Antes de hacer funcionar el prototipo se procedió a la simulación con Aspen Hysys para determinar las condiciones de operación, finalmente se procedió a la puesta en marcha procesando 1 kg/h de residuos sólidos urbanos, y finalmente se analizó el gas obtenido.

CAPITULO I: ANALISIS DEL CONTEXTO

Los residuos sólidos urbanos son inagotables y constituyen un problema para muchas sociedades, sobre todo para las grandes urbes, así como para el conjunto de la población del planeta, debido a la sobrepoblación, actividades humanas modernas y el consumismo han acrecentado mucho la cantidad de basura que se genera.

Los residuos sólidos provenientes de distintos productos procesados para el uso diario de la sociedad son depositados en vertederos, pero en países desarrollados dichos residuos se han convertido en una fuente de materia prima esencial principalmente para la producción de gas de síntesis y generar energía eléctrica.

Grafico 1: Nueva fuente de materia prima



Fuente: Elaboración propia, en base a la imagen tomada del relleno sanitario de El Alto 22/10/17

Cada país, es un potencial generador de residuos sólidos y estos no son aprovechados en su totalidad, por otra parte, los países desarrollados logran diversificar su matriz energética, en base a los residuos sólidos, un claro ejemplo es Japón que utiliza

tecnologías innovadoras para transformar sus residuos sólidos en energía, debido a los grandes volúmenes producidos. La generación de electricidad está diseñada como parte de su gestión integral de residuos sólidos y que podrían aplicarse en otros países.

Grafico 2: Fuente de Energía no aprovechada



Fuente: (Elaborado con datos del BID 2014) foto tomada del relleno sanitario de villa ingenio de El Alto

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son una fuente de materia prima no aprovechada a nivel mundial debido a que se siguen probando tecnologías para el tratamiento térmico y generar energía eléctrica, por eso se sigue dependiendo de los combustibles fósiles como fuente de materia prima, pero en poco tiempo los RSU será una alternativa real debido a los grandes volúmenes que se generan en todo el mundo, donde las mega ciudades con elevada densidad demográfica son grandes generadores de residuos sólidos y estos no son aprovechados en su totalidad¹.

1.1. Gestión de residuos sólidos

La gestión de los residuos es uno de los principales retos para las instituciones relacionadas con la prevención ambiental.

¹ Tron .F. Recogida de basura en mega ciudades. INVI [en línea]. 2010.

El volumen de residuos producidos aumenta cada año debido a la capacidad de consumo de toda sociedad moderna. Además, la naturaleza de estos residuos ha cambiado sustancialmente en los últimos años, pasando de ser mayoritariamente orgánicos a inorgánicos, presentando cantidades masivas de plásticos, vidrios, papeles, cartones, nylon y metales. Esto implica que un depósito final incorrecto de los mismos en condiciones no adecuadas puede provocar deterioros medioambientales irreversibles.

1.1.1. Gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe

La región de América Latina y el Caribe ha seguido un proceso de urbanización continua que ha llevado a alcanzar una cifra de 80% de la población viviendo en ciudades. Este fenómeno de crecimiento y urbanización ha sido acompañado por un mayor consumo de productos y un aumento en la generación de residuos sólidos, lo que hace que la gestión integral de los mismos sea más complicada, a todo ello se le agrega los residuos generados por la industria que también aporta al incremento de los volúmenes.

Grafico 3: Manejo Inadecuado de Residuos Sólidos



Fuente: imagen extraída de CEPAL 2014(Relleno sanitario de Guyana)

El efecto ambiental más evidente del manejo inadecuado de los RSU lo constituye el deterioro estético de las ciudades, así como del paisaje natural, tanto urbano como rural, con la consecuente devaluación, tanto de los predios donde se localizan los vertederos como de las áreas vecinas por el abandono y la acumulación de la basura, siendo uno de los efectos fácilmente observados por la población; sin embargo, entre los efectos ambientales más serios están la contaminación del suelo, del aire y los cuerpos de agua, ocasionada por el vertimiento directo de los RSU a cielo abierto.

Al respecto, las entidades responsables del manejo de los RSU y la regulación ambiental recomiendan que la gestión integral de residuos sólidos (GIRS) debe ser considerado un sistema esencial en el ámbito urbano y rural, que como fin tenga una correcta disposición final.

Finalmente, el fenómeno de crecimiento y urbanización ha sido acompañado por un mayor consumo de productos y un aumento en la generación de residuos sólidos. Por ello, los gobiernos han adoptado paulatinamente los llamados modelos de gestión integral de residuos sólidos (GIRS)².

➤ **Generación de Residuos Sólidos**

La región de América Latina y el Caribe es la más urbanizada de los países en desarrollo, con alrededor de un 80% de su población viviendo en áreas urbanas. La región continuará urbanizándose alrededor de las próximas dos décadas, cuando la proporción de la población urbana alcanzará un 85%, y para el año 2050 llegará a casi un 90%.

Los residuos generados están compuestos por residuos orgánicos (restos de alimentos), cartón, papel, madera y en general materiales inorgánicos como vidrio plástico y metales. Estos residuos provienen generalmente de actividades domésticas.

²Rondón Toro, et al, Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios, MANUALES DE LA CEPAL [en línea]. 2016 pag. 4-5.

Grafico 4: Basura doméstica (Quito Ecuador)



Fuente: Imagen extraída del diario el Comercio Quito Ecuador 2014

Se estima que esta tendencia continuará incrementándose en el tiempo, siendo las megaciudades los más grandes generadores de basura en espacios que concentrarán preferentemente los mayores niveles de crecimiento de la población. El aumento de la población urbana en espacios específicos se asocia a mayores demandas por equipamiento e infraestructura, lo que implica un cambio sustantivo en su desarrollo y un incremento en los volúmenes de RSU. Según el “Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2015”³, Su cuantía varía entre las distintas localidades de acuerdo a una serie de factores que influyen en su determinación, tales como desarrollo económico, nivel de ingreso, sectores de actividad predominantes, patrones de consumo, cantidad de población de la localidad, grado de urbanización y densidad poblacional, entre otros⁴.

La evaluación regional⁵, estimó que la generación per cápita de residuos sólidos domiciliarios (RSD) en América Latina y el Caribe (ALC) llega a un promedio de 0,63 kg/hab/día, mientras que la de residuos sólidos urbanos (RSU) asciende a 0,93

³ Martínez Arce et al , 2010

⁴ Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos. [en línea]. Morelos México; Comisión eléctrica federal; 2012.

⁵ Martínez Arce, 2014

kg/hab/día. Los indicadores per cápita obtenidos para la región implican una generación urbana diaria aproximada de 295.000 ton/día de RSD y 436.000 ton/día de RSU. Para observar los indicadores de generación de RSU obtenidos para los distintos países de ALC (tabla 1).

Tabla 1: generación percapita de residuos sólidos urbanos en américa latina y el caribe

PAIS	GENERACION (ton/día)	GENERACION (Kg/hab-d)	FUENTE
Haití	1170	0,37	OPS 2009
Guyana	3440	5,33	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Nicaragua	3810	0,73	OPS 2009
Guatemala	4050	2	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Bolivia	4930	0,46	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Paraguay	5100	1,11	OPS 2014
Belize	5500	2,82	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
El Salvador	6670	1,13	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Surinam	6830	1,36	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Ecuador	8350	1,13	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Jamaica	8670	1,5	Binger 2011
Dominicana	8710	0,91	OPS 2014
Cuba	10000	61	OPS 2014
Colombia	10030	0,95	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Perú	10230	1	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Santa Lucía	11600	1,44	UNECLAC 2010
Brasil	11640	0,67	OPS 2014
Costa Rica	12160	1,36	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Venezuela	12750	1,14	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Uruguay	15080	0,11	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Panamá	15590	0,55	OPS 2014
Puerto Rico	15970	2,52	ADS 2013
Argentina	16000	2	Fiuba– Ceamse 2011
Chile	15580	1,1	Pucv –Conama 2006
México	17270	1,24	Hoorweg and Bhada-Tata 2012
Barbados	19320	1,69	OPS 2005

Fuente: PPC The Economist 2014. “La cantidad de intervalos se determinó con la regla de Sturges (Schuenemeyer y Drew, 2011)”

Como se puede observar en la tabla 1, los volúmenes de generación de residuos sólidos urbanos son elevados principalmente en los países con alta densidad demográfica, La gestión integral de estos residuos continúa siendo un tema pendiente para América Latina y el Caribe (ALC)⁶.

Grafico 5: Relleno Sanitario Colapsado en Costa Rica



Fuente: Imagen extraída del diario La Nación, (San José Costa Rica 2015)

De acuerdo con el Banco Mundial, se proyecta que la generación de RSU en esta área del mundo pasará de las 130 millones de toneladas que se produjeron en el 2012, a 220 millones de toneladas en 2025 ⁷. Lo cual haría imposible de tratarlos en rellenos sanitarios porque estos colapsarían causando graves problemas.

Los indicadores de generación de RSU de los distintos países presentan valores que oscilan entre (0,46 Kg/hab/día a 0,49 Kg/hab/día) para Bolivia y (0,79 kg/hab/día a 1,25 kg/hab/día) para Chile. En general, las tasas de generación calculadas guardan relación directa con indicadores de actividad, tamaño poblacional y desarrollo de los distintos países.

⁶ Alfredo Rhim. Residuos sólidos situación en américa latina. RELAGRES [en línea]. 13 junio 2017.

⁷ Hoornweg y Bhada-Tata 2012

Tabla 2: Generación de RSU per cápita

Países/Region	Kg/hab/día
Estados Unidos	2,008
Suiza	1,95
Alemania	1,59
España	1,59
Reino Unido	1,56
Italia	1,51
Francia	1,48
Suecia	1,42
América Latina y el Caribe	0,93

Fuente: OPS/OMS-AIDIS-BID, 2010, e información en línea de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) [En línea] <http://www.oecd-ilibrary.org/environment/oecd-factbook-2010/municipal-waste_factbook2010-64-en>.

Del mismo modo como se muestra en la tabla 2, los países de Europa junto a Estados Unidos son los mayores generadores de residuos sólidos donde por necesidad están obligados a tratar de otro modo estos residuos ya que los rellenos sanitarios serían insostenibles para estos países, mientras que en América Latina la generación es todavía bajo en comparación a Europa lo que hace posible innovar nuevos modos de tratamiento para mitigar los daños antes que incrementen los volúmenes como en Europa y EEUU.

➤ **Reciclaje y aprovechamiento**

“Los países de América Latina y el Caribe aún no han superado la visión tradicional de recolectar, transportar y disponer los residuos en el exterior del casco urbano, es decir que no existe una separación previa en el lugar de origen. Muy pocos países tienen plantas formales para la segregación y reciclado de los residuos. El reciclaje formal representa poco más del 2% de los residuos municipales”⁸. La actividad está estrechamente ligada a la informalidad y la inseguridad sanitaria, y está basada

⁸ OPS, 2005 y Martínez Arce et al, 2010

fundamentalmente en el valor económico de materiales que ya tienen demanda en el mercado (papel, cartón, latas y vidrio)⁹.

Muchos habitantes de países como Colombia y del Caribe se dirigen a lugares donde existen concentraciones de basura para poderlos reciclar, corriendo riesgos de contraer cualquier tipo de enfermedades, esta actividad está ligada directamente con peligros sanitarios.

Grafico 6: Reciclaje Informal en Relleno Sanitario de Colombia



Fuente: Relleno sanitario en Colombia, “niños reciclando en presencia de animales y aves corriendo riesgos enormes. Disponible en: <http://seminariorelagres2017.org/wp-content/uploads/2017/06/B1-2presentacion-Alfredo-RHIM-Seminario-RELAGRES17.pdf>

Según estimaciones de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), aproximadamente 400.000 habitantes de la región trabajan en el sector informal de reciclaje de los residuos, en su gran mayoría, población que vive en extrema pobreza. En algunos países, se observan iniciativas de inclusión del sector informal, como el caso de Santiago de Surco (Perú). También existen proyectos de asociación público-privada para la recuperación y reciclaje, como es el caso de Cuenca (Ecuador). (Colombia y

⁹ ONUHABITAT, 2012

Argentina) (Que tienen plantas de tratamiento por Pirolisis y Gasificación) y el Caso de México que aprovechara su Basura para Mover el Metro.

Buenas prácticas para la inclusión social, el caso de Santiago de Surco Perú

En el 1996, la administración distrital adoptó un conjunto de acciones para mejorar el servicio de recolección de los residuos: se pasó a la gestión directa de todos los componentes del servicio, incluso aquellos que hasta ese momento habían sido encomendados a terceros. “En Surco la Basura Sirve” la compañía Nipona en el año 2015, inició el “Programa de Basura cero”, a través de dos métodos (biológico y térmico a nivel piloto) de tal manera aprovechar los residuos sólidos en su totalidad y tratar de reducir los volúmenes acumulados en los vertederos, con el fin de producir electricidad.

Las corporaciones de recicladores en Cuenca, el caso de Cuenca, Ecuador

Cuenca es la tercera ciudad del Ecuador por número de habitantes después de Guayaquil y Quito. La creación de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC) a final del año 2008 representó una novedad en el ámbito de las políticas para la gestión integrada de los residuos, con el objetivo de producir compost y humus, y últimamente el aprovechamiento total de la basura utilizando métodos de transformación térmica y biológica para generar electricidad, para evitar la contaminación de las fuentes de agua y suelos.

EL PLAN A TRES AÑOS: BASURA DE CDMX MOVERA AL METRO

Instalaran planta para convertir residuos sólidos urbanos en energía, solo el 9 % de desechos terminaran en Rellenos Sanitarios.

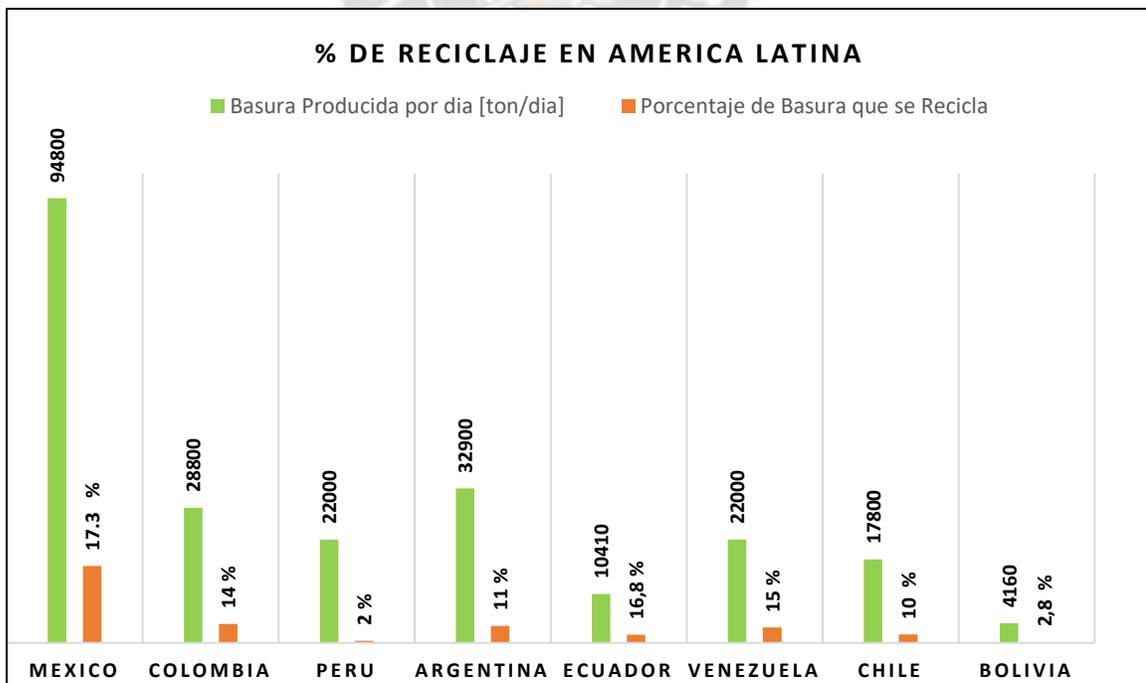
El Gobierno Mexicano plantea Reducir en tres años el desperdicio que termina en los rellenos sanitarios, de ocho mil 600 toneladas diarias a solo 200. Para ello se construirán dos plantas que transformarán la basura en energía eléctrica bajo normas ambientales muy estrictas, se planea concluir estas plantas para el 2020.

A pesar de estas experiencias, hacen falta más iniciativas que tengan en cuenta la necesidad de incluir a los actores informales y el potencial económico de la actividad.

“Para el caso del aprovechamiento de residuos a través del compostaje, es posible decir que, pese a que la materia orgánica representa un alto porcentaje de los residuos sólidos en la región, las prácticas de compostaje no se encuentran proporcionalmente desarrolladas. En general, la falta de guías para la aplicación de tecnologías apropiadas para la región y la falta de estándares de calidad para el producto final conspiran contra su progreso”¹⁰.

En México las toneladas existentes de basura en la CDMX se encargarán de mover el metro con energía procedente de la basura mediante transformación con tecnología de plasma y otras formas de generación de energía son evidentes tales como el biogás, biodiesel. Son aprovechados en México para reducir sus volúmenes enormes de residuos sólidos y precautelar la calidad de vida de sus habitantes y el medio ambiente. De toda la basura en el planeta, en América producimos el 12 %; esto equivale aproximadamente a 160 millones de toneladas anuales.

Grafico 7: Reciclaje en américa latina



Fuente: Valeria Avascua, México OPS 2012

¹⁰ OPS/OMS-AIDIS-BID, 2010

Por otra parte, como se puede observar en el grafico 7 se llega a concluir que América latina (los países mencionados) en materia de reciclaje, se estima que únicamente el 11.11 % en promedio de los RSU se recicla dentro de esquemas formales, mientras que en el sector informal se estiman que unos 4 millones pertenecen a este sector y Aportan aproximadamente el 25%-50% de toda la recolección de RSU en la región de ALC.

Sin Embargo, todo lo que no es reciclable y lo que no es reciclado son depositados en vertederos y rellenos sanitarios a cielo abierto.

El Aprovechamiento de RSU para el campo energético existe interés. Por ahora existen Plantas y proyectos en operación importantes reportados, a excepción de iniciativas en territorios del Reino Unido y Francia como Bermuda y Martinica respectivamente. Existen proyectos implementados de captura y uso de biogás de relleno sanitario.

Grafico 8: Aprovechamiento térmico de residuos sólidos urbanos



Fuente: Colombia se apresta a transformar la basura en energía para reducir sus grandes volúmenes. Disponible: <http://seminariorelagres2017.org/wp-content/uploads/2017/06/B1-2presentacion-Alfredo-RHIM-Seminario-RELAGRES17.pdf>

Por otro lado, Bolivia y Perú son los países con niveles de reciclaje más bajos. En el caso de Bolivia, el problema va más allá de no separar los residuos: en 2014 se estimó

que únicamente el 40 % de la basura generada en el país lograba llegar a rellenos sanitarios legales a pesar de existir recolección pero estos son depositados a cielo abierto¹¹.

➤ **Recolección y disposición Final**

La región presenta una alta cobertura de recolección de desechos, donde el 93,4% de la población urbana dispone del servicio.

Grafico 9: *Recolección eficiente de RSU en Costa Rica*



Fuente: Imagen extraída del diario el Comercio (San José Costa rica 2015)

Tabla 3: Países de América Latina y el Caribe^a: modalidades de prestación del servicio de recolección por tamaño de población (Porcentaje de población cubierta)

MODALIDADES	Micro	Pequeño	Mediano	Grande	Mega	Grupo
Servicio Municipal	61,3	71	50,7	30,2	21,7	47,4
Contratos de Servicio	25,7	17,6	39,8	58	78,1	42,3
Cooperativas	0,3	0,4	2,1	7,6	0,2	3,1
A Cargo del Gobierno Central	0,9	0,3	0,1	0,2	b	0,6
Cobertura de Recolección	88,2	89,3	92,7	b	100	93,4

Fuente: OPS/OMS-AIDIS-BID, 2010.^a Argentina, Belice, Estado Plurinacional de Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Uruguay y República Bolivariana de Venezuela.^b Sin población de ese tamaño cantidad de habitantes: Micro: ≤ 15.000 Pequeño: 15.001-50.000 Mediano: 50.001-300.000 Grande: 300.001-5.000.000 Mega: > 5.000.000.

¹¹ Elisenda Realp C. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia. MMAyA. [en línea].2011.

Para alcanzar una cobertura total de recolección en la región es necesario ampliar el servicio en las áreas urbanas precarias. Esto involucra ajustes en los equipamientos de recolección (por ejemplo, camiones de menor tamaño o mecanismos no motorizados y manuales para áreas de difícil acceso), plantas de transferencia descentralizadas y sistemas asociativos basados en el reconocimiento e integración de quienes ya están desarrollando esta actividad en los territorios sin tener un reconocimiento oficial.

Grafico 10: Costos de recolección de RSU en América Latina



Fuente: Elaborado con datos de la CEPAL 2014. disponible en: www.cepal.com.mx

Como se puede observar en el gráfico 10 la cobertura de recolección en las ciudades y en el área rural en América Latina alcanza a un 89 % lo que indica que se cuenta casi con servicio eficiente de recolección. Sin embargo la recolección seleccionada es baja, es decir que todo lo recolectado está totalmente mezclado no existe separación previa, los costos de este servicio en promedio en América Latina alcanzan 34 \$us por tonelada, mientras que en otros países varía, tales como la de Argentina 54 \$us por tonelada y

Paraguay 6,6 \$us por tonelada¹². Toda la basura recolectada sin previa separación van directo a los vertederos y rellenos sanitarios la práctica más común en la mayoría de los países de América Latina y el Caribe.

Grafico 11: Práctica común de disposición final de RSU



Fuente: imagen extraída del artículo publicado por la CEPAL 2014

El grafico 11 muestra la forma de disposición final practicada en Guatemala, por otra parte, respecto a la disposición final se puede sintetizar en el siguiente gráfico.

¹² Grau, Javier; et al. Situación de la gestión de residuos sólidos en américa latina y el caribe. BID [en línea] agosto 2015.

Grafico 12: Porcentajes de disposición final de RSU



Fuente: datos extraídos del BID 2014 disponible en: <https://www.iabd.org.bid>

Los residuos generados por un 54,4% de la población urbana son depositados en un relleno sanitario, la técnica más sostenible, en los ámbitos ambiental y sanitario; los desechos de un 18,5% de los ciudadanos terminan en vertederos controlados, una opción que, sin ser ideal, evita los botaderos clandestinos. Los vertederos a cielo abierto reciben los residuos del 23,3% de la población, lo que deriva en enormes riesgos sanitarios e impactos ambientales. Además, en algunos países todavía se practica la quema a cielo abierto (2%) y otras formas de disposición final (1,8%), donde los residuos son desechados directamente a los cuerpos de agua o usados como alimentos para los animales, entre otros.

Tabla 4: Países de América Latina y el Caribe ^a: formas de disposición final por tamaño de población, disposición por población (En porcentajes)

FORMAS DE DISPOSICION	Micro	Pequeño	Mediano	Grande	Mega	Grupo
Relleno Sanitario	33,4	34,4	49,3	73,7	78,3	54,4
Vertedero Controlado	7	10,4	25,6	18,7	21,7	18,5
Vertedero a Cielo Abierto	51,3	46,5	22,2	6,3	b	23,3
Quema a Cielo Abierto	3,6	7,1	0,8	0	b	2
Otras Formas (Cuerpos de Agua, Ríos, etc.)	4,7	1,5	2,1	1,3	b	1,8

Fuente: OPS/OMS-AIDIS-BID, 2010.

^a Argentina, Belice, Estado Plurinacional de Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Uruguay y República Bolivariana de Venezuela.

^b Sin población de ese tamaño cantidad de habitantes: Micro: ≤ 15.000 Pequeño: 15.001-50.000 Mediano: 50.001-300.000 Grande: 300.001-5.000.000 Mega: > 5.000.000.

Las cifras mostradas en la tabla 4, aunque alentadoras (debido a que la utilización de rellenos sanitarios ha incrementado gracias a la política ambiental y a las normativas que exigen los países de la región), a su vez reflejan el importante déficit de infraestructura y la falta de control en la disposición. Todavía en muchas ciudades de ALC, la disposición de residuos sólidos es realizado usando los vertederos no controlados y a cielo abierto, donde, estos métodos no son los más adecuados, porque contaminan el medio ambiente, ocasionan serios impactos ecológicos, y paisajísticos a las poblaciones aledañas¹³.

Por otra parte, los cambios en los marcos institucionales, legales y financieros tienen un impacto directo en la mejora de la disposición final. En el Salvador, por ejemplo, el gran avance de disposición en rellenos sanitarios obedeció a una combinación de instrumentos legales y medidas de estricto cumplimiento, incluido el desarrollo de mancomunidades para la regionalización de la infraestructura

¹³ Rondón Toro, et al, Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios, MANUALES DE LA CEPAL [en línea]. 2016. pag. 26.

Grafico 13: Practica común de disposición final de residuos sólidos urbanos

La Practica más común de disposición final de RSU en América latina son los rellenos sanitarios que consiste en enterrarlos y compactarlos muchas veces en lugares no Aptos para esta practica



Con el método común de disposición final los rellenos sanitarios colapsan (tal es el caso de Bolivia) para prevenir esto hace falta implementar políticas de GIRS e introducir nuevos métodos de tratamiento para su disposición.



Fuente: <http://seminariorelagres2017.org/wp-content/uploads/2017/06/B1-2presentacion-Alfredo-RHIM-Seminario-RELAGRES17.pdf>

En conclusión, la cobertura del servicio de disposición final adecuada (en rellenos sanitarios) de los RSU en América Latina es aproximadamente del 55% es decir que solo ese porcentaje es cubierto y tratado en los rellenos sanitarios, mientras que lo restante es depositado a cielo abierto ya que las capacidades de los rellenos son

rebasados por completo y ya no pueden recibir más basura, lo que implica el colapso total de estos rellenos¹⁴.

En buena parte de la región los costos asociados a la gestión de RSU los cubren directamente los municipios. La recuperación de costos promedio alcanza el 51,6%. Municipios que cuenta con planes de manejo de residuos sólidos es de 19,8%. Sin embargo esto no es suficiente debido al constante incremento de los residuos sólidos y que los rellenos sanitarios en el tiempo se harán insostenibles¹⁵.

Sin Embargo, países como México y Costa Rica han gestionado como un método de disposición final la recuperación de energía y el aprovechamiento energético de los RSU, como parte de su gestión integral de residuos sólidos debido al trabajo insostenible en los rellenos sanitarios porque estos podrían colapsar.

1.1.2. Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

La gestión de residuos sólidos en Bolivia no ha sido una prioridad constante por lo que no se han desarrollado políticas eficientes de gestión y manejo de residuos sólidos a nivel nacional y subnacional.

El marco legal específico para el manejo adecuado de residuos sólidos urbanos, no hace énfasis a la gestión integral de residuos sólidos urbanos y peor a la forma de disposición final.

El mal manejo de la basura desde el lugar de origen, el sistema de recogida, la disposición final ha afectado no solo a la salud humana, sino a todos los seres vivos. Se sigue fomentando la instalación de rellenos sanitarios que finalmente contribuyen al cambio climático, la utilización de vertederos se ha convertido en un fenómeno que hace difícil que se tenga una gestión eficiente de residuos sólidos, las causas para que exista una mala gestión y la aparición de vertederos clandestinos son el consumismo

¹⁴ Rondón Toro, et al, Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios, MANUALES DE LA CEPAL [en línea]. 2016. pag. 25.

¹⁵ Grau, Javier; et al. Situación de la gestión de residuos sólidos en américa latina y el caribe. BID [en línea] agosto 2015. N° 23 pag. 2.

desenfrenado, generando cantidades excesivas de residuos que no pueden ser reutilizados, a esto acompaña la migración del área rural hacia el área urbana lo cual es causante del aumento de residuos sólidos y cada vez se hace más difícil tener un sistema eficaz de GIRS como lo de Japón.

Grafico 14: Gestión de Residuos Solidos



Fuente: disponible en: http://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/girs_esp.pdf

A nivel general, la prestación de los servicios de aseo en las ciudades, se limita a atender los servicios de barrido, recolección y transporte y en algunos casos la disposición final de residuos sólidos sin la visión de implementar una gestión integrada que incluya la prevención y el aprovechamiento de los residuos sólidos. Las dificultades radican principalmente, en la falta de políticas, personal capacitado, recursos económicos y financieros, entre otros.

Los volúmenes de residuos sólidos ha aumentado cada año, debido a los factores como el cambio en la conducta y hábitos de consumo de la sociedad, como el incremento en la producción de productos con envases descartables, están generando diferentes tipos de residuos sólidos, cuyo tratamiento y disposición final requiere de mayores recursos tecnológicos y económicos.

El constante incremento de residuos, su variada composición y el manejo inadecuado de estos, está incidiendo directamente en el deterioro al medio ambiente, la salud de la población y principalmente está contaminando fuentes de agua para consumo humano¹⁶.

➤ **Crecimiento demográfico**

El crecimiento demográfico ha contribuido notablemente al aumento de los residuos sólidos en Bolivia. De acuerdo al censo nacional de población y vivienda, realizado el 21 de noviembre de 2012, reveló que la tasa de crecimiento de Bolivia, constituye la más alta de América Latina, con un promedio anual de 2.03 %, que significa un total de 10.389.913 de personas, es decir, 2.115.588 más que en el 2001, de acuerdo al INE. Según las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística hasta el 2016, la población ascendía a 10.985.059, suma un total de 11.145.770 habitantes¹⁷, lo que representa una de las causas para que se genere más residuos sólidos urbanos y rurales.

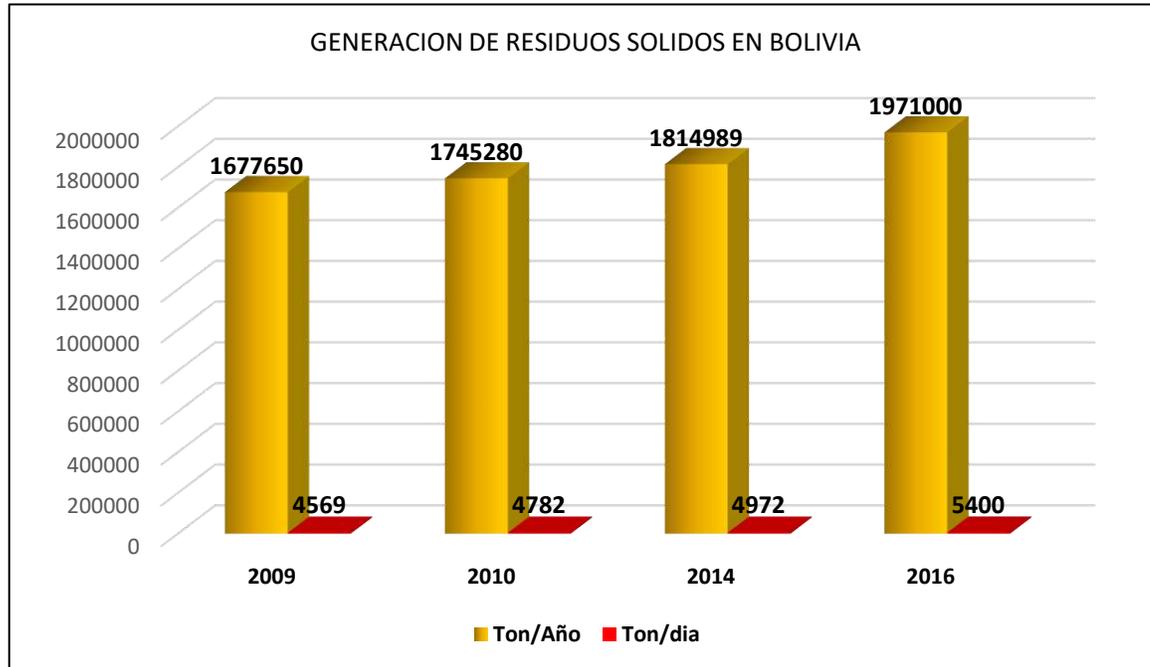
➤ **Generación de residuos sólidos**

Los volúmenes de generación de residuos sólidos se han incrementado considerablemente. Se calcula que la producción per-cápita (ppc) nacional de residuos sólidos domiciliarios en el área urbana es de 0,50 Kg/habitante-día y en la rural de 0,20 Kg/habitante-día y el es de 0,58 kg/hab-día.

¹⁶ Elisenda Realp Campalnas. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia. MMAyA. [en línea].2011. pág. 17

¹⁷ Crecimiento demográfico. [en línea]. Bolivia; Instituto Nacional de estadísticas INE; 10 de julio 2018.

Grafico 15: Generación de RSU en Bolivia



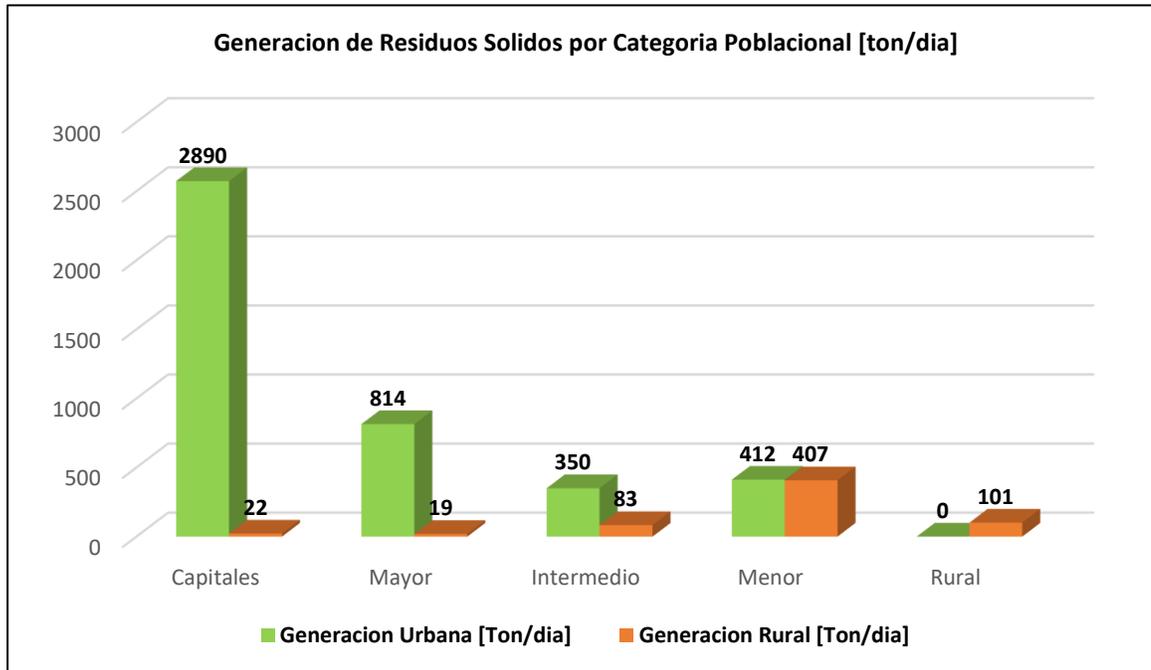
Fuente: INE 2015, disponible en: <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/category/100-junio-2016>

En el año 2009, la generación total de residuos sólidos fue de 1.677.650 ton /año equivalente a 4.569 ton/día; para el año 2010, la generación se incrementó a 1.745.280 ton /año equivalente a 4.782 ton/día, en el año 2014 se incrementó 1.814.989 ton/año equivalente a 4.972 ton/día, y en el año 2016 se registró un total 1.971.000 ton/año equivalente a 5.400 ton/día de los cuales el 87% se genera en el área urbana y el 13% en el área rural¹⁸.

En base a las categorías poblaciones identificadas, en el siguiente gráfico se muestran los datos de generación a nivel de país.

¹⁸ Generación de residuos sólidos. [en línea]. Bolivia; Instituto nacional de estadísticas INE; junio 2016.

Grafico 16: Generación de Residuos Sólidos por Categoría Poblacional [ton/día]

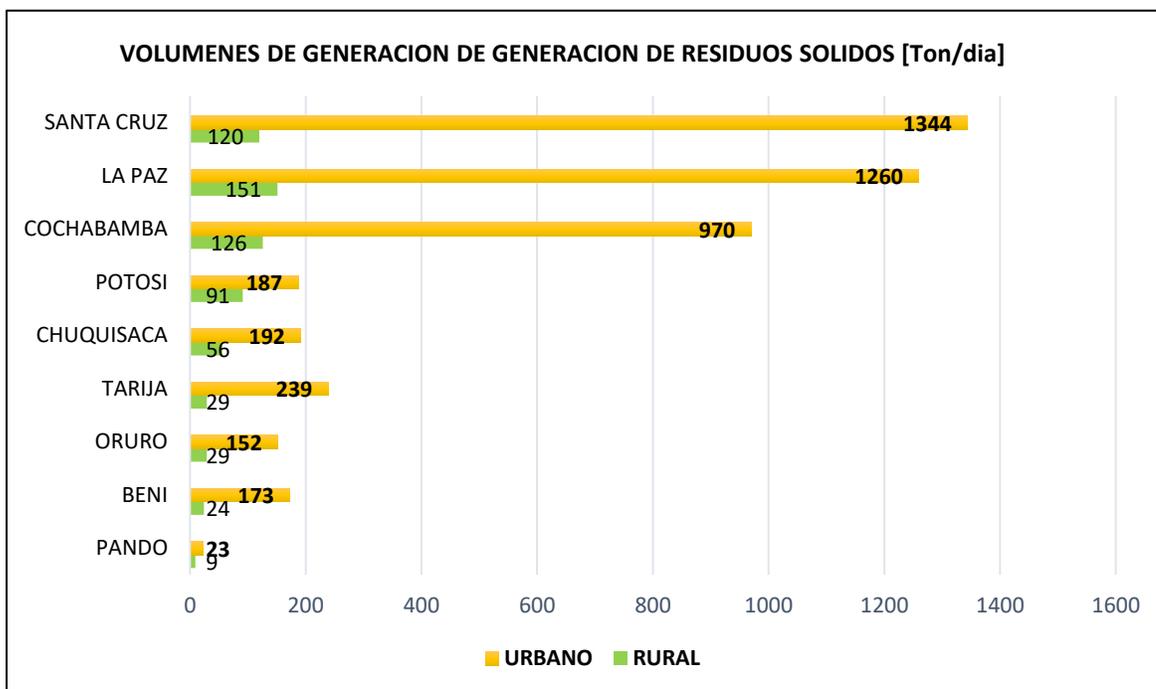


Fuente: Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia, 2014 disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/DATOS-GENERALES.pdf>

Como se puede observar en el gráfico 16, en las ciudades capitales se genera la mayor la cantidad de residuos sólidos con el 54,3% respecto del total, en los municipios mayores el 17,4%, en los municipios intermedios el 9,1%, en los municipios menores el 17,1% y en el área rural el 2,1%.

A continuación, se observa la producción de residuos Sólidos por día en Bolivia por departamentos hasta el año 2016.

Grafico 17: Generación total de residuos sólidos En Ton./día



Fuente: Generación de residuos sólidos en poblaciones urbanas y rurales por departamento. INE 2015.
 Disponible en: <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/category/100-junio-2016>

En el gráfico 17 se puede observar la generación de residuos sólidos por día en el área urbana y rural, del total nacional diario, el 87% (4.160 toneladas) se genera en el área urbana y el restante 13% (622 toneladas) en el área rural.

Se estima que el año 2017, la generación de RSU fue 1.986.989 toneladas para el área urbana y de 242.166 toneladas para el área rural. Sin embargo, cuando se hace un análisis según el índice demográfico, la producción de desechos sólidos per cápita varía, pues en capitales donde hay una población mayor a los 500 mil habitantes, la generación por persona llega a 5,3 kilos por día. En contraste, en las poblaciones donde hay menos de 2.000 habitantes, la producción de basura por habitante apenas es de 2,0 kilos diarios.

Los volúmenes de residuos sólidos generados son elevados y van en aumento por las condiciones ya mencionadas y a esta velocidad de generación los rellenos sanitarios

colapsaran y causaran daños ambientales irreversibles acompañado de riesgos sanitarios para los habitantes que viven cerca de los vertederos¹⁹.

➤ **Reciclaje y aprovechamiento**

A nivel nacional se ha identificado cierta voluntad en la implementación del reciclaje y aprovechamiento de los residuos que son reciclables y orgánicos, principalmente en lugares de alta generación como son los mercados, ferias y en barrios. A nivel nacional se estima que sólo el 4,6% de los municipios han incursionado en esta etapa.

De 2 millones de toneladas al año de residuos sólidos que se generan en Bolivia, al menos el 77% es material aprovechable pero actualmente sólo un 16% es recuperado. La práctica de separación en origen es casi nula. En Santa Cruz Cochabamba y La Paz, se pretende llegar con el primer programa de recolección diferenciada en domicilios a partir del 2019, actualmente este servicio sólo se realiza en mercados y comercios.

Algunas organizaciones no gubernamentales e instancias municipales, están trabajando en la conformación de asociaciones de recuperadores, para que sean incluidos en el ciclo de la cadena productiva de los residuos sólidos y el sector informal sea parte de estas asociaciones.

Por otro lado, el sector productivo ha asumido poca participación dentro de la responsabilidad social empresarial, en la recuperación de los envases y empaques post consumo para su reinsertión en la cadena productiva de los residuos y en la priorización del uso de materias primas reciclables y biodegradables.

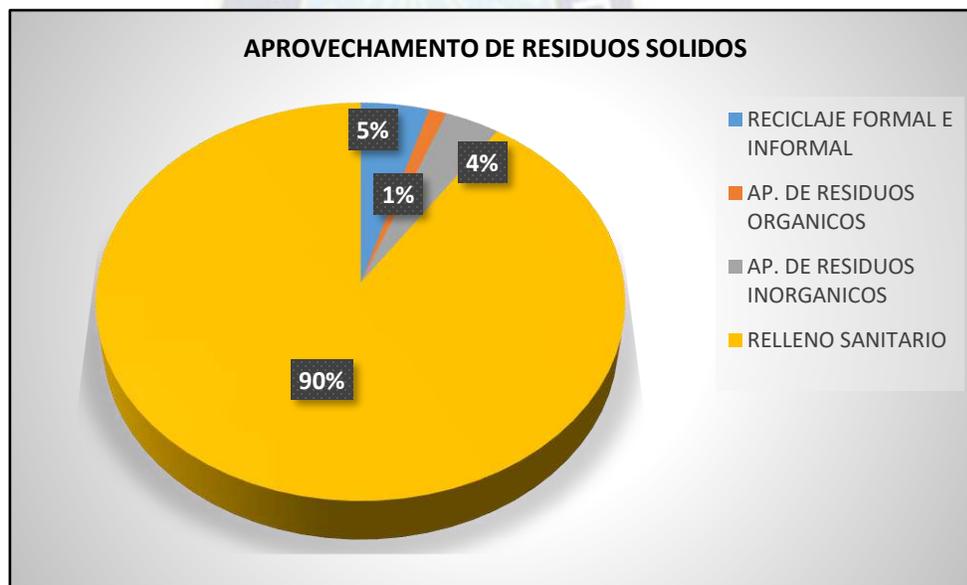
A nivel nacional, sólo el 60% del total de municipios, disponen del servicio de recolección y disposición final. Este porcentaje comprende a los municipios de ciudades

¹⁹ Diagnóstico de gestión de residuos sólidos en Bolivia. [en línea]. Bolivia. Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos; 2015.

capitales, a excepción de Cobija, además de algunos municipios mayores e intermedios, que son los que generan mayores cantidades de residuos²⁰.

Respecto a los residuos de pilas y baterías, por lo general son recolectados y transportados hasta el sitio de disposición final conjuntamente con los residuos domiciliarios, solamente en los municipios del eje troncal del país se han iniciado gestiones de concientización a través de campañas educativas y de operación mediante la implementación de puntos de acopio, recolección diferenciada y disposición final, aunque de manera parcial.

Grafico 18 Aprovechamiento de residuos sólidos urbanos en Bolivia



Fuente: Elaboración propia en base a los datos del INE 2014: disponible en:

<https://www.ine.gob.bo/index.php/medio-ambiente/introduccion-5>

Se estima, del total de residuos sólidos generados anualmente en Bolivia (1,7 millones de toneladas), se aprovecha de manera formal e informal el 4,6%, de los cuales el 0,91% corresponde a aprovechamiento de residuos orgánicos y el 3,7% al aprovechamiento de residuos inorgánicos reciclables y el resto son depositados en los rellenos sanitarios.

²⁰ Vladimir Onny Gutiérrez Ledezma. Diagnóstico de la gestión de residuos en Bolivia. MMAyA. [en línea].2011.

55,2% son residuos orgánicos, 22,1% son desechos reciclables (papel, plástico, vidrios, metales) y el restante 22,7% es basura no reciclable.

Por otra parte, del total de residuos orgánicos generados, se aprovecha el 1,6% y del total de residuos inorgánicos reciclables generados se aprovecha el 16,6%, porcentajes muy bajos en lo que respecta al reciclaje²¹.

Grafico 19: Escaso reciclaje del residuo solido



Fuente: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/DIAGNOSTICO-DEPARTAMENTAL-BENI.pdf>

En el marco del Foro “Gestión Integral de Residuos Sólidos en Bolivia” organizado por la Fundación para el Reciclaje (Fundare)²² Santa Cruz, el 20/05/ 2016, se ha expuesto el tímido avance de Bolivia respecto al aprovechamiento de material orgánico e inorgánico que actualmente es desechado en grandes cantidades en su mayoría aún en botaderos al aire libre con los efectos colaterales para el medioambiente, esto implica que:

“sólo un 16% de nuestros residuos en Bolivia se aprovechan para el reciclaje y otras formas de usos”²³

²¹ Generación de residuos sólidos. [en línea]. Bolivia; Instituto nacional de estadísticas INE; junio 2016.

²² Ciclo del reciclaje. [en línea]. Santa Cruz – Bolivia. Cámara de industria comercio CAINCO; mayo 2016.

²³ Foro del reciclaje. [en línea]. Santa Cruz – Bolivia. Cámara de industria comercio CAINCO; mayo 2016.

A continuación, se detalla los avances en cuanto al reciclaje y el aprovechamiento de residuos sólidos en algunos departamentos.

SANTA CRUZ

En el caso específico de Santa Cruz, la ciudad es la que se genera mayor cantidad de basura en el país, actualmente se inició el servicio de recolección diferenciada solo en los mercados y comercios, pero en el 2019 (Emacruz) pretende entrar a los barrios puerta a puerta de recolección de residuos reciclables.

La producción de residuos electrónicos y eléctricos en Bolivia alcanza al menos los 4 kilogramos por habitante, aún no hay una gestión adecuada de estos cuando cumplen su vida útil. Empresas privadas y algunas instituciones llevan adelante campañas enfocadas sólo en la línea pluma, equipos de telecomunicación y de computación cuya generación es de al menos 2 kilos por persona al año.

COCHABAMBA

Actualmente la compañía papelera (Copelme) recibe 65 toneladas mes de papeles, cartones. Estos materiales son usados para la elaboración de servilletas, papel de cocina y papel higiénico. El reciclaje de plástico se incrementó a 10 toneladas mes que son vendidas por los recicladores a las compañías que fabrican plásticos en el exterior. Tiquipaya y Vinto producen fertilizantes líquidos denominado BIOL utilizando residuos orgánicos y restos de comida sin embargo cinco municipios siguen depositando la basura en botaderos precarios sin reciclar nada. También se recicla el aceite de asbrosterías para producir biodiesel

Grafico 20: Practicas de reciclaje



Fuente: extraído del diario la Razón 5/05/2017(reciclaje de botellas PET)

Aun con estas prácticas de reciclaje no es suficiente para los inmensos volúmenes que se producen.

Grafico 21: Implementación de puntos de acopio



Fuente: GAML 2017

Todas estas prácticas de reciclaje mencionadas y las que se practica en otros departamentos del país solo alcanza al 16 %. el resto son depositados en rellenos sanitarios y por el mismo hecho de que son grandes volúmenes los rellenos sanitarios se hacen insostenibles con el tiempo²⁴.

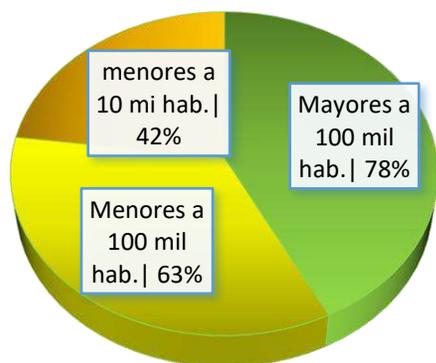
➤ **Recolección y disposición final**

La recolección de residuos sólidos en Bolivia es parte del sistema de gestión integral de residuos sólidos, donde la cobertura de recolección en ciudades capitales alcanza a 86 %, pero las áreas periurbanas y rurales no cuentan con este servicio, y se ven obligados a hacer la quema de los mismos, en ciudades mayores a 100 mil habitantes la recolección alcanza a 78 %, en ciudades menores a los 100 mil habitantes la recolección alcanza a 63 %, y el 42 % de recolección alcanza en ciudades menores a los 10 mil habitantes dentro de ella se encuentran las áreas rurales.

²⁴ Vladimir Onny Gutiérrez Ledezma. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de La Paz. MMAY. [en línea]. 2011.

Grafico 22 Servicio de recolección por cantidad de habitantes

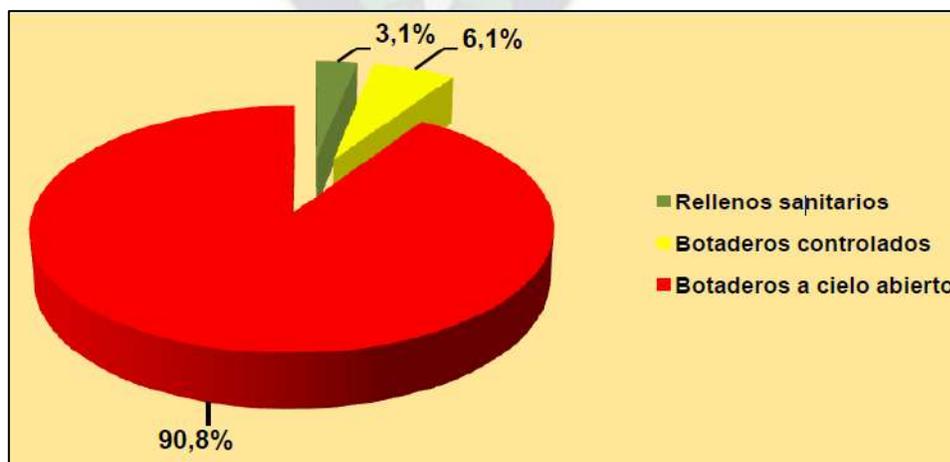
SERVICIO DE RECOLECCION POR CANTIDAD DE HABITANTES



Fuente: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/DATOS-GENERALES.pdf>

Sin embargo, todo el material recogido en su mayor parte se va a los botaderos municipales, hasta el 2001 del total de sitios de disposición final solo el 3.1 % correspondía rellenos sanitarios, en el 2015 el porcentaje se elevó al 55.4%. Pero esta forma de disposición sigue siendo riesgosa para el medio ambiente y los habitantes.

Grafico 23 : Tipos de sitios disposición final a nivel nacional



Fuente: Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia, 2014

De los sitios de disposición final autorizados por los gobiernos municipales sólo el 3,1% son rellenos sanitarios, el 6,1% son botaderos controlados y el 90,8% son botaderos a

cielo abierto, de los cuales cerca del 30% se encuentran próximos a cuerpos de agua que son utilizados para consumo humano y riego²⁵.

Algunos de estos sitios ya están totalmente ocupados y han colapsado, por lo que los municipios buscan nuevos lugares donde depositar la basura, pero las comunidades no se los permite porque se necesitan inmensas extensiones de terreno para proyectar un relleno sanitario y también ningún comunario desea tener montañas de basura en cercanías al lugar donde habitan.

Grafico 24: Formas y porcentajes de disposición final en Bolivia



Fuente: elaboración propia con datos del INE 2017 disponible en:

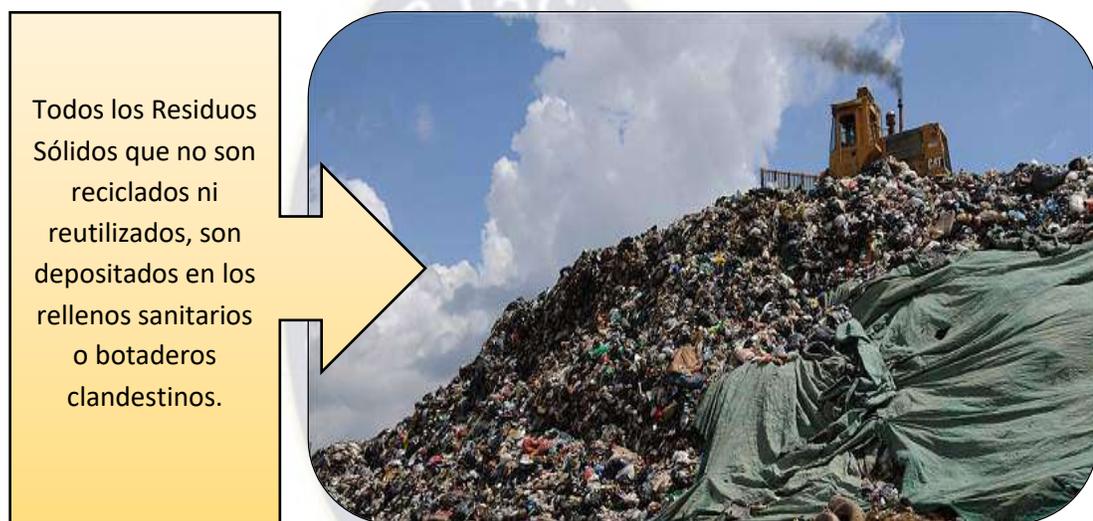
<https://www.ine.gob.bo/index.php/principales-indicadores/item/560-residuos-solidos-en-ciudades-capitales-y-el-alto-llego-a-mas-de-un-millon-de-toneladas>

En Bolivia son generadas cerca de 2 millones de toneladas de basura anualmente. Del total de residuos generados a nivel nacional, aproximadamente el 45% es dispuesto en

²⁵ Gladys Limachi Mamani. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de Beni.MMAyA. [en línea]. 2011. pág. 20.

rellenos sanitarios, el 18% se dispone en botaderos controlados y el 35% es dispuesto en botaderos a cielo abierto. De las que el 70% pueden ser procesadas para mitigar los daños al medio ambiente. El 37% de los botaderos están ubicados en riberas de ríos y otros lugares como lagunas y fuentes de agua que privan a la población del acceso a este recurso.

Grafico 25: Relleno sanitario colapsado



Fuente: Imagen extraída del diario Pagina 7, 12/05/2107. Relleno sanitario de Kara Kara Cochabamba

Del 100% de esta basura, el 70% puede ser reutilizable (reciclable), pero en realidad no se alcanza a ese porcentaje, y todos estos tienen como disposición final los Rellenos sanitarios, sin hacer otro tipo de tratamiento. En general, los rellenos sanitarios que operan en el país presentan deficiencias técnicas y sanitarias, tanto en el diseño, construcción, operación y monitoreo²⁶.

²⁶ Elisenda Realp Campalnas. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia. MMAyA. [en línea].2011. pág. 20-29.

1.1.3. Gestión de residuos sólidos en el municipio de El Alto

En la ciudad de El Alto, aun considerado como municipio todos los días se genera (500-600) tn/día²⁷ de residuos sólidos, debido a su constante crecimiento demográfico, y a la aparición de nuevos productos con envases menos reutilizables.

La gestión empieza con la recolección terminando en su tratamiento y disposición final.

➤ Crecimiento demográfico

Una de las urbes que mayor impacto produce es El Alto; es la segunda ciudad en tamaño en Bolivia, ha crecido a una tasa del 5% anual en las últimas dos décadas, debido principalmente, a la migración de campesinos provenientes del resto del país en busca de mejores oportunidades de vida. Su población es de más de 1.200.000 habitantes según reportes del INE en el año 2016, y representa una causa evidente para la generación de más basura y el incremento de los volúmenes de residuos sólidos.

➤ Generación de residuos sólidos

La generación per cápita (ppc) de residuos sólidos en la ciudad de El Alto alcanza a 0,38 kg/hab/día. Lo que hace posible cuantificar los volúmenes de residuos producidos.

A continuación, se observan las cantidades de basura generada por distritos en todo el municipio de El Alto.

²⁷Residuos sólidos en ciudades capitales y El Alto. [en línea]. Bolivia.

Tabla 5: Generación de residuos sólidos por distrito en El Alto

DISTRITO	Ton/día
Distrito 1	61,69
Distrito 2	40,77
Distrito 3	57,91
Distrito 4	63,88
Distrito 5	50,81
Distrito6	57,99
Distrito 7	14,75
Distrito 8	27,09
Distrito 9	34,7
Distrito 10	10,4
Distrito 11	28,6
Distrito 12	38,9
Distrito 13	53
TOTAL	540,49

Fuente: Registros de EMALTE disponible en: [www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPO-EMALT%20\(Eduardo%20Garay\).pdf](http://www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPO-EMALT%20(Eduardo%20Garay).pdf)

La ciudad de El Alto genera en promedio 540 toneladas de basura por día, y esto tiende a subir en fechas festivas y fines de semana, el 11,42 % es decir 61.69 toneladas sale del distrito 1 (la caja).

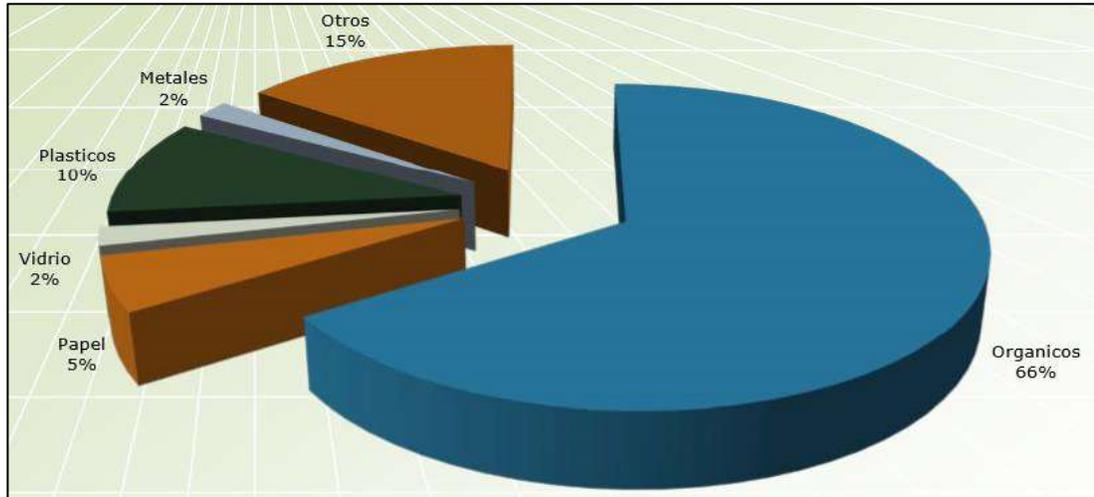
Grafico 26: Relleno sanitario de Villa Ingenio de El Alto



Fuente: Elaboración propia con datos del INE 2016 e imagen tomada del relleno sanitario el 2/02/2017

A continuación, se puede observar los tipos de residuos sólidos que se generan.

Grafico 27: Tipos de Residuo Solidos Generados en El Alto



Fuente: Registros de EMALTE. Disponible en: [www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPO-EMALT%20\(Eduardo%20Garay\).pdf](http://www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPO-EMALT%20(Eduardo%20Garay).pdf)

Se estima que, del total de los desechos, el 36 % es decir 194.4 toneladas está integrado por plásticos, restos de comida, fierro, vidrio, papel, entre otros. El restante 66%, que corresponde a 345 toneladas, está integrado por residuos orgánicos, ropa, cuero, y otros materiales, según datos de la Alcaldía y la empresa Colina encargada del relleno sanitario ²⁸.

➤ Prácticas de reciclaje

En la ciudad de El Alto al igual que en otros departamentos no se practica el reciclaje por completo, del total de basura que se genera el 56% es residuo apto para reciclar, pero solo se recicla un 5 %. Este fenómeno de no practicar el reciclaje es debido a que solo existen al menos 100 tiendas de acopio y reciclaje de basura que trabajan sin licencia municipal, y otras 12 que si tienen autorización. Estas últimas tienen convenios con empresas grandes, lo que más buscan, en ambos casos, son botellas PET. De las 15000 toneladas que se generan por mes, 8400 son aptas para el reciclaje. Estos son recogidos

²⁸ Gestión de residuos sólidos en la ciudad de El Alto. [en línea]. El Alto-Bolivia. EMALTE; 2016.

del botadero municipal de villa ingenio, de los camiones recolectores, de los botaderos eventuales en las esquinas de esta ciudad o a través de tiendas de acopio.

La adquisición es diferenciada si se trata de botellas PET, el kilo cuesta entre Bs 1,30 y Bs 1,50 cantidad que sube a 2 Bs cuando estos acopiadores venden estos productos a las empresas que las reutilizan. En lo que respecta al fierro, el kilo cuesta entre 2 Bs y 2,50 Bs, y cuando es revendido sube hasta 1,50 por kilo. Por lo general se hace tratos con empresas grandes para venderles por toneladas, El negocio es esencialmente familiar.

Por otra parte, los residuos Orgánicos no son reciclados ya que ninguna empresa los procesa y les compra a los recicladores, pero existe una iniciativa por parte del Gobierno Autónomo Municipal de El Alto (GAMEA) para convertir en abono a los residuos orgánicos²⁹.

Grafico 28 : Relleno Sanitario Colapsado



Fuente: Elaboración propia con con foto tomada en el relleno sanitario de villa ingenio el 22/02/2017

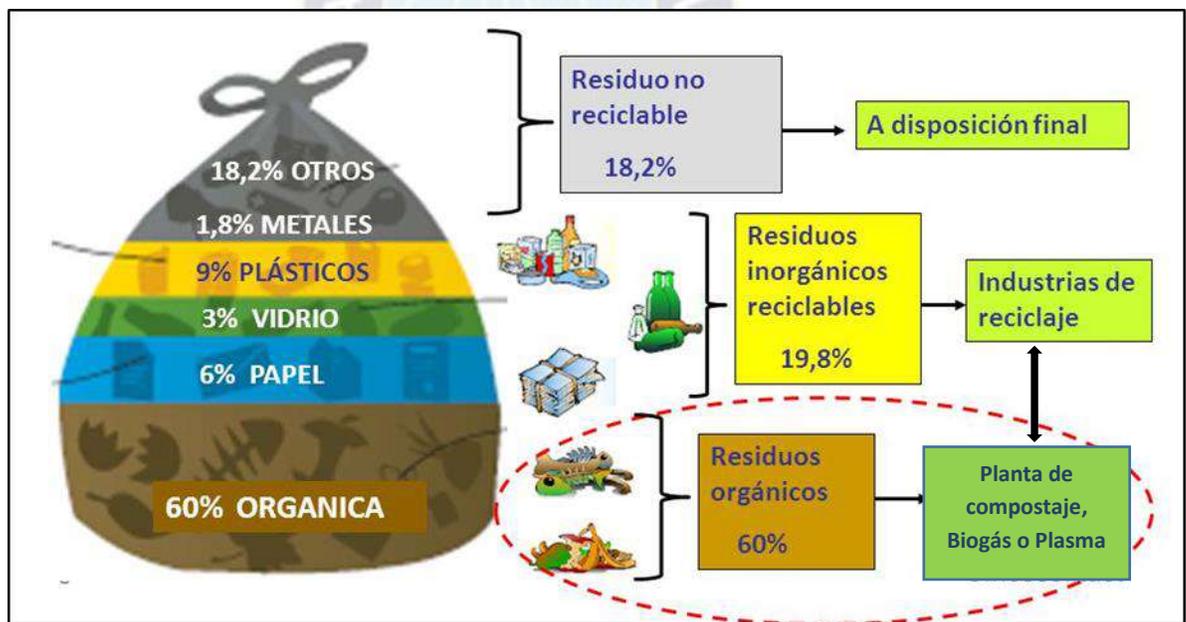
El aprovechamiento de los residuos sólidos valorizables es mínimo, tal que todo llega mezclado al relleno sanitario y personas de bajos recursos son los que ingresan a estos

²⁹ El Alto tiene 12 recicladoras legales y al menos otras 100 son clandestinas. [en línea]. El Alto; Diario LA RAZON; 14 de julio de 2014.

lugares a poder separarlos corriendo graves riesgos de contraer enfermedades justamente porque un relleno sanitario es un foco infeccioso.

La Ordenanza Municipal 184/2011 instruye a los vecinos de El Alto a clasificar su basura antes de depositarla en los carros recolectores, pero nadie lo hace. Los trabajadores de la Empresa de Tratamiento de Residuos Bolivia (Trébol) indicaron “que la gente mezcla desechos de cascaras, vidrios, papeles, cartones, planta y botellas de plástico, e incluso tierra”. Pero como podemos evitar que todo llegue a un relleno sanitario, a continuación veremos cómo podemos aprovechar la riqueza de los residuos sólidos en el Alto³⁰.

Grafico 29: Materiales reciclables en el Municipio de El Alto



Fuente: disponible en: [www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPO-EMALT%2\(Eduardo%20Garay\).pdf](http://www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPO-EMALT%2(Eduardo%20Garay).pdf)

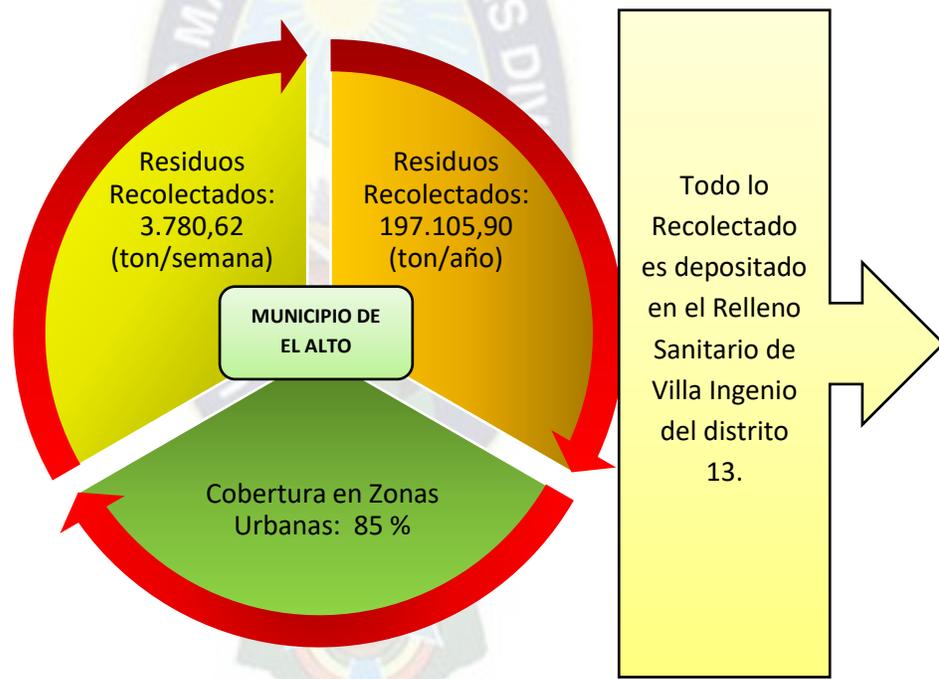
Como se puede observar en el grafico 29 si se reciclara todo lo reciclable desde un punto de vista teórico solo un 18,2 % serian depositados en un relleno sanitario lo cual ari que los vertederos clandestinos desaparezcan y los rellenos duren más tiempo, por consecuente también se frenaría el daño ambiental.

³⁰RECICLAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS CRECE LENTAMENTE EN BOLIVIA. [en línea]. La Paz; diario EL CAMBIO; 24/06/2018.

➤ **Recolección y disposición final**

Los métodos de recolección varían en cuatro modalidades que son: acera, esquina, combinado y por contenedores. La recolección se realiza mediante puntos fijos que consiste en el empleo de contenedores en sus diversas características, en El Alto se emplea esta modalidad particularmente en centros de gran generación. En las diferentes zonas se los realiza mediante el recorrido de camiones que recolecta de todas las laderas y zonas de la ciudad.

Grafico 30: Cantidad de residuos sólidos recolectados



Fuente: Elaboración propia en base a datos del INE 2016

El servicio de recolección en el municipio de El Alto alcanza una cobertura del 85%, cubriendo una recogida de 3.780,62 toneladas por semana y 197.105,90 toneladas se logran recolectar en un año, todo lo recolectado es depositado en el relleno sanitario por

que no existe un previo reciclaje, lo que causa que el relleno sanitario tienda a colapsar por el ingreso de 540 toneladas de desechos todos los días ³¹.

Los residuos sólidos recolectados son dirigidos y depositados en el relleno sanitario de Villa Ingenio una modalidad ambientalmente adecuada para disponer los residuos sobre el suelo debidamente protegido por una capa de impermeabilización de fondo. Los líquidos retenidos por esta capa (lixiviados se recolectan y envían a una planta de tratamiento para evitar la contaminación de la capa freática y del subsuelo). Del mismo modo, los gases generados por la descomposición de la materia orgánica se recolectan y aprovechan quemándolos para impedir la contaminación del aire, pero esta práctica ya no es efectiva cuando el relleno colapsa.

Grafico 31: Relleno sanitario de Villa Ingenio totalmente colapsado



Fuente: Elaboración propia con una foto tomada el 22/02/2017 del relleno sanitario de villa ingenio

Por otra parte, en el grafico 31 se puede observar el relleno sanitario de Villa Ingenio totalmente rebasado. Por qué cumplió su vida útil el año 2015, pero se sigue depositando

³¹ RELLENO SANITARIO DE VILLA INGENIO ESTÁ POR COLAPSAR. [en línea]. El Alto; Diario EL CAMBIO; 27/03/2017.

en el mismo lugar, la basura es acumulada a cielo abierto creando graves riesgos ambientales y para la salud pública en general, principalmente para los habitantes del distrito 13 del municipio de El Alto.

Sin embargo, una vez que el relleno sanitario supera su capacidad esta modalidad de tratamiento se hace insostenible con el tiempo porque cada vez se necesitara más extensión de terrenos, este tipo de disposición final causa daños medioambientales y la creación de focos infecciosos afectando a la salud de los pobladores³².

Tabla 6: Vida útil del relleno sanitario de Villa Ingenio

RELLENO SANITARIO DE VILLA INGENIO DE EL ALTO AL 2015		
PARAMETROS	DESCRIPCION	
Ubicación	A 12 Km del centro Urbano de la Ciudad	
Coordenadas	X:588173	Y:8171494
Superficie	Área Total	20 Has
	Área Utilizada	19 Has
Vida útil	1 año a partir del 2015	
Año de Inicio de Operación	1993	
Capacidad de Recepción para 20 años	420 Ton/día	
Entidad Operadora	COLINA SRL	

Fuente: Datos de EMALTE

En la tabla 6 se puede evidenciar que la vida útil del relleno ha terminado en el año 2013 y estaba proyectado para recibir 420 toneladas día, pero en los últimos años ha recibido más de 600 toneladas día, razón por la que colapso más antes. Sin embargo, en la actualidad 2019 se sigue depositando la basura en este relleno, la superficie se amplió a 46 hectárea desde el 2012 que también está a punto de rebasar, se requieren grandes extensiones de terreno para construir otro relleno que también sería parte de una solución, pero no definitiva se necesitan nuevas alternativas para remplazar y disminuir el uso de rellenos sanitarios.

³²IDENTIFICAN 5 PROBLEMAS EN RELLENO SANITARIO EL INGENIO. [en línea]. El Alto. diario EL CAMBIO; 20/07/2017.

➤ **Uso cada vez más generalizado de los envases sin retorno**

La utilización cada vez más generalizada de los llamados “envases sin retorno” ha producido un aumento importante de residuos de plásticos, papel, cartón, etc. La temprana obsolescencia para muchos artículos como ser artefactos y cubiertas de alimentos que son expedidos en supermercados, en tiendas, etc. Y estos son fabricados con materiales no degradables (vidrio, papel-cartón, metal férreo, aluminio o plástico), lo que se convierte automáticamente en residuos tras un periodo corto de uso.

La existencia de más envases que no son retornables o reutilizables también van a parar al relleno sanitario contribuyendo al incremento de los volúmenes de residuos y es una de las causantes para que colapse el relleno.

Por otra parte el gran desarrollo comercial que existe en el municipio de El Alto donde solo las ferias producen un 20 % de toda la basura generada, y no es el único sector que contribuye al aumento de residuos, también están las industrias manufactureras, las industrias grandes que también producen grandes cantidades de residuos, al igual que todos estos todos van a parar al relleno sanitario sin previa clasificación, pero el problema es que todo lo mencionado causa el colapso del relleno sanitario ocasionando efectos diversos. Que a continuación los detallaremos³³.

➤ **Colapso del relleno sanitario de Villa Ingenio**

En toda la urbe alteña se recogen 540 a 600 toneladas por día de residuos y estos tienden incrementan en fechas festivas hasta 700 toneladas por día (según registros de la empresa Trébol), estos residuos recogidos son dirigidos al sitio de disposición final (relleno sanitario de Villa Ingenio), todos los días ingresan camiones llenos de residuos, en este relleno no se hace la selección del tipo de residuo (Orgánico, Inorgánicos, PET, cartones, etc.) solo se hace una separación previa entre los residuos urbanos y hospitalarios luego son vertidos para luego ser enterrados para la deposición final de la

³³ Colapsa el relleno sanitario de El Alto y contamina a Villa Ingenio. [en línea].La Paz-Bolivia. Diario Página siete; 13 de abril de 2016.

basura, que consiste en depositar en el suelo los desechos sólidos, los cuales se esparcen y compactan al menor volumen posible para que así ocupen un área pequeña.

Con rellenos sanitarios se controla el 50% de los residuos generados y 21% de aprovechamiento. Detalla el ministerio de medio ambiente y agua (MMAyA)³⁴.

Grafico 32: Relleno sanitario de Villa Ingenio del municipio de El Alto colapsado



Fuente: foto tomada del relleno sanitario de villa ingenio de El Alto en fecha 22/02/2017

En el grafico 32 se muestra un relleno ya colapsado y toda la basura que sigue llegando a este sitio son acumulados a cielo abierto donde el viento y las aves hacen su festín en este lugar, creando graves peligros para la salud humana, como la proliferación de Vectores, los olores nauseabundos que se generan en días soleados y la cercanía hacia el área urbanizada, es uno de los sitios de disposición final que más riesgos genera hacia la salud en el distrito 13 del municipio de El Alto.

³⁴Colapsa el Relleno Sanitario de Villa Ingenio. [en línea].La Paz-Bolivia. Diario Página Siete, 12-enero-2017.

➤ **Existencia de riesgos de contaminación**

El relleno al ser un sitio de disposición final es el punto más débil de los procesos de manejo de residuos sólidos urbanos y esto resulta en la proliferación de vectores de contaminación ambiental, que afectan directamente las fuentes de agua, la calidad del aire regional y en ocasiones a los asentamientos de poblaciones cercanas al relleno sanitario.

Existe un evidente daño medioambiental en las zonas aledañas, como ser la: Contaminación de suelos, Pastizales, y sembradíos. Acompañado de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Finalmente, la emisión de gases Tóxicos.

➤ **Creación de focos infecciosos**

El relleno sanitario de Villa Ingenio se ha convertido en un foco infeccioso que pone en riesgo la salud de decenas de pobladores del distrito 13³⁵.

Estos focos se crean debido a que la vida útil del relleno ha terminado y que ya colapso hace 4 años.

La Existencia de plagas y la proliferación de roedores, insectos, vectores y demás focos infecciosos creados, son un peligro constante para la salud pública de los habitantes de este distrito donde esta acantonada el relleno sanitario y los demás efectos que se genera que lo veremos en el diagrama causa efecto.

Las ocupaciones incontroladas de terreno con levados volúmenes de basura producen gases de efecto invernadero, como el metano (CH₄) que es 10 veces más contaminante que el dióxido de carbono (CO₂), por eso y mucho más se debe evitar la utilización de vertederos o rellenos sanitarios una práctica poco amigable con el medio ambiente y la salud pública.

³⁵ Botadero de Villa Ingenio continúa colapsado, denuncian falta de control y supervisión. [en línea].La Paz-Bolivia; diario La Razón; *diciembre 4, 2014*.

1.2. Formulación del problema

La generación de residuos ha existido siempre de manera natural en toda actividad humana, pero en los últimos años a nivel Latinoamérica, a nivel Nacional, y en el municipio de El Alto han creado una preocupación constante debido a factores diversos. En primer lugar, el volumen de residuos generados aumenta cada año, debido al crecimiento demográfico acelerado, a la fabricación de nuevos productos, a la utilización generalizada de envases sin retorno, que presentan cantidades masivas de plásticos, bolsas, cartones, vidrios y metales, etc.

La gestión de los residuos sólido siempre ha representado un problema, principalmente para los países en constante crecimiento y en Bolivia la gestión de residuos es deficiente debido a que no se cumplen con las normativas existentes y los habitantes no están acostumbrados a la cultura del reciclaje.

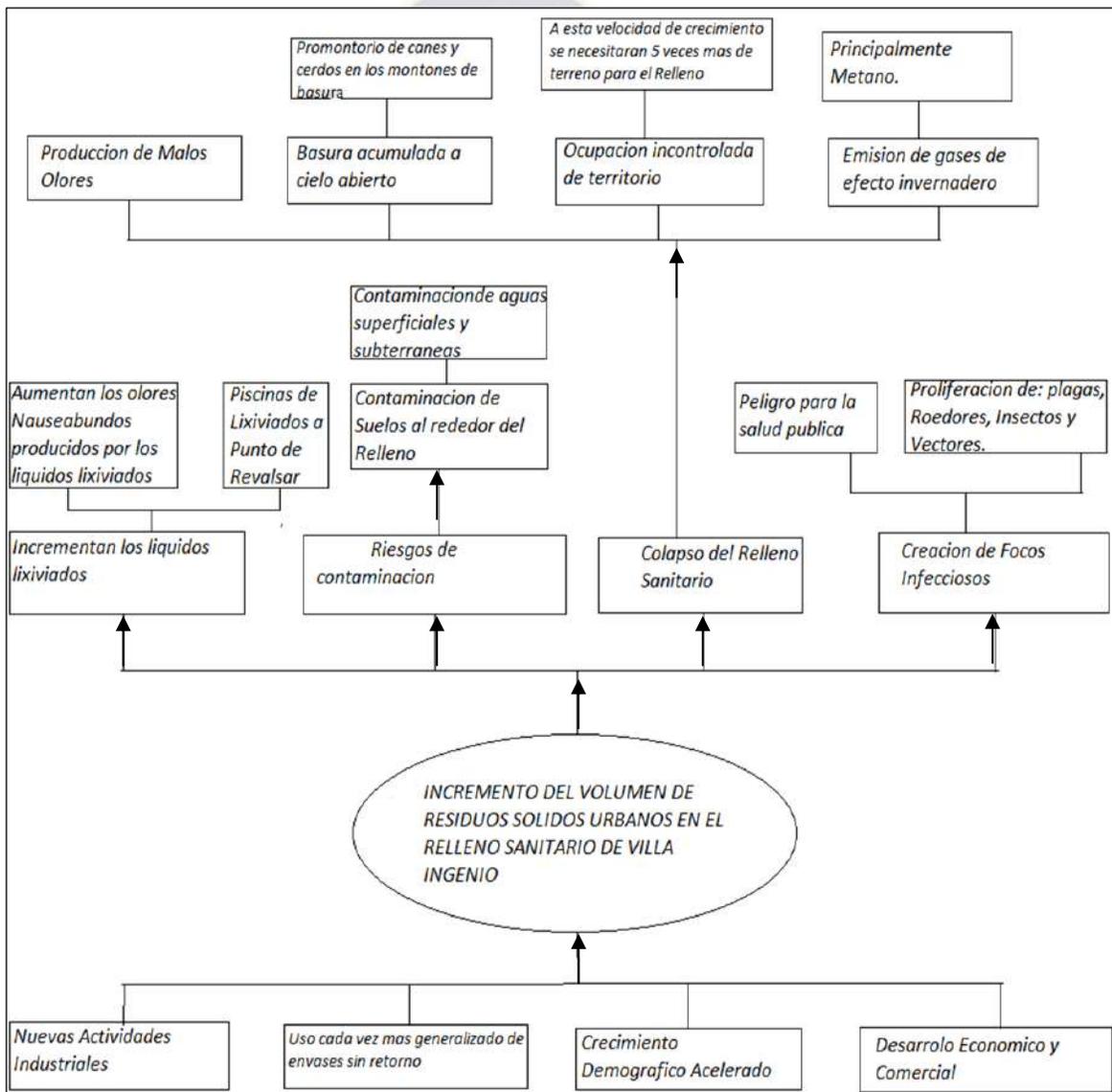
La práctica de disposición final sigue siendo los vertederos o rellenos sanitarios, una práctica muy antigua, solo un 2% de la Basura a nivel Latinoamérica son reciclados, a nivel nacional 56% que se podrían reciclar solo se llega a un 16%, en la ciudad de el Alto varia de (6-8 %) todo lo demás son depositados en rellenos sanitarios.

En las ciudades totalmente urbanizadas; como ser el crecimiento demográfico acelerado, la aparición de más industrias manufactureras, existencia de productos con envases menos reutilizables y los comercios, ocasiona la existencia de más basura en los puntos de disposición final como son los vertederos clandestinos y botaderos a cielo abierto, que causan daños al medio ambiente y a la salud pública.

El municipio de El Alto es considerado una de las ciudades con más crecimiento demográfico y representa una causa para que colapse el sitio de disposición final a pesar que ya termino su vida útil se lo sigue utilizando, ocasionando daños ambientales irreversibles, creando focos infecciosos, peligros para la salud pública y finalmente el requerimiento de grandes cantidades de terreno para seguir con esta práctica que llegan a ser insostenibles con el tiempo.

Sin embargo, al margen de que cada vez exista más basura este puede ser considerado como una oportunidad debido a que los volúmenes generados todos los días en El Alto, estos pueden convertirse en materia prima fundamental como una alternativa para la producción de nuevos productos o servicios.

Grafico 33: Análisis causa efecto



Fuente: Elaboración propia

Cada vez existe más Acumulación de Basura y la descarga indiscriminada de residuos sólidos en un relleno sanitario colapsado como es el caso puede originar riesgos reales para la comunidad y su entorno que se traducen en contaminación de aguas superficiales y subterráneas, contaminación de los suelos y de la atmósfera; deterioro del paisaje; proliferación de roedores, insectos, vectores, cerdos que se alimentan de la basura, aves que pueden llevar enfermedades hacia centros urbanos, etc. Por estos motivos, los residuos sólidos deben ser vertidos en terrenos adecuados (rellenos y vertederos autorizados) o bien desarrollar tecnologías que permitan aprovecharlos como materiales energéticos (combustibles alternativos o energía eléctrica) a través del reciclaje como fuente de materias primas.

Ningún poblador desea tener una montaña de basura en el lugar donde habita principalmente por el olor nauseabundo que desprende en días soleados algo que se puede notar y percibir todos los días.

La gestión de residuos seguirá siendo un reto para las ciudades en constante crecimiento demográfico y es un hecho que la generación de residuos no se va detener.

¿Qué problema se pretende solucionar?

Reducir los volúmenes de residuos sólidos acumulados en el relleno sanitario de Villa Ingenio generados por diferentes causas.

1.3. Objetivo general

Desarrollar un medio alternativo para la reducción de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario mediante el uso de la tecnología de gasificación por plasma para convertirlo en gas de síntesis.

1.3.1. Objetivos específicos

- Determinar los volúmenes existentes y sus propiedades de los residuos sólidos urbanos en el relleno sanitario de villa ingenio del municipio de El Alto.
- Diseñar y construir un prototipo modular en base a la tecnología de gasificación por plasma incluyendo a todas las unidades que participarán en el proceso de conversión de residuos.
- Determinar las condiciones de operación por simulación con Aspen Hysys v.8.8, balances de materia y energía, el grado de conversión luego de la puesta en marcha del prototipo.
- Determinar los costos de construcción del prototipo.

1.4. Justificación

El motivo por el cual se considera importante a este proyecto es porque el sistema actual de disposición final de residuos sólidos urbanos ya no es sostenible, por los grandes volúmenes de basura que se generan y que son causantes del colapso del relleno sanitario.

Es un hecho que la basura siempre va existir y la generación de estos residuos no se va detener y aumentarán cada año, y los rellenos sanitarios requerirán terrenos cada vez más extensos.

1.4.1. Justificación Ambiental

Si bien las alcaldías han ido trabajando en normas orientadas a la reducción de residuos sólidos pero estos no han dado buenos resultados, el proyecto pretende ser una

alternativa real de la siguiente manera: reduciendo la creación de focos infecciosos, la generación de olores nauseabundos, daños a los pastizales y acuíferos, ya no se requerirán superficies extensas de terreno, finalmente se reducirá la contaminación de suelos, ríos y se protegerá al medio ambiente.

Un relleno sanitario ocasiona daños irreversibles hacia los suelos principalmente con los derrames de los líquidos lixiviados y la atmosfera emitiendo gases de efecto invernadero.

1.4.2. Justificación Social

Desde el punto de vista social, el proyecto realizara el proceso de reducción de los volúmenes de basura que existe en el relleno sanitario de villa ingenio, a fin de precautelar la calidad de vida de los habitantes que viven cerca de este relleno.

1.4.3. Justificación Tecnológica

En Bolivia se utilizan rellenos sanitarios como forma de disposición final de los residuos sólidos, mientras que en otros países se están implementando tecnologías necesarias como la tecnología de Plasma para tratar los desechos, es una técnica nueva y emergente aplicada en varios países para generar energía eléctrica y reducir la acumulación de los mismos. El proceso está probado según normas ambientales a nivel internacional contando con requisitos mínimos de funcionamiento.

Esta tecnología utiliza calor térmico para la destrucción y ruptura de sus enlaces moleculares de la basura ionizándolos por completo, convirtiéndose en un gas de síntesis (CO y H₂) que es utilizado como materia prima para múltiples procesos.

1.4.4. Justificación Académica

Desde el punto de vista académico el proyecto pretende contribuir al conocimiento de los estudiantes, y a todos aquellos que estén interesados a que la basura como tal tiene usos y en un futuro podría ser materia prima fundamental.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1. Marco conceptual

➤ Residuos sólidos urbanos (Basura)

Los residuos sólidos urbanos aquellos designados vulgarmente con el término "basura", Según la procedencia y naturaleza de estos residuos se clasifican en:

- a) Domiciliarios o aquellos generados en las actividades domésticas.
- b) Voluminosos de origen domiciliario, que no pueden recibir el mismo tratamiento que los otros por su tamaño (por ejemplo, muebles, electrodomésticos, etc.).
- c) Comerciales y de servicios. d) Residuos procedentes de la limpieza de la red viaria (calles, jardines, etc.)³⁶.

➤ Gestión de residuos sólidos

“Según Arrieta, la gestión de residuos sólidos “está referida al conjunto de actividades de almacenamiento, recolección, transparencia, procesamiento y disposición final de los desechos sólidos realizados en armonía con los principios de la salud pública, la economía, la ingeniería sanitaria, la conservación ambiental y la estética.”³⁷

➤ Relleno sanitario

“El relleno Sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo, que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública”³⁸

➤ Contaminación

“La contaminación es la introducción de algún tipo de sustancia que atentara contra el normal funcionamiento y equilibrio que ostentaba el medio inicialmente, provocando además un daño casi irreversible”³⁹

➤ Plasma

“En el nivel más elemental, el plasma es solo energía térmica a muy alta temperatura. En la naturaleza, el plasma es producido por un rayo cuando se sobrecalienta el aire

³⁶ Campins Eritja, M. (1994).

³⁷ Comuna Autónoma de Madrid - CAM (1987a).

³⁸ López Bonillo, D. (1994):

³⁹ Arrieta, Ronald, 2008.

alrededor del rayo convirtiendo el aire en plasma con una temperatura de aproximadamente 20.000 °C. Debido a que el plasma se comporta de manera diferente de los tres estados comunes de la materia; sólido, líquido y gas, a veces se conoce al plasma como el cuarto estado de la materia”.

“El Plasma convencional es Aquel gas (Aire, Oxígeno, Nitrógeno, o Argón) ionizado mediante un arco eléctrico, Dentro de la antorcha se crea un arco eléctrico, se hace pasar el aire u otro gas, este se ioniza en ausencia de oxígeno y se convierte en plasma con temperaturas próximas o superiores a los 1300 °C”⁴⁰.

➤ **Gasificación por plasma**

La gasificación por plasma “es un proceso termoquímico que convierte materia orgánica en gas sintético, electricidad o escoria, mediante el uso de plasma. Un soplete de plasma alimentado con un arco eléctrico es utilizado para ionizar gas y catalizar la materia orgánica en gas sintético y residuos sólidos. Comercialmente es utilizado como una forma de tratamiento de residuos y ha sido probado con hidrocarburos.”⁴¹

➤ **Incineración**

“Sistema de tratamiento de basura que opera a 600-800 °C en proceso con oxígeno, y como subproductos se obtienen gases tóxicos”⁴²

➤ **Gas de Síntesis**

El gas de síntesis, también conocido como Syngas, “se trata de un combustible gaseoso que contiene cantidades variables de hidrógeno y monóxido de carbono, mayoritariamente, acompañado de otros gases como pueden ser dióxido de carbono, metano y agua, y que se obtiene a partir de sustancias ricas en carbono (hulla, carbón, coque, nafta, biomasa) sometidas a un proceso químico a alta temperatura.”⁴³

⁴⁰ Zanello, C.M. S.A. 2012.

⁴¹ Tignanelli, Horacio Ed. Amazonas, Medellín, 2010

⁴² Briefing documento n the pirolisis and gasification of MWS.

⁴³ . Moustakasa, Kendricks México, 2015.

2.2. Marco referencial

2.2.1. Tecnologías de conversión de residuos sólidos urbanos

En el anterior capítulo se consideró que los residuos sólidos son una fuente alternativa para la generación de energía debido a los grandes volúmenes existentes en distintos países del mundo. Ahora buscaremos que tecnología es la más apropiada para tratar y valorizar los residuos sólidos urbanos.

Grafico 34: Pirámide del ciclo de disposición final de los residuos sólidos urbanos



Fuente: BIB 2014. Disponible en: www.Bid.org.be

El gráfico 34 es una referencia para disminuir la contaminación ambiental, y donde la recuperación de energía que es la penúltima opción antes de su disposición final en un relleno sanitario si no existe un reciclaje o reutilización de los residuos sólidos.

2.2.1.1. Conversión Biológica

Este proceso es efectuado por bacterias mediante el proceso de digestión anaerobia, donde la fracción orgánica de los residuos se descompone de manera natural en ausencia de aire. Este proceso ocurre en rellenos sanitarios (algunos controlados y otros no)

donde se genera una mezcla de gases, conocida como biogás, cuyos dos componentes principales son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂)⁴⁴.

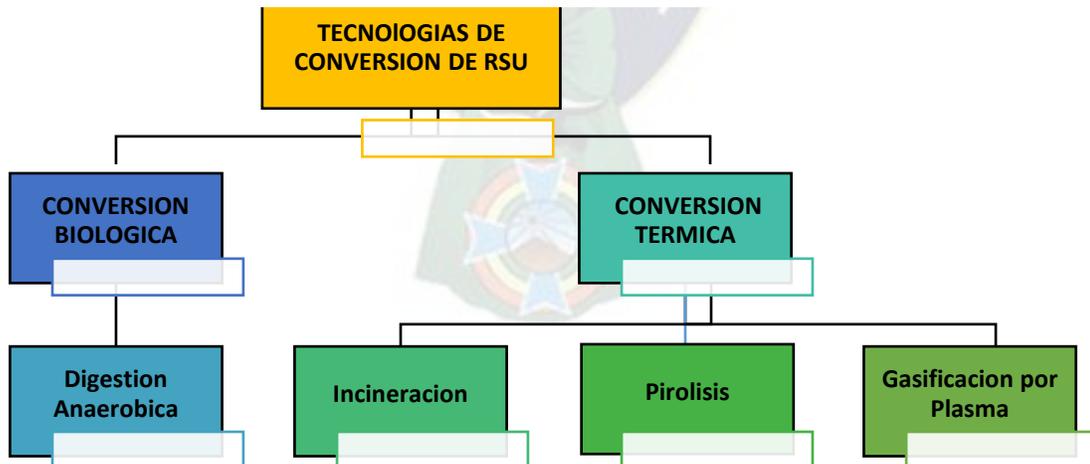
2.2.1.2. Conversión térmica

El proceso térmico consiste en la conversión de los residuos sólidos urbanos en productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas inorgánicas.

La conversión térmica de los residuos puede darse de tres formas diferentes: combustión, gasificación y pirolisis. En la combustión y en la gasificación la reacción química que se produce es exotérmica, lo que significa que se libera energía directamente. Sin embargo, en la gasificación se obtiene un producto gaseoso con un poder calorífico remanente que luego podrá ser aprovechado en una combustión posterior. En la pirolisis, la reacción es endotérmica, pero se obtiene un gas derivado cuyo poder calorífico también puede aprovecharse en una combustión posterior⁴⁵.

2.2.2. Clasificación de las tecnologías

Grafico 35: Tecnologías de conversión térmica y biológica



Fuente: Boletín Instituto de Investigaciones UNAM

⁴⁴ Fernández, J. La Basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. Boletín del Instituto de Investigaciones. [en línea]. Enero – Marzo 2011.

⁴⁵ Ismael Sánchez. Proyecto para la conversión de residuos en energía, [Tesis de Grado en línea], Universidad de Montevideo, Diciembre 2011.

2.2.2.1. Pirolisis, Incineración y gasificación por plasma

➤ Pirolisis

La pirolisis consiste en la descomposición química de materia orgánica y otros materiales (a excepción de metales y vidrios) causada por calentamiento en ausencia de oxígeno (O₂). La aplicación de la pirolisis al tratamiento de residuos ha ganado aceptación en la industria, junto con otras tecnologías avanzadas como la misma gasificación por plasma. Sin embargo, esta tecnología no llega a eliminar los residuos, si no que los transforma en carbón, agua, residuos líquidos, partículas, metales pesados, cenizas o tóxicos, vertiendo al aire sustancias relativamente inocuas en algunos casos, y muy tóxicas en otras. Al tratarse de un proceso de destilación destructiva imposibilita el reciclado o la reutilización. En general, la pirolisis es un proceso que se utiliza como un tratamiento térmico para reducir el volumen de los residuos y producir combustibles como subproductos. Se puede observar que los objetivos finales difieren de los que se quiere alcanzar con la tecnología de gasificación por plasma, que permite la eliminación total de los residuos, así como el aprovechamiento de los subproductos a diferentes niveles industriales. Además, no genera sustancias tóxicas en ningún caso.

➤ Incineración

El proceso que se conoce comúnmente como incineración consiste en la combustión completa de la materia hasta su conversión en cenizas. Debido a la utilización de altas temperaturas, entra en la categoría de "tratamiento térmico" de residuos, de la misma forma que la gasificación por plasma. La incineración se lleva a cabo en hornos mediante oxidación química en exceso de oxígeno. Sus productos principales son cenizas, gases, partículas tóxicas, así como calor, que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica. Este método de eliminación de residuos es un proceso probado y viable, y que hoy en día es la opción más utilizada en naciones industrializadas como Suecia o Japón. Sin

embargo, su supervivencia se encuentra hoy en día en la cuerda floja, siendo un proceso fuertemente criticado por sus efectos nocivos sobre la salud, su alto precio económico y su insostenibilidad a nivel energético.

➤ **Gasificación por plasma**

La Tecnología de Gasificación es un proceso de transformación térmica en estado de plasma, cual convierte los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en gas combustible denominado gas de síntesis o "Syngas".

La Gasificación de RSU es un proceso único que separa los residuos en sus componentes básicos y da la posibilidad de producir electricidad en forma rentable, sin contaminar el medio ambiente. Es un producto que puede ser empleado para producir combustibles, productos químicos o energía eléctrica y térmica.

A diferencia de la Incineración, la Gasificación realiza la reducción o transformación de RSU en ausencia de oxígeno y a temperaturas más altas, evitando las emisiones de CO₂ a la atmósfera

2.2.2.1.1. Ventajas y desventajas

Cada uno de estas tecnologías de conversión térmica mencionadas tiene sus propias ventajas y desventajas.

Tabla 7: Ventajas y desventajas de la incineración

INCINERACION DE RSU		
VENTAJAS	DESVENTAJAS	
Reducción de RSU depositados en vertedero en un 90% - 96%	Presencia de metales pesados	Todos los gases generados se emanan a la atmosfera
Dotación de un valor adicional al residuos	Presencia de Óxidos de Nitrógeno Nox	
aprovecha el calor desprendido durante la incineración	Presencia de Dióxidos de Azufre Sox	
Escoria como producto aplicable en	Monóxido de Carbono	

construcción	CO	
	Gases Ácidos	
	Dioxinas y Furanos	
	PAHs	

Fuente: Alter NRG disponible en: www.alternrg.bogota_colombia

Tabla 8: Ventajas y desventajas de la Pirolisis

PIROLISIS	
VENTAJAS	DESVETAJAS
Maneja todo tipo de material orgánico con alto valor calórico, inclusive mezclas de residuos domésticos e industriales peligrosos.	No elimina los residuos, os transforma en carbón
Los residuos se transforman en una fuente de energía.	Emite gases tóxicos a la atmosfera.
Los residuos se pueden transformar, en algunos casos, en materia prima del proceso.	Al tratarse de un proceso de destilación destructiva imposibilita el reciclado o la reutilización
Permite tratar los lodos de las plantas de tratamiento y suelos contaminados con hidrocarburos.	Emisión de dioxinas y furanos a la atmosfera
Los plásticos, aceites, disolventes orgánicos, compuestos orgánicos clorados, hidrocarburos, materiales contaminados con estos productos, se convierten en hidrocarburos ligeros limpios y carbón.	emisión de óxidos de azufre y nitrógeno NOx y SOx

Fuente: Indecop energías alternativas

Tabla 9: Ventajas y desventajas de gasificación por plasma

GASIFICACION POR PLASMA	
VENTAJAS	DESVETAJAS
El plasma es capaz de tratar de forma eficiente todo tipo de residuos, incluyendo aquello que son peligrosos, tóxicos o letales. Es también el único proceso capaz de reducir residuos electrónicos, que no tienen procesos de biodegradación.	Ciclo del proceso culminado: <ul style="list-style-type: none"> • Óxido de nitrógeno (NOx): <36 ppmvd • • Dióxido de azufre (SO₂): <1,05 ppmvd • • Mercurio (Hg) <1,4 µg/dscm
Este tipo de tecnología permite la evolución del flujo de residuos durante de la vida de la planta.	
La reducción volumétrica de residuos es de 300 a 1, mientras que la incineración convencional trabaja en radios de 5 a 1, debido a las grandes cantidades de cenizas producidas	Frente a la incineración y pirolisis: <ul style="list-style-type: none"> • Óxido de nitrógeno (NOx): 110-205 ppmvd • Dióxido de azufre (SO₂): 26-29 ppmvd • • Mercurio (Hg) 28-80 µg/dscm
La creación de subproductos ecológicos reduce potencialmente los costes de uso de la tecnología, ya que los únicos efluentes sólidos (lava vitrificada) son aprovechables.	
No requiere la utilización de vertederos para subproductos del proceso, como sería el caso de las cenizas de la incineración.	
Hay un mínimo impacto ambiental debido a la ausencia de dioxinas, furanos, cenizas y escorias, hecho que se consigue gracias a la disociación molecular completa.	
A nivel energético es un proceso altamente eficiente, con una producción neta de energía de 1400/2400 kWh/ton, entre 1.5 y 2.5 veces superior a las incineradoras de última generación.	
Se debe suponer un proceso económicamente viable, ya que sus costes operativos son equivalentes a otras instalaciones, y una mayor eficiencia supone un mejor resultado.	
No produce dioxinas y furanos	

Fuente: Alter NRG

En las ventajas y desventajas de estas tecnologías de conversión térmica el que más ventaja saca sobre los demás es la tecnología de plasma⁴⁶.

2.2.3. Instalaciones de plantas de conversión biológica.

2.2.3.1. Instalaciones comerciales de plantas de biogás en Asia y Europa.

El biogás representa uno de los recursos energéticos con mayor potencial de crecimiento a nivel mundial, pero en Europa su producción se está ralentizando según el último informe elaborado por L'Observatoire des Energies Renouvelables (EurObserv'ER, 2014). En Europa, en 2013, aumentó un 11,9% respecto a 2012 pero este crecimiento es inferior al producido en años anteriores.

Se estima que, en Europa, durante el 2013, la energía primaria procedente de biogás superó los 13,5 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep). Esto supuso un aumento del 11,9% respecto al 2012. Sin embargo, este crecimiento es inferior al producido en años anteriores (17% entre 2011 y 2012), debido, sobre todo, a que los dos principales productores, Alemania e Italia, han realizado cambios en sus políticas de biogás. Alemania es el número uno en producir Biogás.

➤ Alemania Productor Numero uno de Biogás

El país dominante que copa más del 50% de la producción primaria es Alemania. Le siguen, con gran diferencia, Reino Unido e Italia, que aportan un 13,5% y 13,4%, respectivamente. España se encuentra en séptima posición y junto a Austria son los únicos países, entre los quince principales productores, que bajan su producción. Según el informe publicado en 2014 por la EBA (Asociación Europea de Biogás), a finales de 2013 en Europa existían más 14.500 plantas de biogás en operación. Alemania es la primera potencia europea en este sector, alcanzando las 9.035 plantas de producción de biogás. Durante ese año cabe destacar el importante crecimiento que tuvo lugar en los

⁴⁶ DIFERENCIA ENTRE INCINERACIÓN, GASIFICACIÓN Y PIRÓLISIS. [en línea]. Chile. PLATAFORMA TECNOLÓGICA; 3 septiembre 2015.

países del centro de Europa: Hungría, la República Checa, Eslovaquia, y Polonia, donde se registró un aumento del 18%.

Alemania Procesa 1.358.568 toneladas cada año de residuos sólidos orgánicos para producir energía eléctrica⁴⁷.

➤ **España produce biogás para generar energía eléctrica.**

El tratamiento de todo tipo de desechos orgánicos (restos de alimentos, hojas, ramas, residuos cloacales, etc.) Constituye actualmente una inversión más que un problema. Además de dar soluciones ambientales, también genera dinero, principalmente para países en desarrollo como el de España.

En el marco del mercado de carbono, que nació a partir del Protocolo de Kioto, con el Mecanismo del Desarrollo Limpio (MDL), los países desarrollados están obligados a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero que produce el calentamiento global. Y una opción es pagar por un proyecto de captación de esos gases en cualquier país en desarrollo o pagar por proyectos que eviten la emisión de más gases contaminantes⁴⁸.

➤ **Reino Unido**

El Reino Unido es el primer productor de biogás en la UE; de hecho, el biogás es la única fuente de energía renovable que está experimentando un crecimiento real en ese país, sobre todo la explotación del biogás de vertedero. El sector contaba con más de 292 MW eléctricos instalados a finales de 1999. El Reino Unido ha conseguido crear un mercado que ha permitido reducir el costo del kWh de 0,09 euros a 0,03 euros en diez años. Posee el 40% de la producción de biogás en la UE⁴⁹.

⁴⁷ Andrés Pascual, Begoña Ruiz. Situación potencial de generación de biogás “Estudio 2011-2020”.Madrid. IDAE; 2011 pag. 10

⁴⁸ El sector del biogas agroindustrial en España.[en línea].Madrid 16 de septiembre 2016.Dirección general de recursos agrícolas y ganaderos.2016.

⁴⁹ Andrés Pascual, Begoña Ruiz. Situación potencial de generación de biogás “Estudio 2011-2020”.Madrid. IDAE; 2011 pag. 24-25.

➤ **Japón Shikoku**

La planta en la isla de Shikoku convertirá 64 toneladas de materia orgánica diario en biogás en un digestor DRANCO de 3.000m³. A continuación, se produce electricidad verde con el biogás.

El proyecto supone una inversión de aproximadamente 20 millones de €. La construcción comenzará a principios de 2017 y la planta procesará los residuos domésticos en abril de 2018⁵⁰.

2.2.3.2. Instalaciones comerciales de plantas de biogás en América Latina.

➤ **Chile convierte desechos agropecuarios en biogás.**

Chile es el gran potencial de América Latina para convertir desechos agropecuarios en biogás solo se materializará si los gobiernos fomentan las energías limpias. “Con tecnologías apropiadas y una buena capacitación, ellos pueden tratar residuos orgánicos como excrementos y orina de animales y residuos vegetales. Así solucionan un problema ambiental, produciendo energía eléctrica y térmica y un fertilizante natural”⁵¹, añade.

- Residuos orgánicos animales y vegetales pueden convertirse en biogás, generando energía eléctrica y térmica a partir de 2000 tn/año de desechos agropecuarios.

➤ **Brasil y México**

Brasil y México son los países latinoamericanos con mayor desarrollo del biogás, seguidos por Colombia y Perú Aunque incipiente, en la mayoría de los países latinoamericanos está aumentando el interés por generar biogás, Si los pequeños agricultores se asocian para producir biogás, pueden venderlo a redes nacionales de gas natural y de electricidad, tal como lo hace en Brasil el Condominio de Agro-energía para la Agricultura Familiar, que vende biogás a la central eléctrica Itaipú Binacional.

⁵⁰ Andrés Pascual, Begoña Ruiz. Situación potencial de generación de biogás “Estudio 2011-2020”.Madrid. IDAE; 2011 pag. 34.

⁵¹ Hernan Romero. Manual de biogas. MINENERGIA[en línea] FAO-2011.

Sin embargo, el número de Biodigestores en la región es mínimo, comparado con los millones que existen en India y China. En Alemania hay cerca de 4.000 funcionando; en México, solo 72⁵².

➤ **Biogás en Bolivia**

La producción de Biogás en Bolivia para fines energéticos a partir de los residuos sólidos orgánicos, aun no existen avances para implementar plantas de este tipo para generar energía eléctrica, pero en algunos rellenos sanitarios, como el de Kara Kara de Cochabamba utilizan los residuos sólidos Orgánicos para producir biol, un fertilizante líquido a través de Biodigestores, pero para el sector energético no existen avances⁵³.

En el municipio de el alto también existe una planta de compost para producir abono orgánico, pero solo procesa el 0,8 % de los residuos orgánicos que se genera.

2.2.4. Instalaciones de plantas con tecnologías de conversión térmica

Dentro de la conversión térmica el más eficiente es la tecnología de plasma que ha sido probado en varios países.

Grafico 36: Residuos empacados para conversión térmica



Fuente: imagen extraída de: <https://www.ineel.mx/boletin012011/inves.pdf>

⁵² Pedro Díaz. La Bioenergía en américa latina y el caribe. RLC-ONU. [en línea]. FAO-2013. ISBN 978-92-5-307734-2 (edición impresa). pag. 16

⁵³ Pedro Díaz. La Bioenergía en américa latina y el caribe. RLC-ONU. [en línea]. FAO-2013. ISBN 978-92-5-307734-2 (edición impresa). pag. 22.

Las tecnologías de conversión térmica se desarrollaron durante un período de más de 30 años y con más de USD100 millones en financiamiento para investigación y desarrollo para solucionar el problema de la basura en países en constante crecimiento y que tenían deficiente acceso a energía eléctrica. En este caso la tecnología de Plasma se desarrolló inicialmente en colaboración con la NASA para usarla en el programa espacial Apolo para simular la reentrada de vehículos espaciales en condiciones de más de 5.500 °C. Entre 1983 y 1990, desarrollaron un reactor usando plasma para la recuperación de chatarra fragmentada. Entre 1988 y 1990, la tecnología de plasma se extendió para el tratamiento de residuos peligrosos incluyendo material de vertedero contaminado, herramientas eléctricas contaminadas con PCB, transformadores y condensadores y los residuos de la industria siderúrgica.

A mediados de los años 90, la NASA en cooperación con Hitachi Metals llevaron a cabo un programa de investigación y desarrollo y un programa de pruebas piloto para confirmar la capacidad de una cúpula de plasma para tratar residuos sólidos urbanos (RSU) y otros materiales de desecho para producir un gas de síntesis que podría ser utilizado en una planta de energía para la producción de vapor y electricidad. Se realizó una serie de pruebas en el Plasma Center en Madison Pensilvania, usando una variedad de materia prima y a diferentes contenidos de humedad.

Los esfuerzos combinados de Hitachi Metals y plasma center (PC) culminaron en una demostración para el Gobierno japonés de que la instalación Yoshii WTE era capaz de utilizar la energía de plasma para gasificar de forma fiable y económica los materiales de desecho para la producción de energía. En septiembre de 2000, la Fundación para la Investigación de Residuos del Japón (JWRF) otorgó un proceso de certificación de la tecnología y nació el gasificador por plasma de Manera formal.

Más recientemente, Air Products compró dos reactores de gasificación por plasma de Westinghouse para la planta de Air Products de 1000 toneladas por día que se construirá en el noreste de Inglaterra.

GTS, con sede en China, completó a principios de 2016, la construcción de una planta de gasificación de plasma que procesará una mezcla de cenizas volátiles de incinerador y residuos peligrosos, incluidos desechos médicos. La planta se encuentra actualmente operando bajo sus criterios de diseño.

En diciembre de 2011, Wuhan Kaidi Holding Investment Co., Ltd. (Kaidi) inició la construcción de un nuevo parque tecnológico en Wuhan, China. Las instalaciones incluyen una instalación de demostración de gasificación de plasma de 150 toneladas diarias comprado que se utilizará para procesar residuos de biomasa y posiblemente MAM (metros de agua marina) para la conversión de energía y combustibles líquidos. A finales de 2014, Wuhan Kaidi finalizó la compra de Rentech, una de las principales empresas de tecnología líderes a pequeña escala de Fischer Tropsch ("FT"). Kaidi se encuentra instalando la tecnología de Rentech en su parque tecnológico y espera tener una planta completamente operativa que gasificará biomasa residual y convertir el gas de síntesis a pies cúbicos líquidos a finales de 2015⁵⁴.

2.2.4.1. Instalaciones comerciales en Europa y Asia

La tabla 10 proporciona un resumen de las instalaciones donde se han implementado y se implementará la tecnología de Plasma.

⁵⁴ Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013.

Tabla 10: instalaciones operativas y nuevas con la tecnología de plasma

	Instalaciones operativas				Nuevas instalaciones	
	Mihama-Mikata	Maharashtra Enviro Power Ltd (MEPL)	Kaidi Sunshine Energy Park	Shanghai Chengtoun (Shanghai Ambiental)	Planta para la energía renovable de Tees Valley	Bijie City Green Environmental Energy Limited
Ubicación	Mihama, Japón	Pune, India	Wuhan, Hubei, China	Shanghai, Jinagding, China	Tees Valley, Inglaterra	Bijie City, China
Propietario		SMSIL	Wuhan Kaidi	GTS	Air Products	GES
Capacidad (tpd)	24	72	150	30	1000	600
Materia prima	20 tpd - RSU 4 tpd - lodos de depuración	Desechos peligrosos varios	Residuos de madera mixta	Desechos médicos/cenizas volátiles de incinerador	RSU organizados	MSW (Residuos sólidos urbanos)
Fecha de puesta en marcha	2002	2009	Cuarto trimestre - 2012	1er trimestre de 2014 - en operación comercial	2014	2017
Rendimiento y configuración	Calor - Caldera	Potencia - Caldera	Etanol - Catalizador	Vapor y escoria inerte (ecológico)	Potencia - Ciclo combinado	Energía - Ciclo combinado

Fuente: Recuperado de Alter NRG Plasma Gasificación Solution julio 2017

Son instalaciones operativas y nuevas que operan de manera comercial para reducir los residuos sólidos urbanos.

➤ Noruega convierte la basura en energía limpia y barata

Noruega transforma las 300.000 toneladas de basura anuales que no pueden ser recicladas en energía limpia. Los desperdicios no aprovechables se queman a 800 grados. El calor resultante sirve para hacer hervir agua y el vapor que se desprende va a parar a una turbina, cuyo movimiento se transforma en electricidad, almacenable y transportable.

Los responsables de coordinar este reto aseguran que la energía que se saca de cuatro toneladas de residuos es equivalente a la que produce una tonelada de combustible fósil. El resultado es combustible más barato, menos desperdicios y menor contaminación, una solución ecológica al problema de los vertederos.

Al agua hirviendo también se le saca partido, pues se canaliza hacia hogares y escuelas de la capital noruega. Las escuelas de Oslo reciben electricidad de estas plantas y casi la mitad de la capital noruega cuenta con calefacción gracias a los residuos domiciliarios. De esta forma se emplea menor cantidad de hidrocarburos, emitiendo menos CO2 a la atmósfera y a la vez se practica una gestión eficaz de los residuos.

Los responsables calculan que en 20 años las emisiones de Noruega se podrían reducir a la mitad utilizando la tecnología de estas plantas. Se utiliza muy poca energía para transportar la electricidad acumulada mediante el tratamiento de residuos, por lo que sale rentable llevarla a otras localizaciones.

La capital de Noruega ha superado de tal manera la capacidad de procesar los residuos de sus 1,4 millones de habitantes que, desde hace años, importa desechos para sus plantas que generan calefacción y electricidad⁵⁵.

➤ **Suecia recicla un asombroso 99 % de su basura y los convierte en energía eléctrica.**

Suecia en la actualidad recicla o reutiliza un increíble 99 % de sus residuos, una cifra que mejora la récord de 2012 que fue del 96 %. El país utiliza un sistema de jerárquico en la gestión de residuos, el cual se centra en la prevención, la reutilización, el reciclaje, las alternativas al reciclado, y como último recurso, la eliminación en vertedero. Mientras que sólo el 1 % del promedio anual de 461 kg de residuos que cada sueco produce, todavía está causando controversia, ya que implica la incineración de alrededor de dos millones de toneladas de basura año.

“Los noruegos y los suecos tienen obsesión por cuidar la naturaleza, su bien máspreciado”⁵⁶.

⁵⁵ BBC Mundo[en línea] Noruega-Oslo; BBC News; Publicado 25 septiembre 2013.

⁵⁶ BBC Mundo[en línea] Noruega-Oslo; BBC News; Publicado 2 noviembre 2013.

Grafico 37: Desechos listos para ser procesados en Noruega



Fuente: BBC Mundo 2016 (Suecia y Noruega comparten modelo).

Mientras Suecia se centra como punto fundamental en no producir residuos como piedra angular de su sistema, 32 estaciones WTE (plantas incineradoras productoras de energía) del país queman casi tanta basura como el país recicla. Pero tiene truco, porque alrededor de 800.000 toneladas de basura se importan desde el Reino Unido, Italia, Noruega e Irlanda, ya que **los suecos son tan eficientes y recicladores, que necesitan importar basura**. El sistema WTE trabaja desde el principio de que tres toneladas de basura quemada contienen tanta energía como una tonelada de fuel oil, donde 950.000 hogares suecos se calientan con la energía producida por el sistema, y 260.000 hogares se abastecen totalmente por ella.

¿Cómo ha logrado Suecia la que llaman revolución de reciclaje?

Con trabajo colectivo y la educación de sus habitantes.

Por ley, en Suecia deben existir estaciones de reciclaje en cada zona residencial. La mayor parte de los suecos separan todos los residuos reciclables en sus casas, los depositan en los contenedores especiales de sus residenciales para después llevarlo a las estaciones de reciclaje.

Todo se recicla, se reutiliza o abona. El agua se purifica hasta ser potable. También se tiene especial cuidado en la recogida y reciclaje de basura electrónica y residuos peligrosos.

Un ejemplo, tal y como nos comenta Pal Mikkelsen, director general de la agencia municipal:

“El 12% de los residuos que utilizamos para hacer funcionar nuestra planta de Klemetsrud, en Oslo, es importado”⁵⁷.

Esta ciudad noruega ha superado la capacidad de procesar los residuos de sus 1,4 millones de habitantes y ahora tiene que importar basura de otros países para alimentar las plantas que generan calefacción y electricidad a la ciudad.

Como se convierte la basura en electricidad.

A pesar de las críticas al programa de incineración, sus defensores se apresuran a defenderla. Anna-Carin Gripwall, responsable en el Sistema de Gestión de Residuos sueco explica,

“Cuando los residuos se encuentran en los vertederos, con fugas de gas metano y otros gases de efecto invernadero, es obvio que no es bueno para el medio ambiente. Waste-to-energía (WTE: basura a energía) es una alternativa inteligente, con un menor impacto ambiental, teniendo en cuenta tanto los subproductos de la incineración y las emisiones del transporte”⁵⁸. Además, la recuperación de energía a partir de residuos explota un recurso que de otro modo se perdería.

Los suecos saben que un programa de este tipo sólo es viable en un país con un buen sistema de separación de residuos, para asegurarse de que los materiales reciclables, alimentos y otros residuos peligrosos como pilas, bombillas y residuos eléctricos no son

⁵⁷ ABC vivir[en línea] Suecia; Agencia ABC; Publicado 12 diciembre 2016, [acceso 4 octubre 2018]

⁵⁸ ABC vivir[en línea] Suecia; Agencia ABC; Publicado 1 diciembre 2016.

incinerados. También tienen claro que la mejor solución a largo plazo para la gestión de los residuos es producir menos residuos en el primer lugar.

El proceso que se sigue para convertir la basura en electricidad es muy sencillo. Primero, un lector óptico separa las bolsas por color (en estos países separan los residuos por bolsas de colores). Las azules, con plásticos, se envían a plantas de reciclaje para aprovechar el material. Las verdes, con restos de alimentos, se usan para obtener fertilizantes, compost y el biogás que usan de combustible los autobuses. Las blancas van a incineración a un horno de 850°C.

El calor producido hierve agua y su vapor tiene dos funciones: mueve una turbina para generar electricidad que se aprovecha en las escuelas y alimenta la red de calefacción municipal.

Después de la incineración, el 20% de la basura ingresada se convierte en cenizas las cuales son utilizadas como agregados para asfaltos.

En realidad, importar basura es un buen negocio. Los noruegos por ejemplo cobran a los ingleses entre 30 y 40 \$ por tonelada por importar su basura lista para incinerar (sin plásticos, metales ni vidrios).

Grafico 38: Incineración controlada



Fuente: disponible en:

https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/09/130923_ciencia_noruega_basura_energia_ng

“El mundo tiene un problema con la basura, nadie duda de eso, pero mientras tanto, la incineración para producir energía de los residuos es una buena solución. Además ayuda a reducir la dependencia del país a los combustibles fósiles”⁵⁹

Lo que también está claro es que o reducimos nuestra producción de basura a nivel mundial drásticamente o el problema en poco tiempo no va a tener solución, el planeta tierra será un vertedero de proporciones mundiales.

Algunos datos del reciclaje Sueco:

- El 96% de la basura se recicla o se deriva a las plantas de incineración.
- 250 mil hogares se abastecen de electricidad generada por la basura y el 20% de los hogares gozan de calefacción proveniente del tratamiento de basura.
- Finalmente, los basureros públicos de Suecia solo reciben el 4% de sus desechos.
- En las casas separan: orgánicos, metales, pilas, vidrios de color, vidrios transparentes, plástico duro, plástico blando, cartón y Tetra Pak, papeles, periódicos y revistas.

Por lo que se puede observar Suecia y Noruega es un ejemplo claro para adoptar ese tipo de tecnologías y combatir el cambio climático⁶⁰.

➤ **Mihama-Mikata, Japón**

La planta de Mihama-Mikata procesa 20 toneladas por día de RSU de los municipios de Mihama y Mikata. También procesa 4 tpd de lodos de depuración. El gas de síntesis se usa para producir calor que se utiliza para secar el lodo de aguas residuales, por lo que puede gasificarse.

Toda la escoria de la planta de Mihama-Mikata se utiliza beneficiosamente como agregados para hormigón o adoquines.

⁵⁹ Göran Skoglund . WTE Öresundskraft [en línea]. Suecia. Incineración de residuos sólidos urbanos; 2013.

⁶⁰ ABC vivir[en línea] Suecia; Agencia ABC; Publicado 23 diciembre 2016.

La planta de gasificación por plasma cumple uniformemente con los requisitos de emisiones⁶¹.

➤ **MEPL, Pune, India**

La planta MEPL procesa desechos peligrosos procedentes de más de 30 industrias en la India. El propietario de la planta, SMSIL, es socio de WPC y en conjunto, las empresas ofrecen gasificación por plasma en el mercado indio.

Al igual que la planta de EcoValley, WPC tiene acceso a los datos operativos y al personal de funcionamiento en la planta. SMSIL también hace que la planta se encuentre disponible para ciertos clientes de WPC para la realización de pruebas piloto y ensayos de optimización. Es el acceso a este tipo de información lo que permite a WPC acelerar la optimización de su tecnología, otra ventaja que tiene WPC sobre sus competidores⁶².

Grafico 39: MEPL, planta de gasificación por plasma de residuos Sólidos Urbanos



Fuente: Imagen extraída de ALTR NGR. Disponible en: www.alter_ngr.org

➤ **Planta de demostración del incinerador de cenizas volátiles/desechos médicos de GTS**

⁶¹ Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon. ALTER NRG; publicado junio 2016.

⁶² Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon. ALTER NRG; publicado junio 2016

En 2014, GTS Shanghai, una empresa china, terminó la construcción de una planta de demostración de residuos peligrosos en Shanghai Chengtoun (Shanghai ambiental) en Jiangding. La planta utilizará el diseño del reactor de plasma Westinghouse incluyendo sistemas de antorcha de plasma Westinghouse. El proyecto procesa una combinación de desechos médicos y cenizas volátiles de incinerador, y se centra en la efectiva y eficiente gestión de eliminación de desechos médicos y sus posibles riesgos ambientales y peligros para la salud pública. Dado que las cenizas volátiles de incinerador constituyen un problema de eliminación cada vez mayor en China, estas se han convertido en una preocupación ambiental de alta prioridad para el gobierno chino.

La planta está ubicada de forma adyacente a un incinerador ya existente, está diseñada para procesar 30 tpd de desechos médicos, cenizas de incineración y otras materias primas residuales difíciles y peligrosas. La planta producirá vapor para uso en todo el equilibrio de la instalación de procesamiento y a su vez, convertirá las peligrosas cenizas de incineración en escoria respetuosa con el medio ambiente, lo que reduce los costos de eliminación de cenizas volátiles y aumenta la eficiencia global.

El sistema integrado es flexible y participará en varios métodos de control, tratamiento y eliminación de residuos, como la reutilización, el reciclado, la esterilización y el depósito en vertederos para minimizar los impactos ambientales y sanitarios de los residuos.

La inauguración tuvo lugar en el primer trimestre de 2014 y numerosas empresas chinas y europeas ya han visitado la planta. Westinghouse Plasma Corp. y GTS Energy han firmado un acuerdo conjunto de desarrollo y comercialización cuyo objetivo es proporcionar a los clientes de todo el mundo una solución para las cenizas volátiles y los residuos peligrosos⁶³

➤ **EcoValley – Utashinai, Hokkaido, Japón**

⁶³ Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013.

La planta de EcoValley, que está localizada cerca de la pequeña localidad de Utashinai en el área rural de la isla de Hokkaido, puede procesar hasta 220 tpd de RSU preorganizado. La planta cuenta con dos trenes gasificadores capaces de procesar 110 toneladas por día cada uno.

La planta funciona actualmente a menos de su capacidad debido a la escasez de materia prima disponible.

WPC ha tenido la suerte de tener acceso a los datos operativos y al personal de operación de la planta. Hitachi Metals, los operadores de la planta, modificaron y optimizaron el gasificador durante los primeros años de su funcionamiento. Esta experiencia comercial ha sido incorporada en el diseño del gasificador de nueva generación que ha comenzado a ser ofrecido por WPC y adquirido por Air Products. En comparación, los competidores de WPC están luchando por construir sus primeras plantas de referencia⁶⁴.

Grafico 40: Gas de síntesis se quema en una cámara secundaria para crear energía en una turbina



Fuente: Imagen extraída de ALTER NRG

⁶⁴ Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 pag 11-15.

➤ **Planta de demostración comercial de WPC - Madison, Pensilvania, EE.UU.**

Hasta finales de 2014, Westinghouse Plasma Corp tuvo la propiedad y operaciones de una instalación de demostración situada cerca de Madison, Pensilvania, EE. UU. El reactor de demostración se construyó en 1984 y ha sido el hogar de innumerables pruebas de gasificación. Con la incorporación de la tecnología de gasificación de Westinghouse Plasma en plantas comerciales de referencia exitosas, se consideró que la planta de demostración en Madison era redundante, así que se retiró.

Coskata, el propietario de una tecnología que convierte el gas de síntesis en etanol, completó dos años de exitosas pruebas en la planta de demostración WPC gasificó residuos de madera y residuos sólidos municipales para crear gas de síntesis que Coskata convirtió exitosamente en etanol.

La planta de demostración incluye equipos de limpieza de gas dentro del proceso y monitoreo de última tecnología en tiempo real de la composición del gas. Existen tres sistemas de alimentación distintos a través de los cuales, casi cualquier sólido o líquido puede alimentar al gasificador. WPC tiene la capacidad de un modelado predictivo, que incluye el equilibrio de la planta, a través de software de simulación de VMG.

WPC ha gasificado una amplia gama de materias primas en su planta de demostración que incluyen:

- Residuos sólidos urbanos
- Combustible derivado de residuos
- Residuos de construcción y demolición
- Residuos peligrosos, incluidos los residuos contaminados con PCB y los lodos de sedimentos de puertos
- Residuos de lodos de agua
- Residuos de madera y virutas de madera limpia
- Bagazo
- Material de vertedero excavado

- Neumáticos
- Residuos de trituración de automóviles (también conocidos como pelusas de autos)
- Aceite pesado
- Ceniza de incinerador

WPC continúa perfeccionando su núcleo de antorcha de plasma y su tecnología de gasificación en base a los resultados obtenidos en su planta de demostración y la experiencia en los centros en operación⁶⁵.

➤ **Planta Japonesa de demostración comercial - Yoshii**

Basándose en el éxito de sus esfuerzos de desarrollo conjuntos con WPC, Hitachi Metals construyó una planta comercial de gasificación por plasma de demostración de 24 tpd en Yoshii, Japón, en 1999. Hitachi Metals operó la planta durante un año con materia de residuos sólidos urbanos y obtuvo una certificación de la Fundación de Investigación de Residuos del Japón (JWRF).

Hitachi Metals aprovechó el éxito de la planta en Yoshii y lo replicó en las dos plantas comerciales en Mihama-Mikata y Utashinai, Japón⁶⁶.

➤ **Planta de energía renovable de Tees Valley**

Air Products está finalizando la construcción de la instalación de energía renovable Tees Valley #1. Air Products compró a WPC el generador de gas, un G65, para la planta y la operación comercial está prevista para el año 2015. WPC proporcionó el generador de gas al emplazamiento a principios de 2013.

En noviembre de 2013, Air Products adquirió un gasificador G65 para el segundo proyecto (Tees Valley #2), que se construirá adyacente al primer proyecto y que entrará

⁶⁵ Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 pag 16-17.

⁶⁶ Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon. ALTER NRG; publicado junio 2016 pag 26.

en operación comercial en 2016. Air Products inició la construcción de la Tees Valley #2 a principios de 2014.

Grafico 41: Planta de plasma para residuos sólidos urbanos de Tees Valley



Fuente: ALTER NRG

Cada instalación Tees Valley procesará 1.000 tpd de residuos sólidos urbanos preclasificados y producirá electricidad a través de una configuración de isla de ciclo combinado. Una isla de energía de ciclo combinado es la combinación de una(s) turbina(s) de gas, un generador de vapor de recuperación de calor y una turbina de vapor y se considera la tecnología más eficiente para la conversión de gas a energía.

Las emisiones de la isla de potencia serán muy similares a las de una planta tradicional de quemado de gas natural de ciclo combinado. Air Products ha recibido la aprobación ambiental del Gobierno del Reino Unido⁶⁷.

➤ **Planta de residuos de madera de Wuhan Kaidi**

En diciembre de 2011, Wuhan Kaidi, una empresa energética china de gran envergadura, inició la construcción de un nuevo parque tecnológico en Wuhan, China. Las instalaciones incluyen un generador de plasma de 150 toneladas diarias comprado a WPC. La instalación de Kaidi procesará biomasa residual y, posiblemente, metros de agua marina, para su conversión en energía y combustibles líquidos.

⁶⁷ Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon. ALTER NRG; publicado junio 2016 pag 28.

El plan de negocios de Kaidi incluye la construcción de numerosas instalaciones de capacidad superior a 800 toneladas por día de biomasa⁶⁸.

➤ **Planta de desperdicios a energía de Bijie City Green Environmental Energy Limited (GES)**

En febrero de 2014, Alter NRG firmó acuerdos con Bijie City Green Environmental Energy Limited ("GES") para proporcionar una solución de gasificación de plasma Westinghouse. Se espera que el proyecto sea una planta de 600 toneladas por día, que producirá 15 MW de electricidad a partir de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Bijie, China. Este proyecto ha sido designado oficialmente como un proyecto clave por el gobierno provincial de Guizhou, debido a los beneficios ambientales previstos.

Grafico 42: Ubicación del centro de Wuhan Kaidi planta de Plasma



Fuente: ALTER NRG

El proyecto ha progresado de manera constante a través del desarrollo de negocios y permisos ambientales. El proyecto ha obtenido la aprobación de la provincia y está a la espera de las aprobaciones finales de la República Popular de China que se esperan en el

⁶⁸ Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea]. Japon Wuhan Kaidi . ALTER NRG; publicado junio 2016. pag 27.

segundo trimestre de 2014. Después de la primera puesta en marcha, prevista para mediados de 2016, BGE tiene la intención de duplicar la capacidad de la planta mediante un segundo gasificador⁶⁹.

2.2.4.2. Instalaciones Comerciales en América Latina

➤ Costa Rica

Convertirá sus residuos sólidos en electricidad, en cuestión de dos años y medio costa rica podría convertirse en la sede de la planta generadora de energía eléctrica mediante gasificación de residuos sólidos más grande de Latinoamérica.

La ambiciosa tarea es parte del plan que la compañía estadounidense Wastelectric tiene para el país, el cual incluye la inversión de 390\$us millones y la creación de 750 nuevas fuentes de empleo en sus dos primeras fases, en su primera fase procesara 600 toneladas día de Residuos Sólidos Urbanos.

Grafico 43: Planta de gasificación de RSU en Costa Rica



Fuente: Imagen disponible en: www.wasteltrico.com.org.bs

⁶⁹ Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon Wuhan Kaidi. ALTER NRG; publicado junio 2016, pag 30.

En su capacidad total, Wasteltric podrá generar energía suficiente para abastecer a 108.000 hogares Costarricenses al mes, es decir, 45 megavatios hora (MW/h), los cuales serán vendidos al instituto costarricense de Electricidad⁷⁰.

➤ **Colombia**

Apuesta al reto de transformar la basura en energía. Sacarle el provecho a la basura es un reto que han asumido muchas industrias del mundo en los últimos años. Uno de los objetivos es evitar que los residuos sólidos, que se acumulan en rellenos sanitarios, liberen altas cantidades de gas metano, una causa directa del calentamiento global.

La planta operara en Tolima que tratara 400 tn por día para generar 40 Megavatios hora de energía eléctrica y abastecerá de energía a 98.000 hogares⁷¹.

➤ **México**

Apunta a tecnología de punta. En México se trataron 233 mil toneladas de basura en 2016 y se crearon 131 mil megavatios por hora durante todo el año. En la ciudad de México las cosas serán un poco mayores. Al año la planta que será construida a partir del final de este año, habrá de recibir 1,6 millones de toneladas de basura en 12 meses, las cuales generaran 965 mil megavatios por hora, suficientes como asegurar para mover el metro por años, hasta el día que se termine la basura cosa que posiblemente no ocurrirá⁷².

➤ **Otros**

Entre otras por mencionar también se encuentran Argentina, Panamá, Perú, que desde el 2015 están convirtiendo sus residuos sólidos en energía y Brasil que está entrando en ese mismo plan de Generar energía eléctrica a partir de su Basura.

⁷⁰ Cesar B. Quirós, Wastelectric convertirá basura en energía [en línea], Costa Rica-San José, El Financiero, publicado 27 abril, 2014.

⁷¹ Juan Diego Posada Posada. Basura en Medellín la opción energética. Antioquia-Colombia, El Colombiano, publicado 21 de octubre 2017.

⁷² Jesús Sesma. Vamos a transformar la basura en energía .

Finalmente, EEUU que cuenta con 8 plantas a nivel comercial que procesa la basura de 7 estados

2.2.4.3. Beneficios/ventajas de la tecnología de gasificación por Plasma

➤ Optimiza los ingresos por la tasa de entrada (cuota de vertedero) e ingresos por producción de energía

A diferencia de la tecnología de incineración típica que puede procesar solamente RSU y materias primas similares, un gasificador por plasma de WPC puede procesar casi cualquier materia prima incluyendo tanto sólidos como líquidos. Además de que puede procesar una mezcla de materias primas. Los propietarios del proyecto pueden optimizar sus flujos de ingresos mediante la determinación de la correcta combinación de materias primas basadas en el poder calorífico y la tarifa de ingreso.

Además, mientras haya una flexibilidad incorporada en los sistemas de manipulación de materias primas, los propietarios de las instalaciones de gasificación por plasma, pueden cambiar durante la vida útil de la planta, los materiales de alimentación para aprovechar las materias primas con tarifas de ingreso más altas.

En muchos mercados, la gasificación por plasma, especialmente en combinación con turbinas de gas o motores alternativos, pueden acogerse a los incentivos de energía verde. En el Reino Unido, Air Products recibirá dos certificados de obligación renovables (ROC) por cada MWh producido en las instalaciones de Tees Valley⁷³.

➤ Reducción del riesgo de puesta en marcha y funcionamiento

WPC está instalando su gasificador de cuarta generación en el proyecto Tees Valley de Air Products. Se han experimentado y resuelto los problemas normalmente asociados con el funcionamiento de la tecnología de primera generación. La mayoría de los competidores directos de WPC aún no ha instalado su tecnología por primera vez en sus

⁷³ Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 [acceso 14 agosto 2018] pag 20.

instalaciones comerciales. La experiencia de WPC durante la puesta en marcha y las operaciones en las instalaciones anteriores, al igual que en la planta de Hitachi Metals EcoValley en Japón, se traducirá en un plazo más breve de puesta en marcha y una mayor disponibilidad para los clientes durante los primeros años de operación.

WPC continuará ganando experiencia en la puesta en marcha y funcionamiento de la instalación Tees Valley y de la planta Kaidi una vez que las plantas entren en funcionamiento.

➤ **Reducción del tiempo de obtención de permisos y gastos**

La tecnología de WPC, en una solicitud de ciclo combinado o de motor alternativo, cumplirá con todos los requisitos de la Directiva de la UE de incineración de residuos, según lo evidenciado por el recibo por parte de Air Products de un permiso ambiental de la Agencia Ambiental del Gobierno del Reino Unido. Además, la tecnología califica como tratamiento

térmico avanzado (ATT) y por lo tanto recibe un trato preferencial sobre las tecnologías que no son ATT, como la incineración.

➤ **Desempeño ambiental superior**

Los beneficios ambientales de una planta de gasificación por plasma incluyen:

- Menores emisiones
- Uso benéfico de bioproductos y una reducción o incluso la eliminación en la cantidad de material que en última instancia debe ser depositado en vertederos
- Baja huella de gases de efecto invernadero

Cada uno se explica en detalle en las secciones siguientes. Menores emisiones Una planta de ciclo combinado de gasificación por plasma o planta de motor de alternativo es completamente diferente a una planta de incineración desde una perspectiva de emisiones. Donde la tecnología de incineración literalmente quema los RSU para producir energía, la tecnología de WPC usa calor extremo para descomponer los residuos sólidos urbanos a sus constituyentes moleculares, incluyendo monóxido de

carbono e hidrógeno, los dos elementos básicos del gas de síntesis. En una aplicación de ciclo combinado o de motor alternativo, el gas de síntesis se limpia a una especificación similar a la del gas natural. Es este gas de síntesis limpio el que se quema en una turbina de gas o motor alternativo para producir energía. Las emisiones de este tipo de planta serán muy similares a las de una central eléctrica a gas natural.

El gas de síntesis, después de la limpieza, puede cumplir las siguientes especificaciones. Es posible cumplir con especificaciones más estrictas si es necesario.

Tabla 11: Especificaciones del gas de síntesis después de la limpieza

ESPECIFICACIONES	
Azufre	< 200 ppm en peso
Metales Alcalinos	< 1 ppm en peso
Metales Volátiles	< 1 ppm en peso
Halógenos	< 1 ppm en peso
Material Particulado	< 20 ppm en peso
Valor calorífico del gas de síntesis	7 -12 MJ/Nm ³

Fuente: Certificación de ALTER NRG

La planta de gasificación por plasma de WPC de 750 tpd WTE, “generará una producción sustancial de energía renovable a partir flujos de residuos.

Consumo que normalmente tendrían que ser depositados en rellenos sanitarios, mientras que proporcionará control de última tecnología de las emisiones de:

- Dióxido de azufre (SO₂)
- Gases ácidos tales como cloruro de hidrógeno (HCl) y fluoruro de hidrógeno (HF)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Mercurio (Hg)

- Partículas (PM, PM10 y PM2,5) incluyendo metales pesados distintos al mercurio
- Compuestos orgánicos volátiles (COV) que incluyen dioxinas, furanos e hidrocarburos poli-aromáticos

"Estas emisiones serán sustancialmente menores que la tradicional quema masiva o los procesos de combustible derivado de residuos de uso común en los residuos de la industria de la energía. La desviación de los RSU de los rellenos sanitarios de residuos urbanos (donde se forma el metano, potente gas de efecto invernadero) dará lugar a importantes reducciones netas de las emisiones de gases de efecto invernadero como equivalentes del CO2. Dado que las materias primas orgánicas propuestas son flujos de residuos post-consumo, el proyecto representa un recurso limpio y renovable de energía sostenible"⁷⁴.

2.2.4.4. Gasificación por plasma y otras tecnologías de tratamiento térmico

La Tabla 12 detalla los numerosos beneficios de la gasificación por plasma frente a la incineración para el tratamiento de los RSU.

⁷⁴ Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 pag 30-32.

Tabla 12: Gasificación por plasma vs incineración

	Gasificación por plasma de Westinghouse	Incineración
Flexibilidad de la materia prima	Capacidad para mezclar materias primas como <ul style="list-style-type: none"> • RSU • Desechos industriales • Desechos comerciales e industriales • Desechos peligrosos • Desecho de neumáticos • Combustibles de biomasa (como residuos de madera) 	RSU y otros flujos de residuos comunes
Combustible creado	Gas de síntesis (monóxido de carbono e hidrógeno)	no aplicable
Oportunidades del producto final	<ul style="list-style-type: none"> • Sustitución de combustible por gas natural y aceite combustible • Electricidad a través del ciclo de vapor • Alimentación a través de ciclo combinado o motores alternativos • Alimentación a través de baterías de combustible (futuro) • Proceso de vapor • Combustibles líquidos (etanol, biodiesel) • Hidrógeno • Compuestos de fertilizantes 	Electricidad a través del ciclo de vapor Proceso de vapor
Eficiencia global de la planta	Ciclo de proceso combinado: 1 tonelada de residuos sólidos urbanos es capaz de crear 1.000 kWh de electricidad a través de la configuración de ciclo combinado	Ciclo de proceso combinado: 1 tonelada de residuos sólidos urbanos genera entre 500-650 kWh de electricidad
Emisiones	Ciclo de proceso combinado: <ul style="list-style-type: none"> • Óxido de nitrógeno (NOx): <36 ppmvd • Dióxido de azufre (SO₂): <1,05 ppmvd • Mercurio (Hg) <1,4 µg/dscm 	<ul style="list-style-type: none"> • Óxido de nitrógeno (NOx): 110-205 ppmvd • Dióxido de azufre (SO₂): 26-29 ppmvd • Mercurio (Hg) 28-80 µg/dscm
Dioxinas y furanos	Temperatura de funcionamiento elevada (> 1.000 °C), en relación con un entorno privado de oxígeno destruye cualquier dioxinas/furanos que pueden estar presentes en la materia prima, y elimina la	La presencia de oxígeno, cloro y material particulado, crea las condiciones adecuadas para la formación de dioxinas y furanos.

Fuente: Westinghouse Plasma Corporation (WPC)

La tecnología de plasma es una de las más eficientes y probadas principalmente frente a la incineración, proporcionando un mejor comportamiento ambiental en comparación con otras tecnologías.

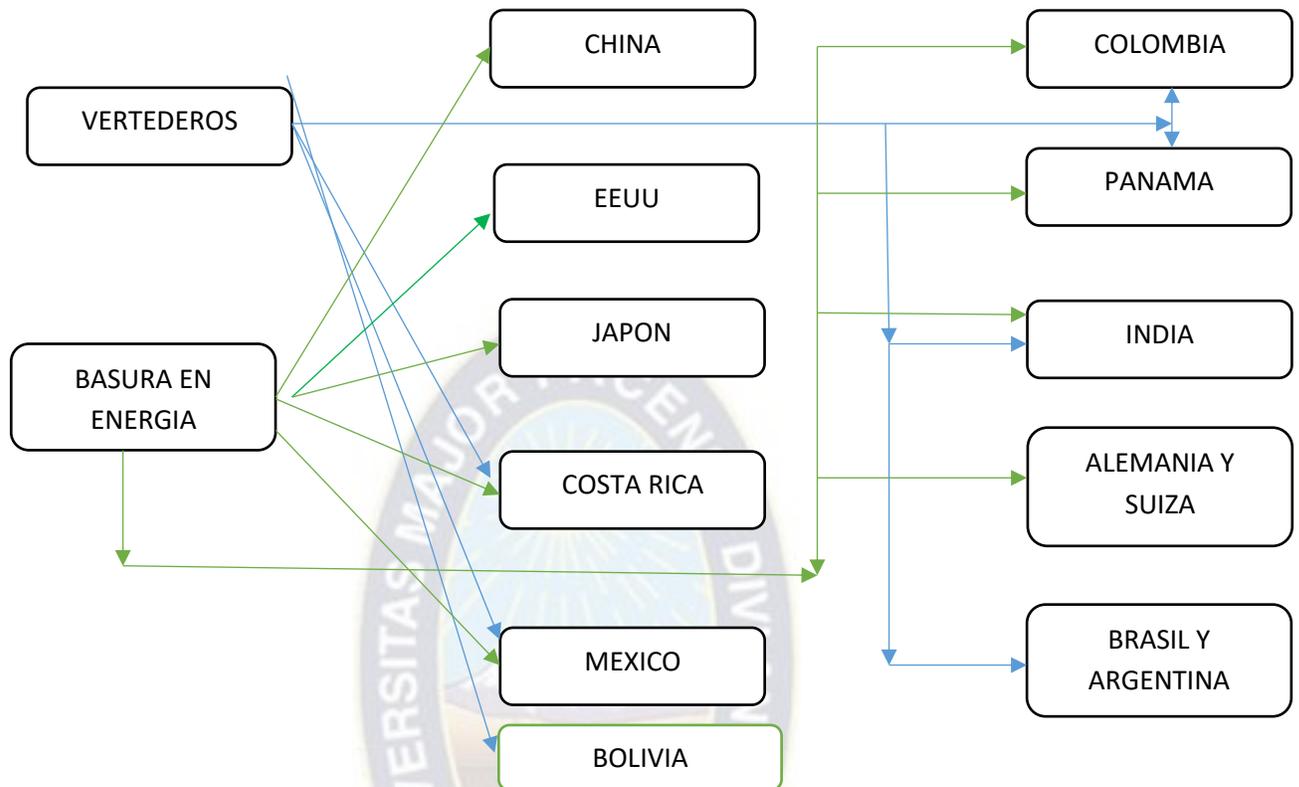
2.3. Contribución al proyecto del marco referencial

Las plantas comerciales que operan en diferentes países mediante este mecanismo de convertir su basura en energía eléctrica aplicando la tecnología de Plasma han contribuido a sus habitantes solucionándoles el problema que muchos países hoy en día sufren a causa de sus residuos sólidos que generan, la Basura es un Problema Mundial pero países como los citados anteriormente no lo ven como tal, más al contrario para ellos es Una mina de Oro, y han incursionado para solucionar el problema dándole un uso mucho mayor a lo que actualmente se utiliza, convirtiendo todos sus residuos sólidos en energía eléctrica, como es el caso de Suiza y Noruega que se ven obligados a importar basura de otros países, pero no se quedan atrás los países asiáticos que de igual manera transforman la basura donde los rellenos sanitarios desaparecieron.

Con la energía producida de la basura se soluciona el deficiente acceso a la energía eléctrica, sin embargo pocos países de América Latina que apuestan a este tipo de tecnologías, excepto: México que industrializara la basura que generara energía eléctrica que moverá el metro con este proyecto ambicioso se estima que los rellenos sanitarios desaparecerán, al igual que Costa Rica, Colombia, parte de Ecuador y Perú que ya cuentan con plantas comerciales operando para la generación diaria de energía, en el caso de Perú se cuenta con una planta de Biogás que aprovecha los residuos orgánicos de los rellenos sanitarios.

Todo lo mencionado Nos ayuda a que el proyecto que se plantea nos es una mala visión ya que se pueden adoptar las tecnología Asiáticas o Europeas que son eficientes para la reducción de grandes volúmenes de Residuos Sólidos, por las experiencias citadas hace que se tomen como un ejemplo para solucionar el problema de la Basura.

A continuación se muestra un cuadro de relaciones:



En base a la comparación hecha Países como Alemania, Suiza, Noruega, China, India, EEUU, están reduciendo sus volúmenes de basura para un fin que beneficie a sus propios pobladores generando energía eléctrica, mientras que en América Latina, países como México, Costa Rica, Colombia, Argentina, Brasil y Perú, ya ha incursionado a aplicar la tecnología de plasma para la reducción de sus residuos sólidos. Sin embargo en otros países de Latinoamérica y Bolivia seguimos con vertederos y Rellenos Sanitarios sabiendo que somos un potencial generador de Residuos Sólidos que no lo aprovechamos para fines energéticos ni siquiera para el reciclaje. Pero por lo analizado convertir los Residuos Sólidos Urbanos en energía eléctrica aplicando la tecnología de plasma en nuestro País podría ser viable ya que se cuenta con los volúmenes suficientes de basura. Estas experiencias aportan conocimientos de gran valor al proyecto que se está planteando.

Se estudiaron tres tecnologías diferentes que son aplicados en otros países del mundo para reducir los volúmenes de residuos sólidos para fines energéticos entre ellos se

encuentran la tecnología de producción de biogás que utiliza en su totalidad los residuos orgánicos esto es aplicable en países donde existe un hábito de separación en lugar de origen, en segundo lugar se analizaron las tecnologías de reducción térmica que no requiere previa separación de los residuos debido a que el proceso se lleva a altas temperaturas, muchos países han adoptado esta tecnología por ser eficiente y que se aprovecha casi la totalidad de residuos.

La tecnología de plasma es utilizada en países con elevada densidad demográfica por que producen inmensas cantidades de residuos sólidos y que es imposible tratarlos en rellenos sanitarios tal es el caso de Japón, Alemania, Estados Unidos. Esta tecnología se adapta a nuestro medio por que los residuos sólidos que se producen en el Municipio de El Alto.

Se identificó a esta tecnología por que mediante una comparación hecha frente a otras tecnologías como la de incineración demuestra que es más amigable con el medio ambiente porque tiene más ventajas que desventajas fue uno de los factores que intervino para lograr elegir la Tecnología de plasma como método de tratamiento de residuos sólidos urbanos.

CAPITULO III: PROPIEDADES DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS

El conocimiento de las propiedades de los residuos sólidos urbanos tiene gran importancia a la hora de tomar decisiones para la elección del sistema de tratamiento. La composición de RSU es enormemente variable y en ella influyen una serie de factores muy diversos. Se puede decir que la composición es consecuencia de: Las Características de la población, La época de producción de residuos, el nivel social de la población, los hábitos de consumo. Esto hace que los residuos sólidos producidos sean diferentes en distintas regiones.

En este caso tomaremos cuenta al municipio de El Alto, que es considerado un caso de estudio para este proyecto, por que el crecimiento demográfico es sustancialmente elevado y por consecuencia existirán más residuos sólidos.

La generación de residuos sólidos urbanos por día en promedio alcanza a 540 toneladas y como forma de disposición final se tiene al relleno sanitario⁷⁵.

$V_{promedio\ de\ generacion\ RSU}$	540 ton/día	FUENTE INE 2016
-------------------------------------	-------------	-----------------

Grafico 44: Relleno sanitario de villa ingenio



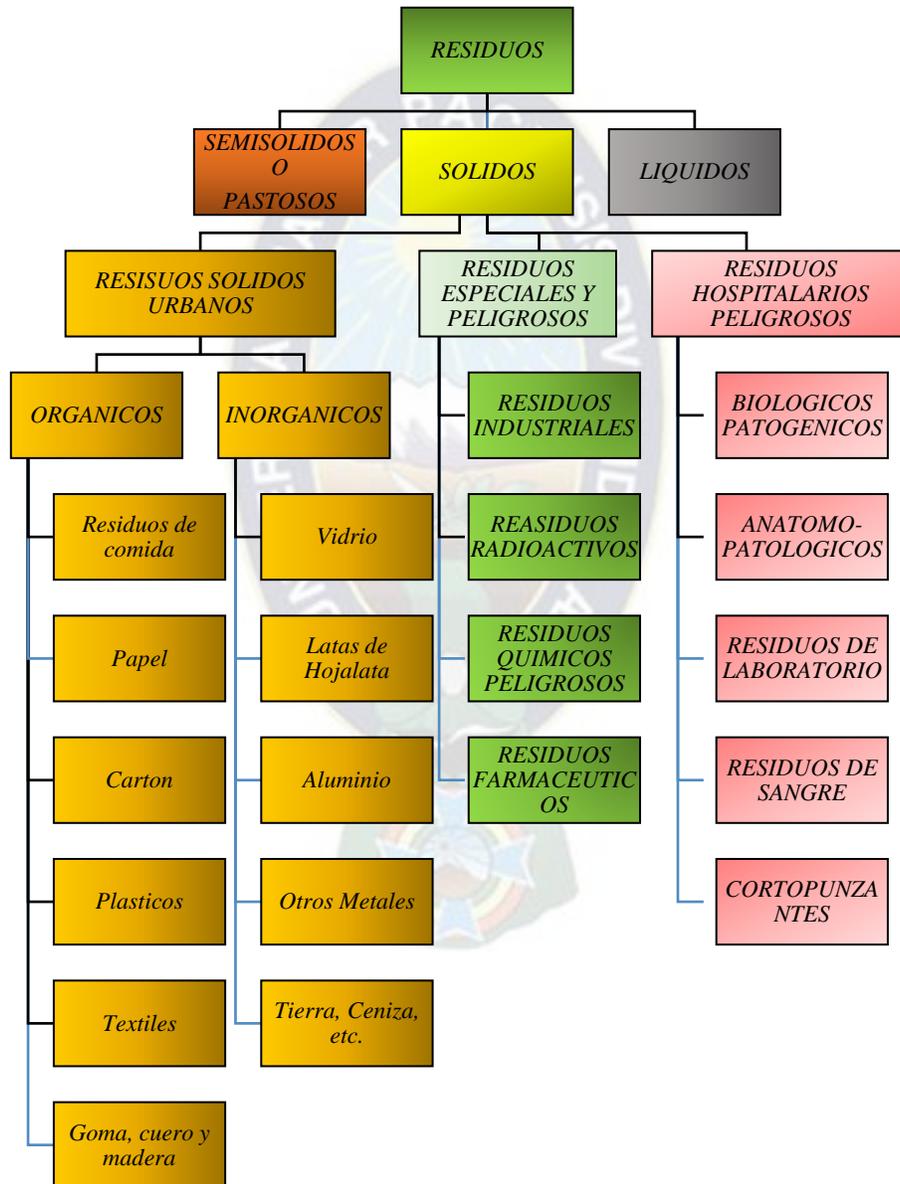
Fuente: foto tomada el 22/02/2017

⁷⁵ Gestión de Residuos Sólidos. [en línea]. El Alto: EMALTE; 2017.

3.1. Clasificación de los residuos sólidos

Los residuos pueden tipificarse de acuerdo a diversas propiedades y características, y según su estado físico en:

Grafico 45: Clasificación de los residuos sólidos



Fuente: COLINA SRL empresa adm. Relleno Sanitario Villa Ingenio

Como se puede observar en el gráfico 45, los RSU son los que tomaremos en cuenta para el presente estudio. Por lo que es necesario estudiar las propiedades de los mismos.

3.2. Composición de los residuos sólidos urbanos

Los Residuos Sólidos Urbanos se dividen en: Orgánicos e Inorgánicos que son considerados la materia prima esencial para este proyecto, por lo que es importante definir su composición⁷⁶.

Grafico 46: Composición de los residuos sólidos urbanos



Fuente: Expo EMALTE, disponible

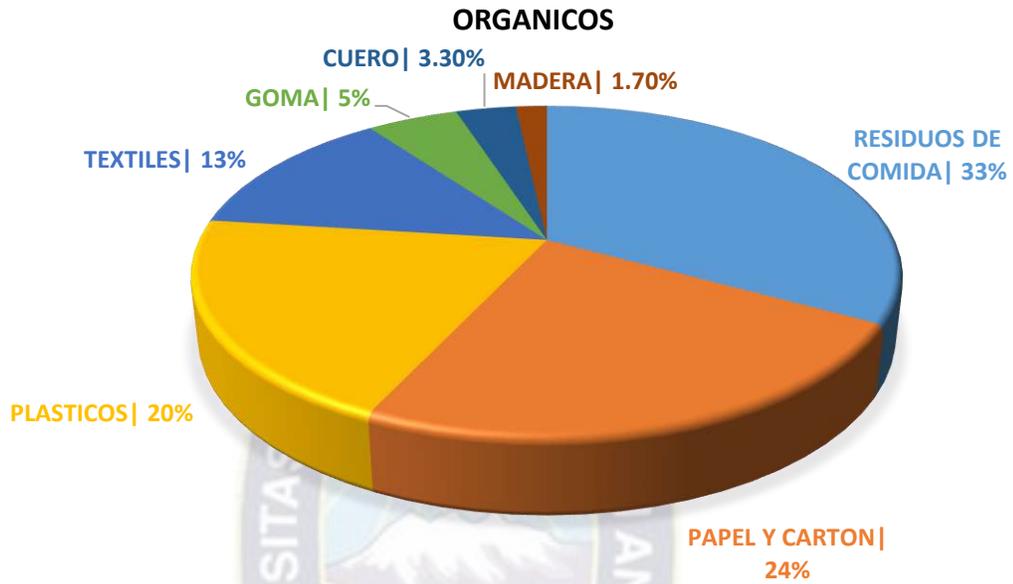
en:[www.sgabbolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPOEMALT%20\(Eduardo%20Garay\).pdf](http://www.sgabbolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPOEMALT%20(Eduardo%20Garay).pdf)

El gráfico muestra que los residuos sólidos urbanos en su mayor parte están compuestos por componentes orgánicos que representa el 60% y el resto es materia Inorgánica.

A continuación, se desglosa la composición de estos dos tipos de residuos.

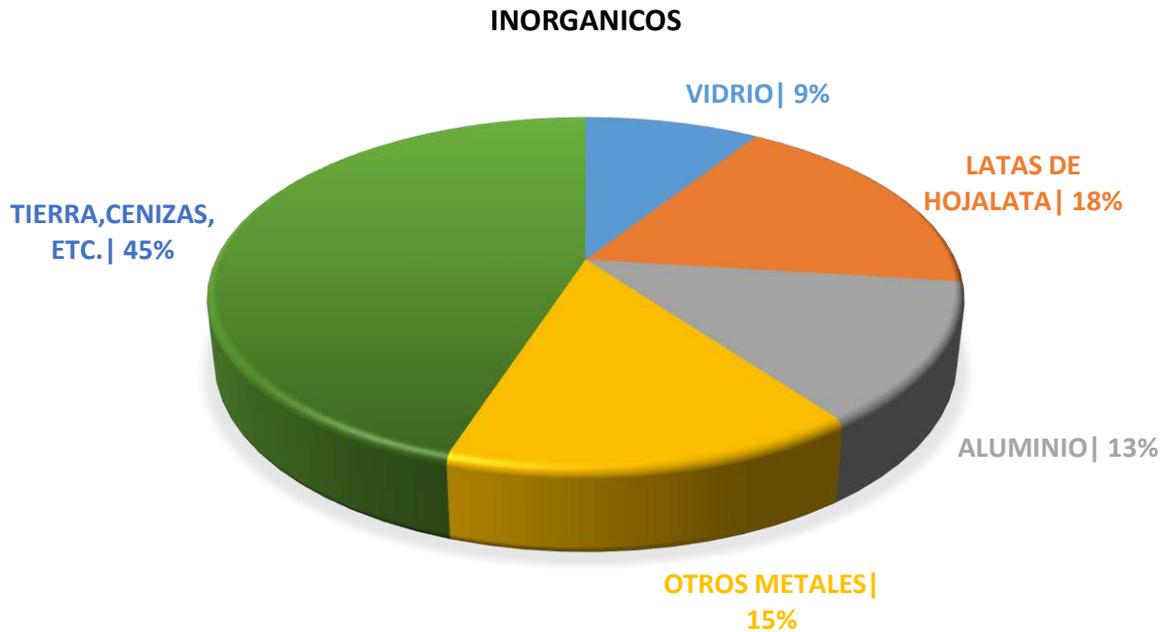
⁷⁶ S. Ignacio M, R. Garnica S. PROGRAMA INSTITUCIONAL DE GESTION DE RESIDUOS SOLIDOS Y BIOSEGURIDAD. La Paz-Bolivia: revisado por SWISSCONTACT; 2014.

Grafico 47: Composición de los RSU Orgánicos



Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por COLINA SRL.

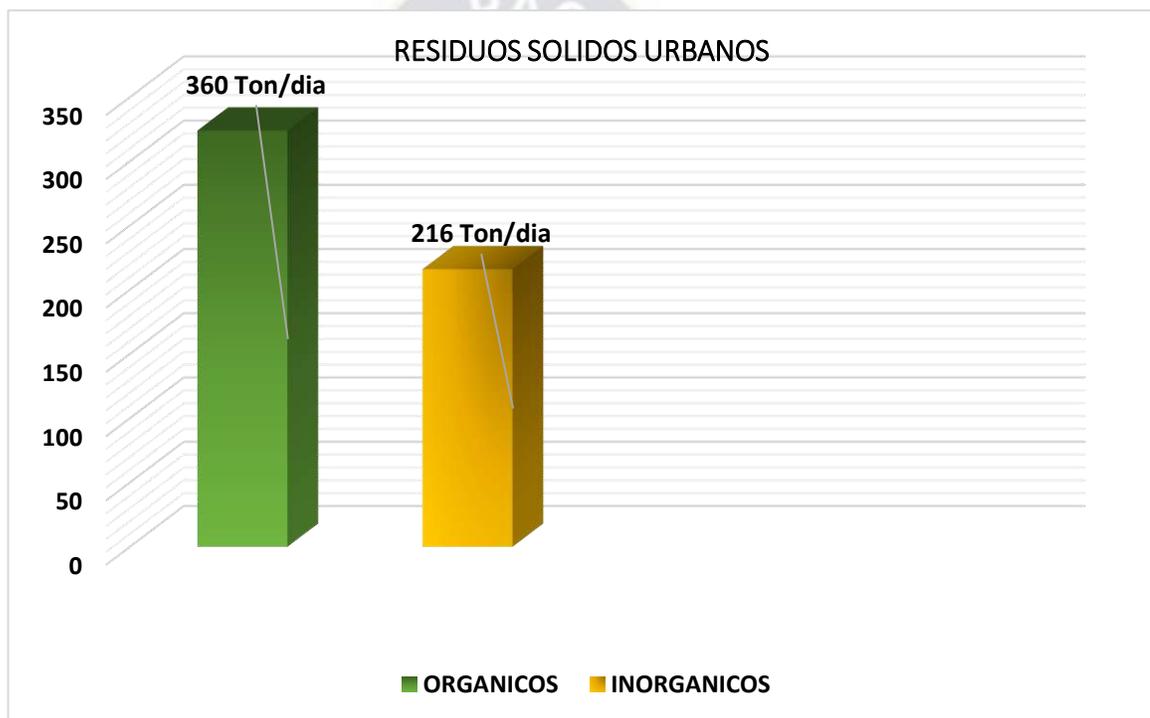
Grafico 48: Composición de los RSU Inorgánicos



Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por COLINA SRL.

En Los gráficos 47 y 48 se pueden observar la composición de tipo de residuos existentes en el relleno sanitario de villa ingenio. Donde los volúmenes generados por cada tipo de residuos son variables generalmente el promedio es de 540 toneladas por día, pero esto tiende a aumentar en días festivos, por lo que observaremos las cantidades generadas de cada tipo de residuos sólidos urbanos⁷⁷.

Grafico 49: Generación diaria de RSU Orgánicos e Inorgánicos



Fuente: Dato proporcionados por EMALTE.

3.3. Propiedades Físicas de Los Residuos Sólidos Urbanos

Las características físicas más importantes de los RSU incluyen: Contenido de humedad y peso específico.

3.3.1. Humedad

La humedad presente en el residuo es importante ya que será un parámetro para el sistema de tratamiento.

⁷⁷ Ximena Ayo. GESTION DE RESIDUOS SOLIDOS EN LA CIUDAD DE EL ALTO. Bolivia: expo EMALTE 2014.

Tabla 13: Contenido de humedad de los RSU

TIPOS DE RESIDUOS		CONTENIDO DE HUMEDAD % EN PESO		% HUMEDAD (COMPACTADO)
ORGANICOS	Residuos de Comida	70	RSU	25
	Papel	6		
	Cartón	5		
	Plásticos	2		
	Textiles	10		
	Goma	2		
	Cuero	10		
	Madera	20		
INORGANICOS	Latas de Hojalata	3		
	Aluminio	2		
	Metales	3		
	Vidrio	2		
	cenizas	6		

Fuente: Datos Obtenidos de los Registros de la empresa COLINA SRL. y EMALTE, mediante la dirección de control ambiental y residuos del G.A.M.E.A.

La tabla 13 indica que el contenido de humedad en los residuos urbanos Orgánicos es elevado y en los Inorgánicos es relativamente bajo, pero cuando se lo compacta a un volumen más pequeño el contenido de humedad reduce al 25 %.

3.3.2. Peso Específico

El peso específico se define como el peso de un material por unidad de volumen (por ejemplo, kg/m³). Como el peso específico de los RSU frecuentemente se refiere a residuos sueltos, encontrados en los contenedores, no compactados, y compactados, la

base utilizada para los valores presentados debe ser citada siempre. Los datos sobre el peso específico a menudo son necesarios para valorar la masa y el volumen total de los residuos que tienen que ser gestionados. Desafortunadamente, hay poca o ninguna uniformidad en la forma de presentar los pesos específicos. Frecuentemente no se hace ninguna distinción entre los pesos específicos de RSU compactados y no compactados. Los pesos específicos de los residuos sólidos varían notablemente con la localización geográfica, la estación del año y el tiempo de almacenamiento, se debe tener mucho cuidado a la hora de seleccionar los valores típicos. Los residuos sólidos urbanos, tal como se entregan por los vehículos de compactación, se ha comprobado que varían desde 178 kg/m³ hasta 415 kg/m³, con un valor típico de aproximadamente 300 kg/m³⁷⁸.

Tabla 14: Peso específico de los RSU

TIPOS DE RESIDUOS		PESO ESPECIFICO [Kg/m ³]		PESO ESPECIFICO [Kg/m ³] (compactado)
ORGANICOS	Residuos de Comida	291	RSU	600
	Papel	89		
	Cartón	50		
	Plásticos	65		
	Textiles	65		
	Goma	131		
	Cuero	160		
	Madera	237		
INORGANICOS	Latas de Hojalata	89		
	Aluminio	160		
	Metales	320		
	Vidrio	196		
	cenizas	745		

Fuente: Datos Obtenidos de los Registros de la empresa COLINA SRL. y EMALTE, mediante la dirección de control ambiental y residuos del G.A.M.E.A.

⁷⁸ Gutiérrez A. Los residuos sólidos urbanos. La Paz-Bolivia. Dirección de Medio Ambiente G.A.M.E.A. 2017

En la Tabla 14 se puede evidenciar que los residuos sólidos compactados ocupan un menor volumen.

3.4. Propiedades Químicas de los Residuos Sólidos Urbanos

La información sobre la composición química de los componentes que conforman los RSU es importante para evaluar las opciones de procesamiento y recuperación de energía. Por ejemplo, la viabilidad de la gasificación por plasma depende de la composición química de los residuos sólidos. Normalmente, se puede pensar que los residuos son una combinación de materiales semi húmedos combustibles y no combustibles. Si los residuos sólidos van a utilizarse como combustible, las cuatro propiedades más importantes que es preciso conocer son:

1. Análisis físico.
2. Punto de fusión de las cenizas.
3. Análisis elemental.
4. Contenido energético.

Cuando la fracción orgánica de los RSU se va a compostar o se va a utilizar como alimentación para la elaboración de otros productos de conversión biológica, no solamente será importante tener información sobre los elementos mayoritarios que componen los residuos, sino también será importante tener información sobre los elementos en cantidades traza que se encuentran en los mismos. Pero para este proyecto no será importante la parte biológica porque está orientado hacia la recuperación de energía térmica.

3.4.1. Análisis Físico

El análisis físico para los componentes combustibles de los RSU incluye los siguientes ensayos:

- 1.- Humedad (pérdida de humedad cuando se calienta a 105 °C durante una hora).
- 2.- Materia volátil combustible (pérdida de peso adicional por ignición a 950°C en crisol cubierto).
- 3.- Carbono fijo (rechazo combustible dejado después de retirar la materia volátil).
- 4.- Ceniza (peso del rechazo después de la incineración en un crisol abierto).

Los datos del análisis físico para los componentes combustibles de los RSU según se desechan se presentan en la tabla 10. Es importante resaltar que el ensayo utilizado para determinar las materias combustibles volátiles en un análisis físico (ignición a 950°C) es diferente del ensayo de sólidos volátiles utilizado en las determinaciones biológicas (ignición a 550°C)⁷⁹.

⁷⁹ Análisis Físico Químico. Registro de COLINA SRL y EMALTE administradoras del Relleno sanitario. El Alto; 2015.

Tabla 15: Contenido de: Humedad, Materia Volátil, Carbono Fijo, y No Combustibles (Cenizas), en los RSU

ANALISIS PROXIMO, % EN PESO					
TIPOS DE RESIDUOS		HUMEDAD	MATERIA VOLATIL	CARBONO FIJO	NO COMBUSTIBLE
ORGANICOS	Residuos de Comida	70	21,4	3,6	0,2
	Papel	10,2	75,9	8,4	5,4
	Cartón	5,2	77,5	12,3	5
	Plásticos	0,2	95,8	2	2
	Textiles	10	66	17,5	6,5
	Goma	1,2	83,9	4,9	9,9
	Cuero	10	68,5	12,5	9
	Madera	12	75,1	12,4	0,5
INORGANICOS	Latas de Hojalata	5	-	-	96
	Aluminio	-	-	-	-
	Metales	2	-	-	94
	Vidrio	2	-	-	-
	Cenizas	-	-	-	99

Fuente: Datos Obtenidos de los Registros de la empresa COLINA SRL. y EMALTE, mediante la dirección de control ambiental y residuos del G.A.M.E.A.

Como se observa en la tabla 15 Los residuos de: comida, plástico, cartones y papeles son los que contienen mayor cantidad de componentes volátiles.

3.4.2. Punto de fusión de la ceniza.

El punto de fusión de la ceniza se define como la temperatura en la que la ceniza resultante de la incineración de residuos se transforma en sólido (escoria) por la fusión y la aglomeración. Las temperaturas típicas de fusión para la formación de escorias de residuos sólidos oscilan entre 1.100°C y 1.200° C.

3.4.3. Análisis elemental los componentes de residuos sólidos urbanos

El análisis elemental de un residuo normalmente implica la determinación del porcentaje de C (carbono), H (hidrógeno), O (oxígeno), N (nitrógeno), S (azufre) y ceniza. Debido a la creciente preocupación por la emisión de compuestos clorados durante la combustión, frecuentemente se incluye la determinación de halógenos en el análisis elemental. Los resultados se utilizan para caracterizar la composición química de la materia orgánica en los RSU y para definir la mezcla correcta de materiales residuales necesaria para conseguir relaciones C/N aptas para los procesos de conversión biológica. Los datos sobre el análisis elemental de materiales combustibles individuales se presentan en la tabla 12⁸⁰.

Tabla 16: Contenido de C, H, O, N, S, y Cenizas (en Base Seca) en los RSU

PORCENTAJE EN PESO (BASE SECA)							
COMPONENTES		CARBONO	HIDROGENO	OXIGENO	NITROGENO	AZUFRE	CENIZAS
ORGANICOS	Residuos de Comida	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5
	Cartón	44	5,9	44,6	0,3	0,2	5
	Papel	43,5	6	44	0,3	0,2	6
	Plásticos	60	7,2	22,8	-	-	10
	Textiles	55	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
	Goma	78	10	-	2	-	10
	Cuero	60	8	11,6	10	0,4	10
	Madera	49,5	6	42,7	0,2	0,1	1,5
	Otros (Res.Jardin, Pañales,etc.)	47,8	6	38	2,4	0,3	4,5
INORGANICOS	Vidrio	0,5	0,1	0,4	< 0,1	-	98,9
	Metales	4,5	0,6	4,3	< 0,1	-	90,5
	Suciedad,Cenizas,etc.	26,3	3	2	0,5	0,2	68

Fuente: Datos Obtenidos de los Registros de la empresa COLINA SRL. y EMALTE, mediante la dirección de control ambiental y residuos del G.A.M.E.A. este análisis fue realizado en el año 2015.

⁸⁰ Análisis físico químico. Compendio. El Alto: Registros de la dirección de control ambiental y residuos. 2015.

Existe un mayor porcentaje de carbono en los residuos orgánicos lo cual es apto para procesar estos residuos de forma térmica. Sin embargo, otro análisis realizado para fines energéticos de los residuos sólidos urbanos representa a los residuos de comida como materia orgánica se lo puede observar en la tabla 17.

Tabla 17: Análisis Último de Componentes de los RSU

COMPONENTE	COMP.FISICA (% peso base seca)	ANALISIS ULTIMO DE COMPONENTES (% PESO BASE SECA)					
		C	H	O	N	S	Cenizas
Materia Orgánica	60%	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5
Plásticos	18%	60	7,2	22,8	-	-	10
Cartón	7%	44	5,9	44,6	0,3	0,2	5
Papel	4%	43,5	6	44	0,3	0,2	6
Textiles	4%	55	6,6	31,12	4,6	0,2	2,5
Vidrio	3%	0,5	0,1	0,4	-	-	98,9
Metales	0%	4,5	0,6	4,3	-	-	90,5
Otros	4%	26,3	3	2	0,5	0,2	68
Composición Química MSW		47,68	6,18	32,88	1,8	0,28	11,18
Humedad (% peso)		59%					

Fuente: Datos Obtenidos de los Registros de la empresa COLINA SRL y EMALTE, mediante la dirección de control ambiental y residuos del G.A.M.E.A. Análisis realizado el 8/2015 por la empresa COLINA

El análisis último es el que utilizaremos como referencia para elegir un proceso adecuado para la reducción de los residuos sólidos urbanos.

3.4.4. Contenido Energético de los Componentes de los RSU

El contenido energético de los componentes orgánicos en los RSU se puede determinar 1) utilizando una caldera a escala real como calorímetro, 2) utilizando una bomba calorimétrica de laboratorio, y 3) por cálculo, si se conoce la composición elemental. Por las dificultades que existen para instrumentar una caldera a escala real, la mayoría de los datos sobre el contenido de energía de los componentes orgánicos de los RSU están basados en los resultados de ensayos con una bomba calorímetro. Los datos típicos del

contenido energético y de los rechazos inertes de los componentes de RSU se representan en la tabla 18.

Tabla 18: Contenido Energético en los RSU

COMPONENTES		RECHAZO DE INERTES, EN %	ENERGIA, [Kcal/Kg]
ORGANICOS	Residuos de Comida	5	1,111
	Papel	6	4.000
	Cartón	5	3.889
	Plásticos	10	7.778
	Textiles	2,5	4.167
	Goma	10	5.556
	Cuero	10	4.167
	Madera	1,5	4.444
	Otros	4,5	1.556
INORGANICO S	Vidrio	98	33
	Latas de Hojalata	98	167
	Aluminio	96	-
	Otros Metales	98	167
	Suciedad,Cenizas,etc	70	1.667
Promedio de los RSU			2.778

Fuente: Datos Obtenidos de los Registros de la empresa COLINA SRL. y EMALTE, mediante la dirección de control ambiental y residuos del G.A.M.E.A.

El contenido energético en los RSU es una de las variables a tomar en cuenta, por lo que los residuos orgánicos son los que mayor cantidad de energía contienen, este tipo de residuos serían aprovechados en su totalidad para convertirlo en gas de síntesis.

Las Propiedades tanto físicas como químicas de los residuos sólidos urbanos son parámetros que serán utilizados más adelante.

CAPITULO IV: TECNOLOGIA DE PLASMA

Cuando se habla de la eliminación de residuos sólidos urbanos, se debe disponer de una tecnología segura, confiable y probada, ya que estos residuos pueden suponer un riesgo importante para la salud humana y para el medio ambiente. La gasificación por plasma ofrece una solución eficiente para mitigar el riesgo que generan los residuos sólidos depositados en un vertedero, la gasificación por plasma ha probado ser una solución ganadora para la reducción y destrucción de un problema que continúa siendo muy grande para las sociedades actuales. Las antorchas de plasma consiguen lo que otros métodos no han llegado a alcanzar: vaporizar los constituyentes de los residuos sólidos urbanos, eliminando las toxinas de forma eficiente y convirtiendo los mismos en una fuente de energía.

4.1. Que es el plasma

El plasma es el cuarto estado de la materia, un estado fluido similar al gaseoso, con la diferencia de que determinada proporción de sus partículas están ionizadas, es decir, cargadas eléctricamente. Estas partículas no poseen equilibrio electromagnético, por lo que el plasma resulta un buen conductor eléctrico. Se le considera un estado particular de la materia porque presenta características propias que no se dan en los estados sólido, líquido o gas; en particular, la capacidad de movimiento de los átomos. El plasma es, además, la forma más abundante de materia en el universo. De forma natural se encuentra en los rayos y en las auroras boreales. Se forma cuando la materia común se calienta a más de 5000°C, produciendo fluidos o gases cargados eléctricamente. Estos fluidos o gases están influenciados por las interacciones eléctricas de iones y electrones en presencia de campos magnéticos. La característica principal de estos "gases ionizados" es facilitar un "low mass heat transfer" y generar temperaturas de hasta 14000 °C.

La ionización de la materia para la formación de este cuarto estado se da a través de un proceso llamado "proceso de cascada". En un proceso de este tipo un electrón choca con

un átomo neutral para producir un segundo electrón y un ion. Así existen, por lo tanto, dos electrones y un ion. Una vez que estos dos electrones han chocado con otro átomo neutral, se producen cuatro electrones y tres iones. Este proceso continúa y, tras una sucesión de numerosas colisiones se han formados millones de electrones e iones a gran velocidad⁸¹.

4.1.1. La Evolución tecnológica de Plasma

La utilización práctica del plasma a nivel tecnológico se basa en la creación del "arco de plasma". Hoy en día, es la tecnología de antorchas de plasma la que consigue llegar a este estado, pero el inicio tecnológico se le debe a los tubos de descargas eléctricas, que son una forma útil de explicar la forma de conseguir el arco necesario, y de situarlo en los niveles necesarios de corriente y voltaje. Un tubo de descargas eléctricas clásico consiste sencillamente en una cabina aislada que contiene un gas a baja presión, que se ve atravesado por una corriente eléctrica cuando se le aplica un voltaje suficiente a sus electrodos.

4.1.2. Ventajas de la tecnología de gasificación por plasma

- La Gasificación no es incineración, ya que se realiza mediante una reacción en estado de plasma, de alta temperatura.
- Es cien por ciento amigable con el medio ambiente, destruye el 100% de moléculas de compuestos tóxicos y contaminantes.
- Prácticamente cero residuos después del proceso (<5% de ceniza inerte).
- Contribuye a la eliminación y necesidad de los rellenos sanitarios y confinamientos tanto en los residuos domiciliarios e industriales así como en los desechos tóxicos hospitalarios.

⁸¹ Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 41.

- Tiene una eficiencia 400% mayor en la conversión de materiales en energía, comparado con sistemas tradicionales de incineración y generación eléctrica mediante ciclo combinado.
- No produce Dioxinas ni Furanos⁸².

4.1.3. Ventajas de la gasificación por plasma frente a la incineración

Como un medio alternativo para la reducción de los residuos sólidos urbanos y revisada las ventajas y desventajas se decide elegir a la tecnología de plasma ya que este también tiene un costo de instalación mucho menor a las demás tecnologías mencionadas.

A continuación observaremos un cuadro donde se muestran las ventajas reales frente a la incineración porque este es el que le hace la competencia a la tecnología de plasma, pero veremos por qué no es eficiente⁸³.

Tabla 19: Gasificación por plasma frente a la incineración

GASIFICACION POR PLASMA	INCINERACION
Ocurre en ausencia de oxígeno, evitando la combustión	Se introduce exceso de aire para asegurar la combustión completa
Los gases resultantes de la degradación se utilizan para la producción de diferentes formas de energía o químicos industriales	Toda la energía potencial se convierte en calor
Los productos de la degradación se convierte en slag vitrificado inerte (no peligroso con un volumen del 6% al 15% del volumen de los residuos originales)	El resultado de la combustión son: cenizas (30% del volumen de los residuos originales), que deben ser tratadas posteriormente como residuos peligrosos
Las emisiones son considerablemente menores a las de la combustión	Emisiones al ambiente peligrosas

Fuente: WPC

⁸² Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 43-44.

⁸³ Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos. [en línea]. Argentina: Greenpace; 2011.

Por las ventajas frente a la incineración se aplicará la tecnología de plasma para tratar los residuos sólidos urbanos.

4.1.4. El proceso de la gasificación por Plasma en la eliminación de residuos

La gasificación es un proceso termoquímico ampliamente conocido mediante el cual toda sustancia sólida o líquida a la que, en una atmósfera reductora, se le aporta una cantidad de energía suficiente como para romper los enlaces moleculares, se transforma o bien en un gas de síntesis orgánico de alto poder calorífico o bien en una lava fundida que al enfriarse se transforma en un producto vítreo inerte. Si bien es un proceso en el que se dan algunas reacciones de oxidación, no es un proceso de combustión propiamente dicho. La gasificación es una tecnología simple y probada comercialmente.

En una primera aproximación, el proceso se utiliza para la conversión de materiales en un gas de síntesis limpio (Syngas) a través de la reacción de oxígeno y carbono con vapor. Este Syngas puro obtenido se deja enfriar y se purifica, siendo luego utilizado para una serie de propósitos: Syngas para químicos, combustibles gaseosos, combustibles líquidos para calderas comerciales para producir vapor, procesos de transferencia de calor y combustión interna en motores para producir energía eléctrica.

El mercado tradicional del Syngas está centrado en la producción de gas como un paso intermedio en la producción de otros productos químicos como el amonio. Sin embargo, la aplicación de la gasificación en otros procesos está incrementando debido a los cambios del mercado asociados a la mejora de turbinas de gas y la desregularización de la generación de potencia eléctrica.

Se habla de gasificación convencional cuando se trabaja a temperaturas que no superan los 1700 °C. Esto es lo que se conoce como gasificación incompleta, y puede dar lugar a subproductos residuales como alquitranes, escorias o cenizas. Las altas temperaturas superiores a los 1700 °C que se consiguen con las antorchas de plasma, permiten realizar el proceso de gasificación a alta temperatura, que es capaz de lograr una disociación molecular completa, evitando consecuentemente la presencia de subproductos tóxicos y

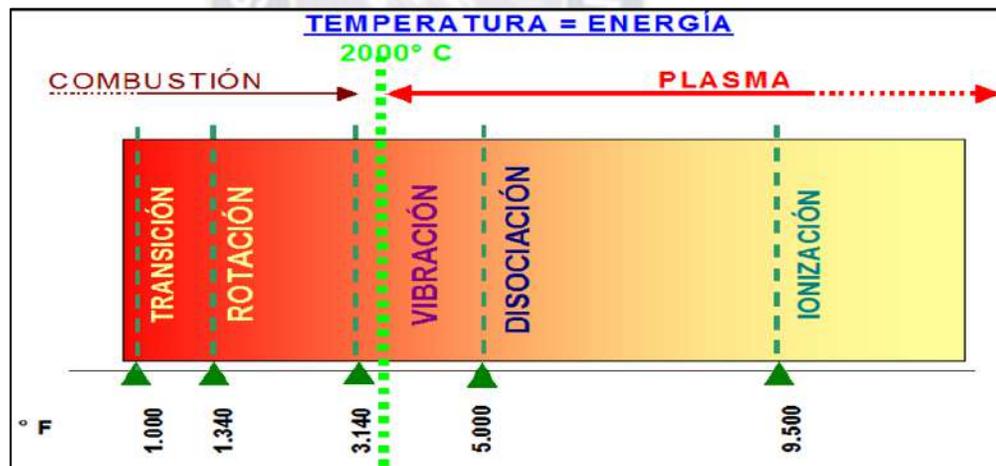
la formación de dioxinas y furanos. Precisamente por esto resulta un proceso útil a la hora de eliminar residuos, ofreciendo ventajas sobre otros procesos clásicos como la incineración.

La Tecnología de plasma es una alternativa a la combustión, obteniendo eficiencias energéticas del 70%. La ventaja consiste en reducir las emisiones atmosféricas y el volumen de escorias sólidas, gracias al proceso de vitrificación que convierte materiales tóxicos en inertes⁸⁴.

4.1.5. Características del proceso de gasificación por plasma

Las altas temperaturas permiten una disociación definitiva e irreversible de las estructuras moleculares en sus compuestos básicos.

Grafico 50: Rango de temperaturas en el proceso de gasificación por plasma



Fuente: disponible en:

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/>

Existe una disociación de las moléculas orgánicas y su transformación en un gas de síntesis. Las altas temperaturas del plasma provocan que en un reactor funcionando en condiciones reductoras se produzcan las siguientes reacciones:

⁸⁴ Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 48.

- *Cracking Térmico*: las moléculas complejas son disociadas en moléculas más ligeras formando gases de hidrocarburos e hidrógeno.
- *Oxidación parcial*: favorecen la formación del monóxido de carbono y accesoriamente de pequeñas cantidades de dióxido de carbono y de agua. Estos dos últimos compuestos resultantes de reacciones de oxidación completa tienen lógicamente un efecto negativo sobre el valor calorífico del gas de síntesis. Es indispensable, por tanto, controlar la entrada de oxígeno en el reactor.
- *Reformación*: ensamblan los elementos primarios en nuevas moléculas. Por ejemplo: La reacción entre carbono y agua dando lugar a monóxido de carbono e hidrógeno o la del dióxido de carbono y el carbono para dar lugar a monóxido de carbono. Estas reacciones favorecen la formación de un gas energético y la presencia en el mismo de elementos oxidados que disminuyen el poder calorífico del gas de síntesis.

En el proceso de gasificación, además del consumo energético hay que considerar los factores “temperatura” y “presión” tanto en cuanto la velocidad de las reacciones (cinética) como al grado de cumplimiento de las mismas (termodinámica). La formación de monóxido de carbono y de hidrógeno aumenta a medida que se incrementa la temperatura. En general al desarrollarse el proceso de gasificación entre 4.000 °C (en la zona plasmática) y 1.700 °C (temperatura de salida del gas de síntesis), se pueden conseguir una cinética alta de reacción, reducir el tamaño del gasificador y trabajar a presión atmosférica, lo que permite reducir los costes de construcción del mismo. El resultado final es que solo las moléculas básicas de CO₂ y H₂ son capaces de resistir las altas temperaturas que producen las antorchas de plasma, eliminando cualquier otro compuesto de los residuos iniciales.

Por otro lado, existe una destrucción de compuestos tóxicos, incluso los semivolátiles, evitando la formación de dioxinas, furanos u otros. Como se ha visto, la zona de disociación molecular empieza a partir de 2.700°C. A temperaturas inferiores pueden

existir moléculas no completamente disociadas, una parte de las cuales se encontrarán en las cenizas, mientras que la otra parte se volatizará en forma de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y/o semivolátiles (SVOC). Con el uso del plasma, todas las moléculas se disocian totalmente. Gracias a las altas temperaturas, también se habla de un proceso de fusión de moléculas inorgánicas y transformación en lava de tipo volcánico que al enfriarse forma un vidrio basáltico inerte (dejando atrapadas en la red cristalina los compuestos potencialmente peligrosos, como por ejemplo los metales pesados). Los ensayos oficiales realizados sobre este material han demostrado su total inocuidad, no toxicidad y no lixiviabilidad. Los más recientes estudios han concluido que además de no ser peligrosos se pueden considerar como materia valorizable y hay un estudio en curso para definir las múltiples aplicaciones⁸⁵.

- ✓ Conservación máxima de la energía contenida en los residuos, por las siguientes razones:
 - ✓ Uso de una fuente de calor externa para garantizar las elevadas temperaturas: la electricidad es una fuente de energía limpia que se va a producir en grandes cantidades a partir de la valorización energética del gas de síntesis.
 - ✓ Aprovechamiento máximo de los residuos, que se transforman en un gas de síntesis limpio, sustituto válido de los combustibles fósiles.
 - ✓ Aportación estrictamente controlada de oxígeno, evitando así las reacciones de oxidación total de los compuestos orgánicos.
 - ✓ El gas de síntesis obtenido por la gasificación de los compuestos orgánicos está formado mayoritariamente por monóxido de carbono e hidrógeno. Por su parte, los productos halogenados y con alto contenido de azufre se transforman en HCl, HF y H₂S que son tres productos relativamente fáciles de depurar. Esta depuración es bastante fácil por el reducido flujo másico a tratar

⁸⁵ Gasificación por plasma. [en línea]. Republica Checa; S.W.H.group. 2016.

✓ El balance energético:

El valor energético del gas de síntesis producido va a depender de los residuos o materiales tratados, sabiendo que para producir mayor poder calorífico se debe evitar la introducción en el gasificador de productos inertes o muy húmedos. En general, sin embargo, el combustible generado tiene un valor energético medio razonable (PCIs medios de 15 a 22 MJ/kg), dando lugar a un balance normalmente positivo. Una excepción son los residuos de muy bajo PCI (<1200 Kcal/kg), donde la energía recuperada será inferior al equivalente térmico de la electricidad consumida en el proceso.

✓ Ausencia de subproductos potencialmente tóxicos o dañinos:

Durante el proceso de gasificación los compuestos inorgánicos son fundidos para formar una lava vítrea de tipo basáltica que se extrae en la parte inferior del gasificador, manteniendo un nivel mínimo para facilitar la colada en continuo. Con la aportación de una pequeña cantidad de materiales fluidificantes se consigue mejorar la viscosidad de la lava y darle el grado de basicidad requerido para garantizar la no lixiviabilidad de los metales pesados y de sus correspondientes óxidos.

4.2. Reacciones químicas involucradas en el proceso

Las reacciones químicas que involucra el proceso de gasificación por plasma son los siguientes:





En el proceso de gasificación se producen más de 100 reacciones químicas, entre ellas las que se describen en este documento.

El calor necesario para que se produzcan las reacciones de reducción, (marcadamente endotérmicas y representadas en las reacciones [3] y [7]), se genera al tener lugar la oxidación, (de carácter exotérmico representada por [1]). Las reacciones de hidrogenación, [4] y [11], y reformado, [12] y [9], dependiendo de las condiciones (humedad y presión parcial de CO₂), tienen lugar en pequeña extensión.

El resultado final es un gas compuesto básicamente por H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H_n, H₂O, N₂, alquitranes en minoría y partículas sólidas en suspensión.

Destacar que las condiciones del proceso de gasificación por plasma logran conversiones de carbono a gas cercanas al 95% y una concentración muy baja de alquitranes del orden de 5 g/m³N de gas a la salida del gasificador⁸⁶.

4.3. Estudio del proceso de Gasificación

Una de las desventajas del proceso de gasificación por plasma que se ha comentado anteriormente, es la falta de definición de un proceso estándar. De hecho, cada grupo empresarial que se ha aventurado a trabajar con esta tecnología ha desarrollado sus propios procesos y tecnologías. Entre las empresas destacables se encuentran Westinghouse Plasma (del grupo Alter NRG), Plasco Energy Group, Europlasma e InEnTec (del grupo Waste Management Inc.).

⁸⁶GASIFIER TECHNOLOGY. [en línea]. Barcelona España: EQTEC;2014.pág. 2.

El grupo empresarial más antiguo en términos de esta tecnología es Westinghouse Plasma Corporation (WPC), que fue adquirido por Alter NRG en el año 2006. Con once proyectos realizados desde el año 1987, se colocan a la vanguardia de la aplicación del arco de plasma al tratamiento de residuos, siendo también los líderes en el desarrollo de plantas comerciales con balances energéticos positivos. Actualmente, su trayectoria les ha llevado al tratamiento de residuos sólidos urbanos, tóxicos, médicos y cenizas de incineración en Estados Unidos, Japón, China y La India⁸⁷.

4.3.1. Control y retratamiento de los residuos

Los residuos recibidos por la planta serán almacenados temporalmente por un tiempo muy pequeño en un almacén cubierto de cemento. Este almacén se utilizará para el control de la alimentación al sistema, y será donde se dividan los residuos en lotes para su procesamiento en el reactor de gasificación.

Los lotes de residuos, se colocarán sobre cintas transportadoras, que llevarán todos estos materiales a una tolva acoplada al reactor de gasificación. Una vez que la tolva está llena, se abrirá una válvula que permitirá al material entrar a la cúpula. El diseño incluye un sistema de tolva doble con el fin de que mientras una tolva está alimentando al reactor, una segunda tolva esté llenándose.

4.3.2. El reactor de Gasificación por Plasma

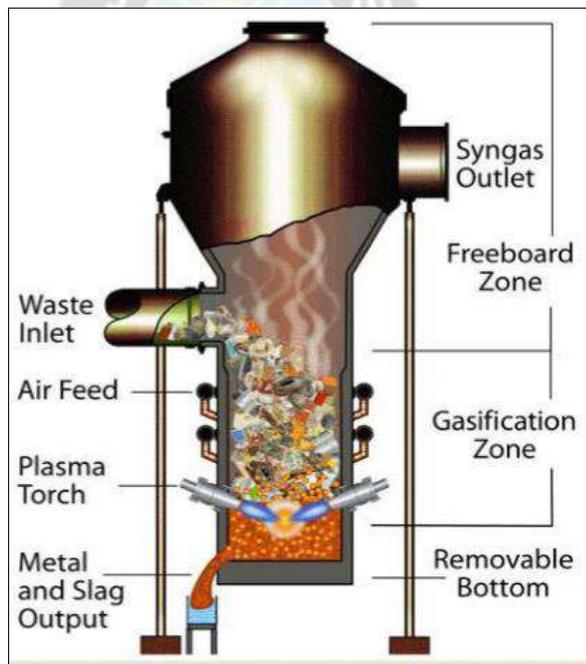
El reactor de gasificación por plasma está basado en una cúpula, que consiste en un horno de eje vertical que se ha usado convencionalmente en la industria de la fundición para derretir virutas de hierro y acero. Está protegido interiormente por material refractario para soportar las altas temperaturas del proceso y las condiciones corrosivas de operación.

Las reacciones de gasificación convertirán los componentes orgánicos de los residuos en un gas de síntesis que abandona el reactor por la parte superior, mientras que los

⁸⁷ GASIFIER TECHNOLOGY. [en línea]. Barcelona España: EQTEC;2014.pág. 6.

componentes inorgánicos se convertirán en slag derretido que sale del reactor por la parte inferior. El reactor opera a temperaturas muy altas en su parte inferior, así que se inyectará tanto aire como vapor durante el proceso. El gas de síntesis que abandona el reactor lo hace a temperaturas entre los 890 °C y los 1100 °C a presión cercana a la atmosférica. Una vez fuera del reactor, pasará por diferentes procesos de limpieza y enfriamiento. El slag derretido es una mezcla no combustible e inerte de inorgánicos y metales recuperables que será enviado al sistema de control de slag para ser procesado.

Grafico 51: Esquema básico del reactor de gasificación



Fuente: ALTER NRG

El modelo de reactor de gasificación, cuyo esquema básico se puede observar en el grafico 50. Representa un sistema con dos antorchas de plasma, lo cual debe estar en base al volumen de residuos que se quiere procesar.

Las antorchas están colocadas en la parte baja del reactor. Para conseguir el calor necesario para la gasificación a altas temperaturas generalmente se colocan seis antorchas en total.

El proceso que se produce en el reactor de gasificación se controla a través de la monitorización de la temperatura de los gases que salen del mismo. Para evitar la formación de alquitrán y la mezcla de pequeñas partículas con estos gases, las temperaturas de salida deben permanecer entre los 890°C y los 1100°C, como ya se ha mencionado anteriormente⁸⁸.

4.3.3. El sistema de antorcha de plasma

Está claro que la clave del control del proceso está en las antorchas de plasma, que son el centro del sistema. Gracias a ellas se podrá añadir más o menos calor, en función de la temperatura que se desee para el gas de síntesis. El resto de los elementos del sistema son necesarios para el correcto manejo de las antorchas.

Una antorcha de plasma consiste en un par de electrodos enfriados por agua. Dentro de cada uno de estos electrodos hay una descarga de arco eléctrico que se ve rotada magnéticamente a grandes velocidades. Durante esta operación, el gas de proceso se inyecta en la cabeza de la antorcha a través de un espacio de un milímetro existente entre los electrodos.

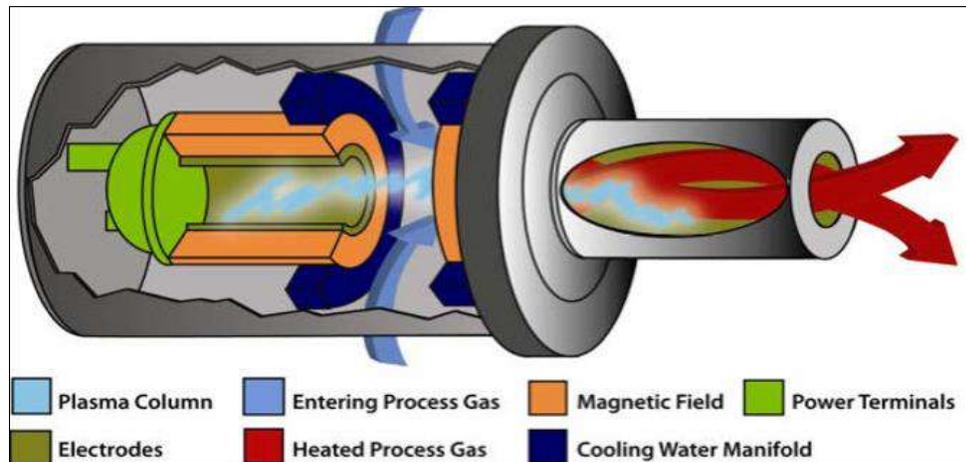
Una chispa entre ambos electrodos inicia el arco cuando se suministra potencia. El arco se dispersa inmediatamente en el interior del electrodo por el gas de proceso. La corriente del arco interactúa con un campo magnético establecido por una bobina colocada alrededor de ambos electrodos que rota el arco a aproximadamente 1000 revoluciones por segundo.

La combinación de las altas velocidades de rotación del arco y del flujo de gas produce una transferencia de calor superior entre el arco eléctrico y el gas entrante. Este proceso, además, ayuda a maximizar la vida de los electrodos.

⁸⁸ Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 83-84.

La interacción entre el arco y el gas produce las altas temperaturas que llevan al proceso a obtener la eficiencia térmica necesaria.

Grafico 52: Antorcha de plasma



Fuente: Antorcha utilizada por ALTR NRG

Las antorchas, de hecho, se insertan en unas cápsulas especiales que permiten el correcto funcionamiento del reactor de gasificación en todo momento. Las antorchas están rodeadas de aire para evitar que toquen las paredes y sufran deterioro o riesgo de derretirse. El interior de las cápsulas está hecho de un material refractario aislante.

4.3.4. Unidad de separación de aire

El reactor de gasificación requiere su propio suministro de oxígeno, para lo que se utiliza una unidad criogénica de separación de aire que produce una corriente líquida rica en oxígeno (95%). La pureza del oxígeno no es crítica para la operación del reactor de gasificación, pero una pureza menor del mismo aumentaría la cantidad de nitrógeno en el Syngas, lo que afectaría al tamaño de los equipos de tratamiento y, por lo tanto, al coste total. El oxígeno líquido se almacenará en tanques y se vaporizará cuando se requiera inyectar una corriente de oxígeno gaseoso en el reactor. Adicionalmente, se

produce nitrógeno como subproducto de la unidad de separación aire. Este se utilizará para la limpieza y el blanqueado de los equipos⁸⁹.

4.3.5. Limpieza del gas de síntesis

El gas de síntesis o Syngas que abandona el reactor por la parte superior contendrá algunos contaminantes que se deben eliminar antes de la utilización del mismo. Típicamente, el Syngas crudo podría contener:

- Partículas, incluyendo polvo de carbón, sales metálicas y compuestos metálicos.
- Gotas de líquido y aerosoles.
- Carbonilos de metal.
- Gases halógenos, como HCl, HF y HBr.
- Sulfuros, incluyendo H₂S, COS y SO₂.
- Nitrógenos, como NH₃ y HCN.

El Syngas se limpia en un proceso de varios estados, según como se describe a continuación.

- ✓ Enfriamiento brusco y eliminación de partículas y HCl

El Syngas caliente que sale del reactor pasa inmediatamente a un enfriamiento brusco y a un sistema de spray en torre. Esto permite eliminar un alto porcentaje de la carga de partículas y parte del HCl. Otra ventaja del proceso de enfriamiento brusco es que la reducción rápida de temperatura evita la formación de dioxinas y furanos. El gas enfriado y saturado de gotas de agua fluye a la torre de spray, que es una cápsula vertical dividida en dos secciones. La sección inferior funciona como un separador, y es donde el líquido se separa del Syngas

⁸⁹ Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 89 y 95.

y se bombea como líquido reciclado para el proceso de enfriamiento anterior. El Syngas fluye hacia arriba a través de una chimenea para entrar a una sección de absorción, donde pasa por una serie de espray. El espray superior inyecta hidróxido de sodio para que el gas de síntesis consiga un mayor pH y así elimine todo el HCl.

✓ Precipitador electrostático

Desde el último espray, el Syngas fluye hacia un Precipitador electrostático con el fin de eliminar pequeñas partículas y aerosoles. El Precipitador consiste en una serie de tubos colectores donde las partículas reciben una fuerte carga negativa producida por electrodos de alto voltaje. Al fluir el gas de síntesis a través de los tubos, la acción del campo eléctrico en las partículas cargadas hace que estas migren a las paredes de los tubos y se acumulen allí. Una película de agua fluye a lo largo de los tubos y elimina todo el material sólido.

✓ Compresión del Syngas

Para su uso en la turbina de gas, el Syngas se comprime a 2.4 MPa.

✓ Eliminación de azufres

Se utiliza un proceso de un solo estado que produce un producto sólido elemental del azufre. El Syngas entra en un reactor de absorción donde entra en contacto con un disolvente limpio (en este caso SO₂), que reacciona con el H₂S para formar un azufre que permanece disuelto en una solución de SO₂ líquido. El gas de síntesis limpio abandona el reactor y es enfriado una vez más antes de ser utilizado.

4.3.6. Control y uso del slag

Los componentes metálicos y minerales de los residuos son convertidos en slag derretido gracias a las altas temperaturas en la base del reactor de gasificación. Se añade caliza al proceso para controlar la viscosidad de este slag. El slag abandona el reactor de forma continua a través de un agujero a la temperatura de 1650 °C. Un canal recubierto de material refractario lleva al slag a una tubería de extracción donde se encuentra con

espray de agua a presión que consigue que el slag se rompa para formar pequeños gránulos.

Estos gránulos se dejan caer en un baño de agua y se colectan en una cinta transportadora. Este material después pasa por debajo de un separador magnético que separa los gránulos de metal ferroso de los gránulos minerales. La intención de este proceso es la de reciclar el slag vitrificado como material agregado para aplicaciones de construcción⁹⁰.

4.3.7. Subproductos del proceso

Existen tres subproductos principales que son resultado del proceso de gasificación por plasma: gas de síntesis (Syngas), cristal vitrificado (slag) y calor.

El Syngas es una mezcla de varios gases, comprendiendo principalmente CO y H₂. Se puede utilizar como fuente de combustible, y algunas plantas lo utilizan para auto proveerse de potencia y para vender el exceso de electricidad a la red eléctrica.

Los residuos contienen una gran cantidad de energía potencial, y el proceso de gasificación permite a los ingenieros convertir esta energía potencial en energía eléctrica. ¿Cuánto gas se genera en un convertidor de plasma? Eso depende del material inicial. Si los residuos contienen materiales basados en carbono (es decir, materiales orgánicos), entonces se obtiene más gas. Los residuos con muchos materiales inorgánicos no obtendrán tanto gas. Debido a esto, algunas plantas separan los residuos antes de tratarlos.

El subproducto sólido del proceso de gasificación se llama slag y es un cristal vitrificado de características y posibilidades interesantes. En primer lugar, se debe hacer notar que el peso y volumen del material residuo original se reduce dramáticamente.

- El peso del slag es el 20% del peso del residuo original.

⁹⁰ Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 102.

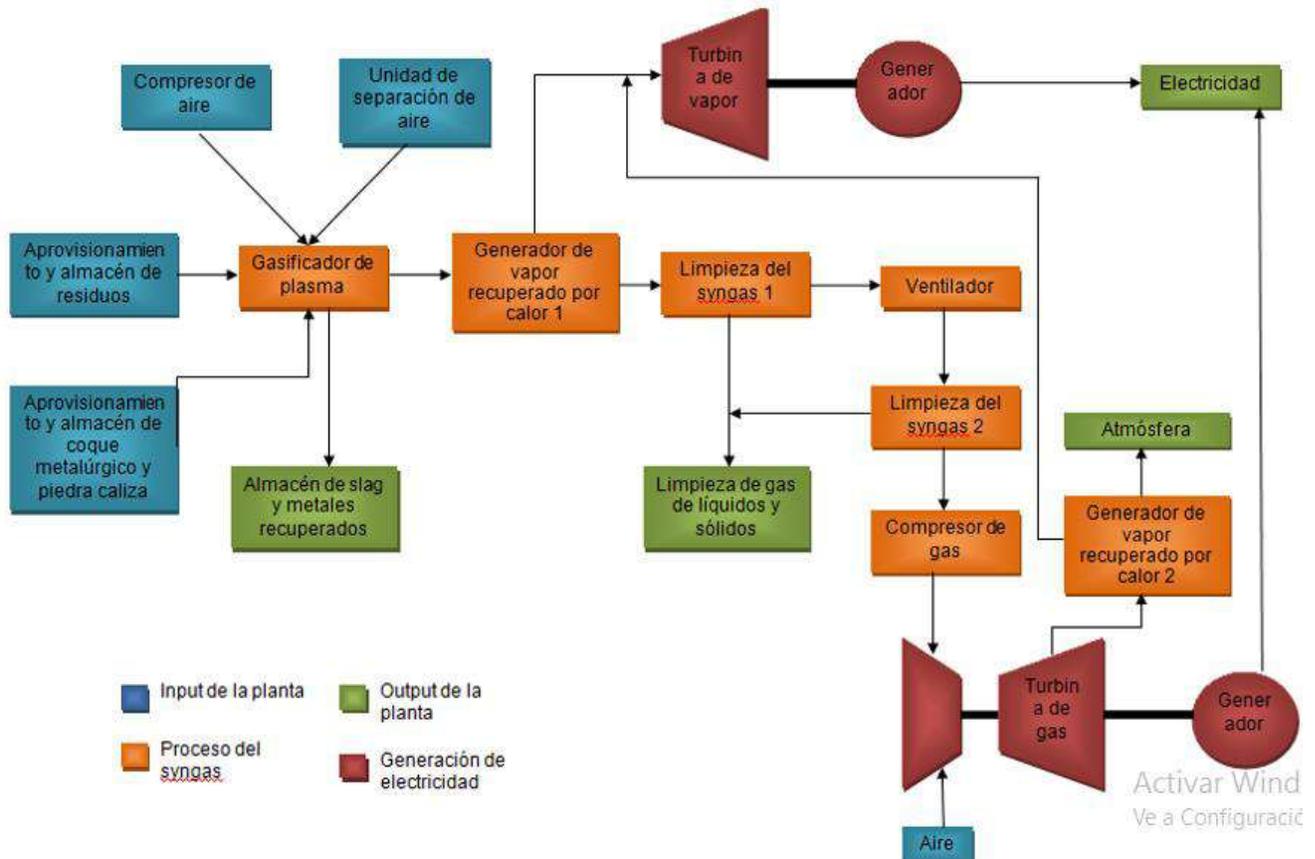
- El volumen del slag es el 6% del volumen del residuo original.

El slag puede tomar diferentes formas en función del proceso de enfriamiento. Por ejemplo, el slag enfriado con agua forma una clase de arena de la que se pueden separar fácilmente nódulos de metal.

El calor creado por las plantas de plasma es considerable, medido en miles de °C. El calor del slag derretido ayuda a mantener la temperatura en los hornos. Este calor se puede utilizar para convertir agua en vapor, que puede se puede utilizar para el funcionamiento de turbinas para generar electricidad⁹¹.

4.4. Layout del Proceso

Grafico 53: Proceso de gasificación por plasma

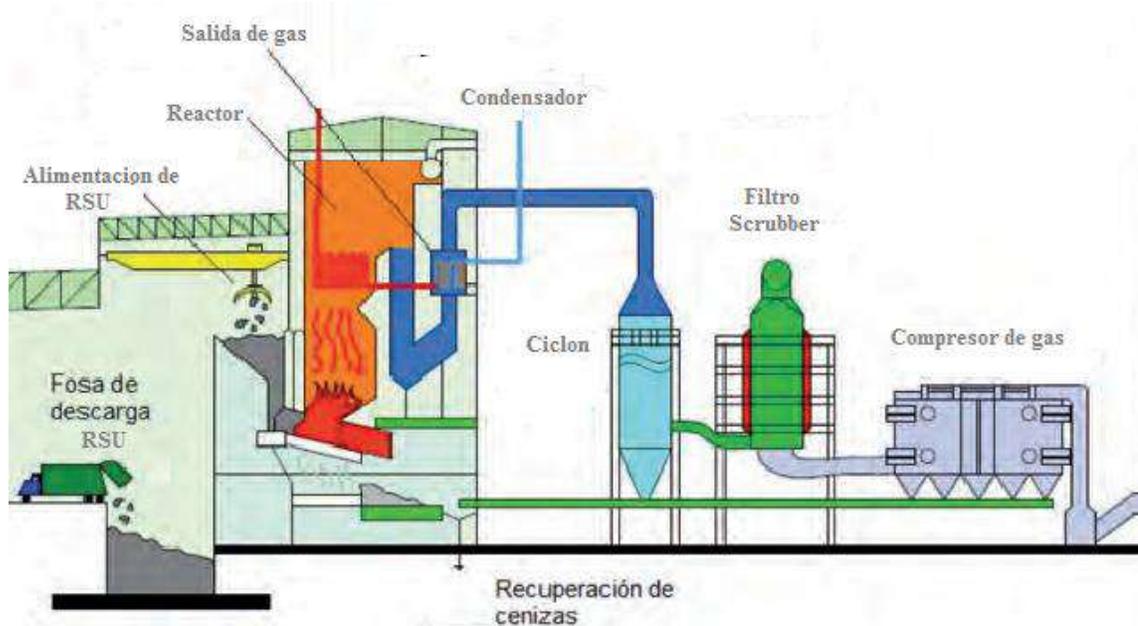


Fuente: disponible en: <http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/file>

⁹¹ Tecnología de gasificación por plasma. [en línea]. Quito-Ecuador: UNIDECO; 2013.

4.7.1. Descripción de las etapas del proceso

Grafico 54: Proceso de gasificación por etapas



Fuente: Esquema de gasificación de EQUTEC

Etapa 1.- El proceso comienza con la descarga de los residuos sólidos urbanos hacia la fosa de descarga, donde se realiza una previa separación y clasificación.

Etapa 2.- Los RSU son triturados según al tamaño de partícula que se requiera.

Etapa 3.- Los RSU son alimentados al reactor de gasificación por plasma, donde la temperatura previa, a la alimentación supera los 1000 ° C.

Etapa 4.- El gas convertido sale del reactor hacia un condensador.

Etapa 5.- El gas enfriado pasa a un ciclón separador de polvos y partículas.

Etapa 6.- El gas libre de polvo pasa a un filtro scrubber para eliminar, moléculas acidas.

Etapa 7.- Finalmente el gas de síntesis es comprimido para ser aplicado en diferentes procesos.

CAPITULO V: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

En el Anterior capítulo se detalló el funcionamiento de la tecnología de plasma a nivel general, en este capítulo detallaremos el diseño y construcción del prototipo de gasificación por plasma.

5.1. Características del Prototipo

El prototipo se diseñará en base a la tecnología de gasificación por plasma, este contendrá 6 etapas de procesamiento para la conversión de los residuos sólidos, en el prototipo cada etapa representará una unidad o equipo, para que finalmente el prototipo se diseñe y se construya, es necesario determinar la capacidad y el volumen a procesar.

Para tal efecto detallaremos a la unidad principal del prototipo, que viene a ser el reactor de gasificación por plasma, esta unidad representa la parte crítica del prototipo, ya que sin este no se podrá convertir los residuos sólidos en gas de síntesis.

5.2. Tipos de Reactores de Gasificación

“Existe una amplia variedad de reactores que se utilizan para los procesos de gasificación por plasma. Su elección depende de varios factores, como pueden ser la granulometría de los residuos sólidos, la humedad, la limpieza del gas de síntesis requerida o según el manejo del combustible”.⁹²

Los reactores usados en la gasificación por plasma de los residuos sólidos de acuerdo a su forma de contacto Solido-Gas se pueden dividir en tres principales categorías:

- Lecho fijo o cama móvil
- Lecho fluidizado
- Flujo arrastrado

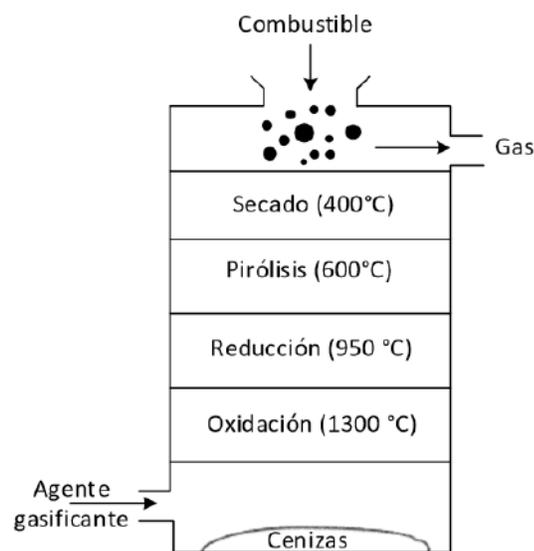
⁹² (Bordas y Elías, 2011; IDAE, 2007).

A continuación, se describirá de manera general el principio de cada tipo de gasificadores por plasma.

5.2.1. Lecho fijo o cama móvil

En este tipo de reactores el medio de gasificación (aire, oxígeno y vapor de agua o una combinación) transporta lentamente las partículas de residuos sólidos o biomasa hacia abajo del reactor por gravedad en un lecho fijo generando de esta manera el gas. Estos reactores también son denominados de cama móvil, debido a que el combustible se mueve hacia abajo del gasificador como un tapón. Una ventaja de estos equipos es que son construidos a bajos costos debido a sus pequeñas dimensiones. La capacidad de estos equipos se encuentra entre 10 KWh - 12 KWh. Entre estos gasificadores se encuentran los de lecho en flujo descendente (downdraft) y ascendente (undraft) y flujo entrecruzado o crossdraft⁹³.

Grafico 55: Gasificador de lecho fijo en flujo ascendente



Fuente: Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado Universidad de Sevilla, 2009.

⁹³ Macías Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. Pag. 27.

En la parte superior del equipo se encuentra la alimentación del combustible y la región de secado y pirolisis debido a los efectos de transferencia de calor tanto por convección forzada como radiación, los alquitranes y los productos generados a través de los procesos son arrastrados por la corriente de gas, mientras que las cenizas son retenidas en la parte inferior del gasificador.

Algunas de las ventajas de este tipo de gasificador son:

- Su facilidad de uso
- Poco material inquemado.
- El gas presenta temperaturas bajas a la salida.
- Una alta eficiencia del proceso
- Costos de inversión relativamente bajos.

5.2.2. Lecho fluidizado

Un lecho fluidizado está compuesto de sólidos granulares, los cuales se mantienen en un estado semi-suspendido (estado fluidizado) por los cuales pasa el agente gasificante a velocidades controladas. Los gasificadores de lecho fluidizado ofrecen un excelente mezclado de la biomasa o residuos sólidos a gasificar y el agente gasificante, promoviendo la transferencia de calor y masa en el sistema. Esto asegura una distribución uniforme del material en lecho y solo una pequeña cantidad del material alimentado es eliminado junto con las cenizas producidas⁹⁴.

Estos tipos de gasificadores no se ven afectados por la calidad del combustible debido a la excelente mezcla solido-gas y la gran inercia térmica del lecho, esto propicia que el material alimentado no se aglomere.

Los gasificadores de lecho fluidizado son apropiados para unidades de tamaño medio, es decir con capacidades de 5 MWh-100 MWh. Son apropiados para la gasificación de biomasa ya que la producción de alquitranes son bajas (10 g/N m³).

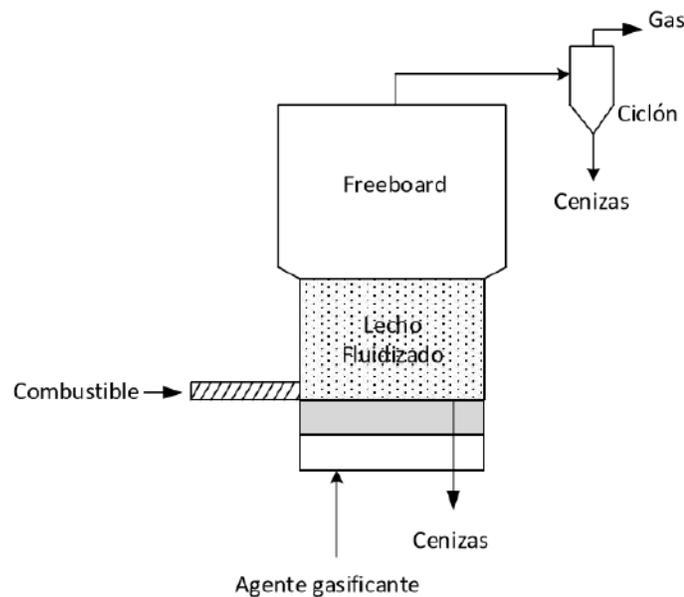
⁹⁴ Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. 2015. Pág. 29.

Por otro lado, la temperatura de operación de estos gasificadores está restringida a ser menor del punto de fusión de las cenizas ya que estas se convierten en escorias y pueden perturbar la fluidización del lecho. Una de las ventajas es que cuando las partículas a fluidizar y gasificar (Residuos sólidos) deben estar completamente trituradas para alcanzar una conversión máxima de estos cercanos al 92% de conversión en teoría.

Existen diferentes tipos de gasificadores de lecho fluidizado entre ellos se encuentran los de tipo burbujeo, circulación y de dos lechos.

En este caso el más apto para la gasificación de residuos sólidos es el de circulación ya que el gas portador circulara de forma ascendente en forma de calor y gasificara las partículas de residuos sólidos que estarán en forma descendente.

Grafico 56: Gasificador de Lecho Fluidizado



Fuente: Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado Universidad de Sevilla, 2009.

Este tipo de lecho se caracteriza por la alta velocidad de reacción y excelente mezcla de materia prima, haciendo que los perfiles de temperatura y conversión sean uniformes permitiendo controlar más fácilmente las condiciones de operación del proceso.

Ventajas:

- Altas velocidades de reacción.
- Los niveles de alquitranes son bajos en los gases producidos.
- La temperatura es relativamente uniforme en la longitud del reactor.
- Son posibles altas conversiones con bajo contenido de alquitranes.
- Mayor tolerancia a la distribución de tamaño de partícula.

5.2.3. Flujo arrastrado

Este tipo de reactores de gasificación la alimentación y el agente gasificante son alimentados en contracorriente. El tiempo de residencia de estos reactores es corto, alrededor de segundos, el combustible se debe alimentar en un tamaño igual o menor a 100 micras para promover la transferencia de masa y el permitir el transporte del gas. Un inconveniente es el manejo de temperaturas muy altas (mayores a 1900 °C) para evitar una mala conversión debido al corto tiempo de residencia. Este aumento de la temperatura trae un aumento en los costos de operación. Todos los gasificadores de flujo arrastrado operan en un rango de temperaturas propicio para convertir las cenizas en escorias, las altas temperaturas también demandan una gran cantidad de oxígeno.

Estos gasificadores son adecuados para todo tipo de carbón excepto para el de bajo rango como el lignito y la biomasa por su alto contenido de humedad. Los gasificadores de lecho arrastrado son usados para grandes operaciones ya que pueden abastecer una demanda de energía mayor a 50 MWh.⁹⁵

5.3. Elección del reactor

Según lo descrito anteriormente el reactor de lecho fluidizado se adapta más a los requerimientos del proceso seleccionado ya presenta más ventajas que los demás tipos

⁹⁵ Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. 2015. Pág. 29.

de reactores de lecho, en general para elegir al reactor adecuado se tomara un aspecto crítico para el funcionamiento del reactor que es el modo de contacto que existe entre el gas y el sólido a gasificar, ya que este parámetro será el punto crítico para llegar a una conversión mayor al 90 %.

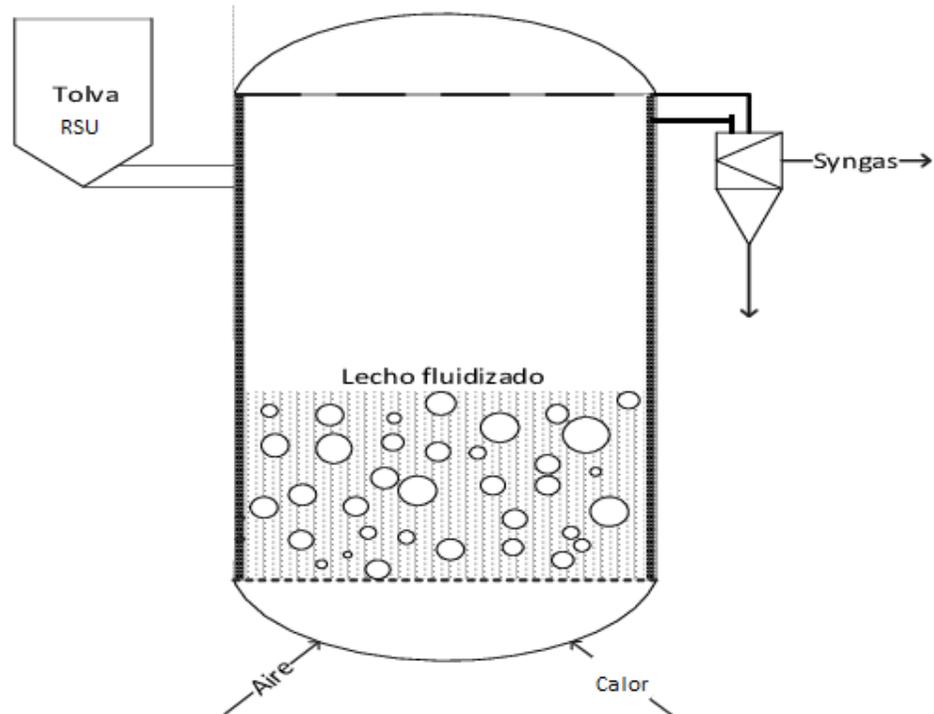
Tabla 20: Modo de contacto en reactores de lecho

TIPO	MODO DE CONTACTO
Gasificador de lecho fijo (Flujo descendente)	El Sólido y el gas circulan en la misma dirección, que es descendente.
Gasificador de lecho fijo (Flujo Ascendente)	Ocurre separación de sólidos en la corriente gaseosa. Los sólidos inertes son arrastrados, separados y recirculados al reactor en forma ascendente.
Gasificador de lecho Fluidizado (burbujeante)	La Velocidad del gas es relativamente baja. Los sólidos inertes permanecen en el reactor. Un sólido inerte puede ser la arena.
Gasificado de lecho Fluidizado (circulante)	El Sólido y el gas circulan en dirección contraria. El sólido circula en dirección descendente y el gas a alta temperatura circula en dirección ascendente.
Gasificador de lecho fluidizado (arrastrado)	La velocidad del gas es alta. Normalmente no existen sólidos inertes, la alta velocidad del gas genera elevadas velocidades de transformación.
Gasificadores paralelos o dobles	La gasificación se produce con vapor en el primer reactor y el carbón producido es transportado hacia el segundo reactor, donde ocurre la combustión para calentar el medio fluidizante de recirculación.
Gasificadores rotatorios	Nos proporciona un buen contacto solido - gas.

Fuente: *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification*. Elsevier, 2013.

En el gasificador de lecho fluidizado el agente gasificante mantiene en suspensión inerte al combustible, hasta que las partículas de éste se gasifican, se convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del gas de síntesis, debido a que en el modo de contacto el gas y el sólido circulan en dirección contraria. Motivó por el cual se decide por el reactor de lecho fluidizado circulante, ya que este también puede actuar en forma de un lecho fluidizado burbujeante.

Grafico 57: Reactor de lecho fluidizado



Fuente: *Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado* Universidad de Sevilla, 2009.

Se decide utilizar este reactor por que utilizan partículas más pequeñas como alimentación, tiene un flujo ascendente del agente oxidante, implementan portadores de calor sólidos con el fin de aumentar la transferencia de calor. Facilita un flujo de alimentación alta, se puede controlar fácilmente la temperatura y son capaces de ser presurizados. Sin embargo, solo convierten el 95 % - 97 % de la biomasa, en este caso los residuos sólidos.

5.4. Aspectos generales de diseño del prototipo

Una vez seleccionado el tipo de reactor de gasificación a utilizar se realizará una revisión de los aspectos generales que se debe tomar en cuenta para el posterior diseño del reactor de gasificación, ya que este es la unidad principal para la construcción del prototipo.

5.4.1. Fluidización

Un lecho fluidizado es un lecho de partículas sólidas en suspensión por efecto del flujo ascendente de un fluido. Dependiendo del tipo de fluido se pueden distinguir dos tipos de lechos fluidizados: el gas-sólido y el líquido-sólido.

No obstante, casi todas las aplicaciones comerciales conciernen a sistemas gas-sólido.

5.4.2. Etapas de Gasificación en Lecho Fluidizado

Existen tres etapas fundamentales en el proceso de gasificación las cuales son: secado, pirolisis y gasificación (Oxidación + Reducción)⁹⁶.

5.4.2.1. Secado/Volatilización

En esta etapa el combustible que se alimenta en el gasificador es sometido a un aumento de temperatura, en el cual ocurre una evaporación física de la humedad contenida en el combustible, liberando agua hasta alrededor de los 200°C. En la medida que se va aumentando la temperatura, se van volatilizando los compuestos de bajo peso molecular.

5.4.2.2. Pirolisis

Es la primera etapa de degradación del combustible, cuando se somete a un ambiente en ausencia de oxígeno, la estructura molecular del combustible (biomasa o carbón) se descompone generando gases de síntesis, char (residuo sólido carbonoso) y compuestos orgánicos condensables (alquitranes o tarses).

Esta etapa es influenciada por el tamaño de partícula del lecho y su naturaleza, las condiciones de operación (temperatura, presión, tiempo de calentamiento, tiempo de residencia). Se da entre 150 a 700 °C

⁹⁶ M.Iborra, J.Tejero, F.Cunill. Reactores multifasicos. ERQ. [en línea]. 2013.

5.4.2.3. Gasificación

En esta etapa se dan las reacciones endotérmicas y las reacciones exotérmicas producidas por la desintegración del material orgánico, incluyendo las reacciones de oxidación y las reacciones de reducción para producir las mezclas de gases de interés, compuestas principalmente por monóxido de carbono e hidrógeno. Se da entre 800 a 1100°C.

5.4.3. Agentes gasificantes

Los agentes gasificantes comúnmente utilizados en el proceso de gasificación son las mezclas de vapor y oxígeno o vapor y aire; además se puede usar el hidrógeno a presión; cuando se utiliza hidrogeno se conoce como hidrogasificación, el gas obtenido de este proceso posee un alto poder calorífico. Dependiendo de los agentes gasificantes utilizados y la presión a la que se opera, los gases obtenidos poseen diversos usos y diferente poder calorífico.

Tabla 21: Tipos de agentes gasificantes y usos de los gases producto de la gasificación

Agente Gasificante	Tipo de Gas	Componentes	Usos
Aire + Vapor A baja presión	Gas de bajo poder calorífico	H ₂ , CO, CO ₂ , N ₂	Combustible Industrial
Aire + vapor a alta presión	Gas de mediano poder calorífico	H ₂ , CO, CO ₂ , N ₂ , CH ₄	Generación de Potencia
O₂ + vapor a baja presión	Gas de síntesis poder calorífico medio	H ₂ , CO, CO ₂	Síntesis de gasolina, reducción de minerales
O₂ + vapor a alta presión	Gas de poder calorífico medio	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄	Generación de potencia, sustituto del gas natural

Fuente: A. Ocampo, "generalidades sobre gasificación," 2005.

5.4.4. Sistema Gas – Sólido en lecho fluidizado

Si se hace circular un gas a través de un lecho de sólidos, con dirección descendente, no tiene lugar ningún movimiento relativo entre las partículas a menos que la orientación inicial de las mismas sea inestable. Si el flujo es laminar, la caída de presión a través del lecho será directamente proporcional a la velocidad de flujo del gas, aumentando más rápidamente a grandes velocidades.

Si el gas circula a través del lecho en dirección ascendente, la caída de presión será la misma que en el caso anterior para velocidades bajas, pero cuando la resistencia por rozamiento sobre las partículas sea igual a su peso aparente (peso real menos empuje), estas sufren una reordenación para ofrecer una resistencia menor al desplazamiento del gas y el lecho empieza a expansionarse. Este proceso continúa al ir aumentando la velocidad, permaneciendo la fuerza debida a la fricción igual al peso de las partículas, hasta que el lecho ha adquirido la forma más suelta de relleno. Si entonces se aumenta aún más la velocidad, las partículas del sólido se mantienen en suspensión en la corriente gaseosa, diciéndose que el lecho está fluidizado. Al valor de la velocidad superficial necesaria (caudal de gas/sección total) para que se inicie la fluidización se le denomina velocidad mínima de fluidización [umf]. Posteriores aumentos de la velocidad hacen que las partículas se separen aún más unas de otras, permaneciendo la diferencia de presiones aproximadamente igual al peso por unidad de área del lecho.

La fluidización uniforme se obtiene únicamente a velocidades relativamente bajas. A velocidades elevadas se forman dos "fases" separadas: la fase continua se denomina fase densa o de emulsión, y a la discontinua, fase ligera o de burbujas. Se dice entonces que la fluidización es de agregación. El lecho toma el aspecto de un líquido en ebullición, moviéndose los sólidos vigorosamente y ascendiendo rápidamente grandes burbujas a través del lecho⁹⁷.

⁹⁷ Juan A. Conesa Ferrer; Diseño de Reactores Heterogéneos. ERQ. [en línea]. 2011. pag. 4-5.

5.4.5. Clasificación de Geldart de partículas

En la fluidización gas-sólido puede existir un régimen homogéneo, cuando las partículas son pequeñas, que se convierte en régimen de burbujeo (grandes huecos libres de sólidos que ascienden) al aumentar el caudal de gas, tras alcanzar el punto de mínimo burbujeo. Si las partículas son medianas o gruesas, el régimen de burbujeo se alcanza directamente tras pasar el punto de mínima fluidización.

Estas burbujas libres de sólidos aparecen en la parte inferior del lecho, en el distribuidor, y crecen y coalescen (se unen) a medida que atraviesan el lecho, produciendo una intensa agitación, tanto más grande cuanto mayor sea la frecuencia de aparición y tamaño de estas burbujas.

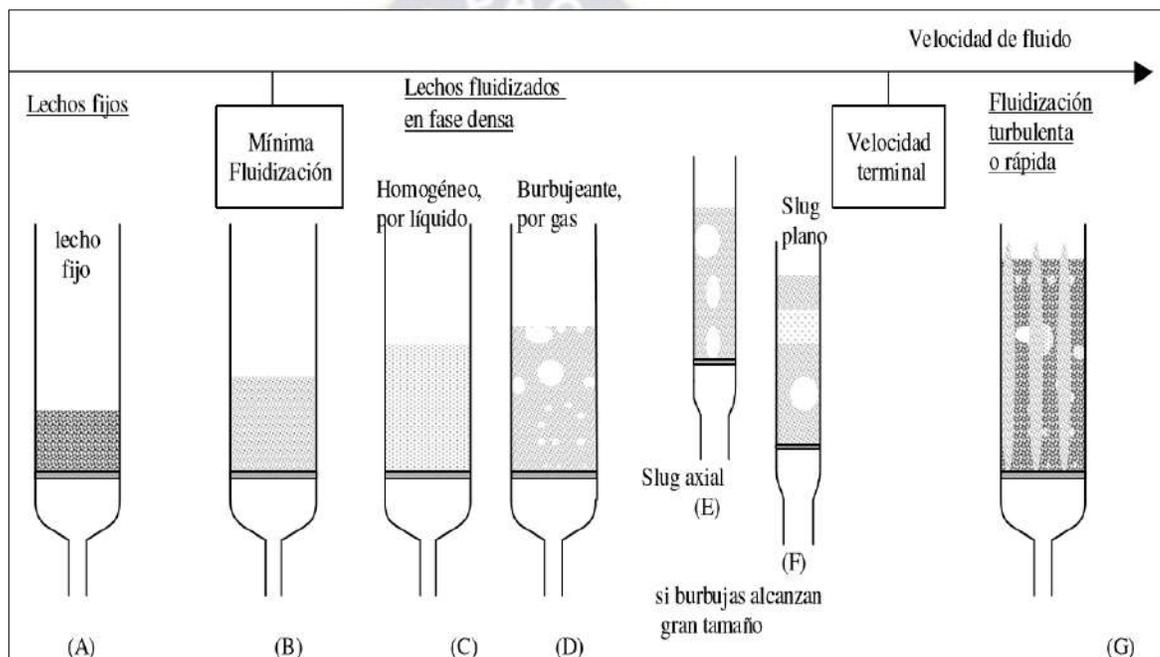
$$d_p = \text{diámetro de las partículas}$$

- Grupo A: d_p pequeño y/o baja densidad (< 1 mm) y ($< 1,4$ g/cm³). Son partículas aereables, flotan con facilidad, fluidizan con facilidad sin formarse muchas burbujas incluso a velocidades de gas altas.
- Grupo B: (tipo arena) ($< d_p$ 2mm) (< 4 g/cm³). Fluidizan bien con fuerte borboteo y de gran tamaño de burbujas.
- Grupo C: ($3 < d_p < 5$) mm. Son partículas cohesivas que son extremadamente difíciles de fluidizar.
- Grupo D: (piedras o grava) d_p grandes y/o pesadas (ρ grandes)

El grupo A y B es el que se adecua a los propósitos del proyecto ya que la densidad y diámetro de las partículas deben estar en el rango indicado.

Si observamos en el gráfico 58, vemos que, para diferentes regímenes de fluidización, la distribución de los sólidos en el lecho cambia. A mayor velocidad de gas los diferentes regímenes son: lecho burbujeante, fluidización turbulenta, fluidización rápida y arrastre neumático⁹⁸.

Grafico 58: Regímenes de Fluidización

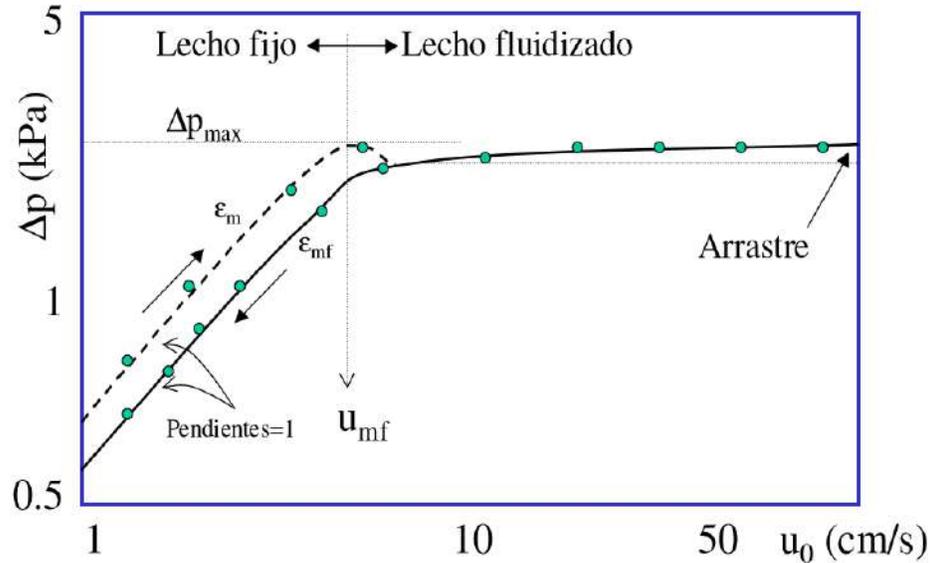


Fuente: Leven Spiel. Ingeniería de las reacciones químicas pág.448

En los lechos fijos principalmente en el punto B donde existe una mínima fluidización la variación de presión es lineal con pendiente igual a 1 lo que indica que la presión es directamente proporcional a la velocidad de las partículas, en los regímenes de lecho fluidizado a partir del punto C hasta el punto F la variación de presión se mantiene constante ya que en un lecho fijo se alcanzó una presión máxima como se puede observar en el siguiente gráfico.

⁹⁸ Leven Spiel. Ingeniería de las reacciones químicas. México: Limusa Wiley 3ed; 2004. Pág. 448.

Grafico 59: Fluidización y regiones



Fuente: Leven Spiel, Ingeniería de las reacciones químicas pág.447

El gráfico 59 muestra claramente que la variación de presión en un lecho fijo incrementa de manera instantánea y lineal, es decir que un reactor de lecho fluidizado al principio se comporta como uno de lecho fijo hasta llegar a un punto máximo donde la presión ya no incrementa de forma brusca y desde ese punto el comportamiento del reactor de lecho fluidizado se comporta como tal y la presión se mantiene constante debido a que los sólidos o partículas dentro del lecho van colisionando de forma homogénea y generan una presión constante⁹⁹.

5.4.6. Velocidad del gas y U/U_{mf}

Uno de los parámetros determinantes para el correcto funcionamiento de los reactores de gasificación en lecho fluidizado es la velocidad del gas y la relación de velocidad mínima de fluidización (U/U_{mf}) puesto que de forma directa influye sobre el tiempo de residencia y los rendimientos del reactor. De acuerdo con lo estipulado por Basu, los lechos fluidizados operan en un rango de velocidades que van desde 1 m/s a 1,5 m/s,

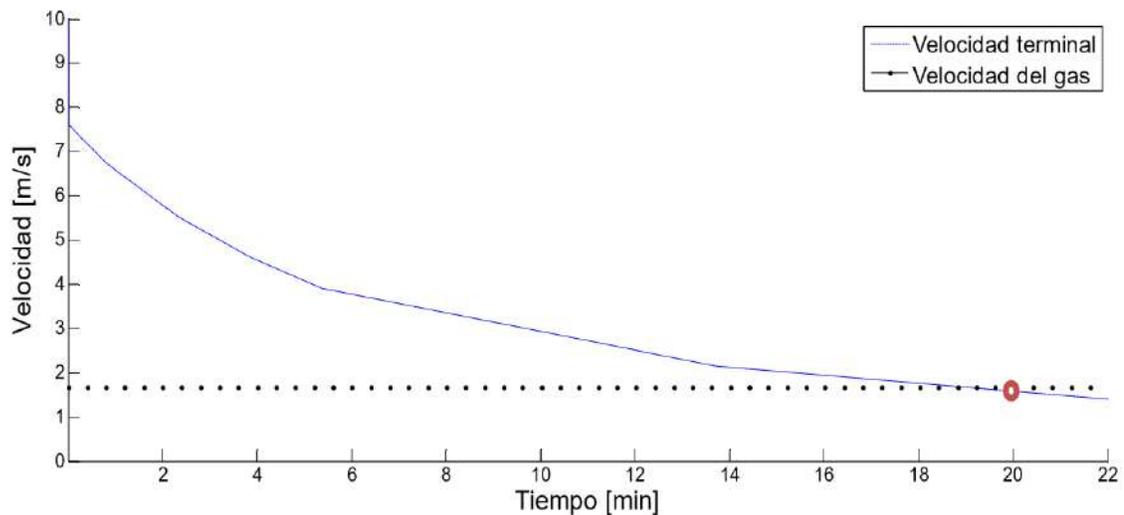
⁹⁹ Leven Spiel. Ingeniería de las reacciones químicas. México: Limusa Wiley 3ed; 2004. Pág. 451.

este rango se puede adaptar al modelo de velocidad terminal teniendo en cuenta el tamaño de partícula y el grado de conversión requerido. Para partículas de 2 mm se estableció como parámetro de operación de 1,2 m/s a 2 m/s o lo que corresponde a una relación de 2,5 a 4 veces la velocidad mínima de fluidización¹⁰⁰.

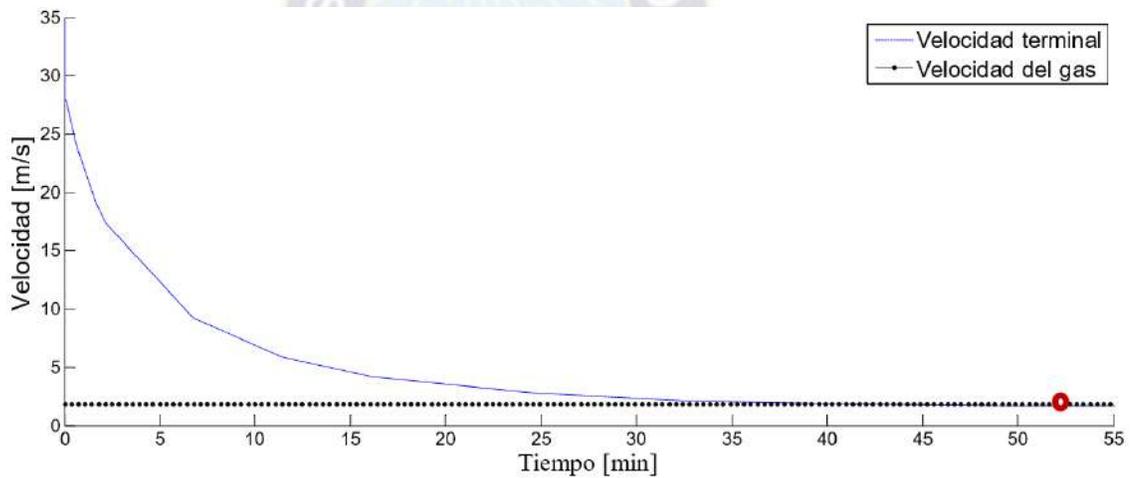
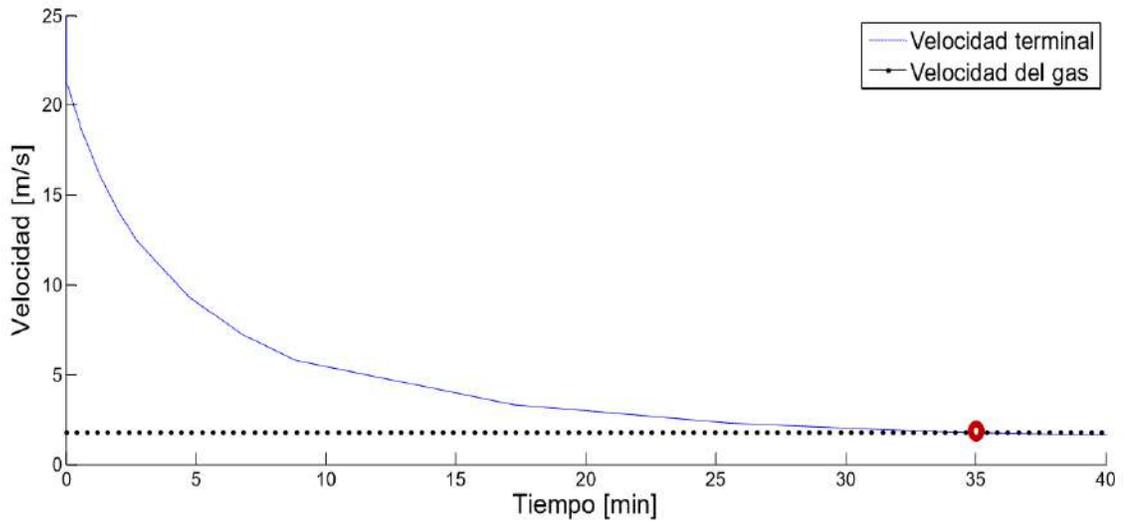
5.4.7. Tiempo de residencia

El tiempo de residencia depende de la velocidad del gas y la tasa de conversión, es decir, a medida que las partículas reaccionan la densidad disminuye y de igual manera su velocidad terminal. Cuando la velocidad del gas es superior a la velocidad terminal la partícula es expulsada del lecho. De acuerdo con esto, en el grafico 4 se muestra el tiempo de residencia para partículas de 1 mm, 2 mm y 3 mm para una misma velocidad del gas con el fin de analizar la variación del tiempo de residencia con el diámetro de la partícula, la pérdida de masa y la velocidad terminal para cada tamaño.

Grafico 60: Tiempo de residencia para partículas de 1 mm, 2 mm y 3 mm de diámetro respectivamente, con velocidad del gas de 1,6 m/s



¹⁰⁰ Leven Spiel. Ingeniería de las reacciones químicas. México: Limusa Wiley 3ed; 2004. Pág. 449.



Fuente: Escalado de reactores en lecho fluidizado por José Macías

El tiempo de residencia aumenta con el diámetro de partícula, como era de esperarse, el tiempo de residencia para un reactor de lecho fluidizado es de 20 minutos, 35 minutos y 53 minutos para tamaños de 1, 2 y 3 mm respectivamente.

Las partículas de 3 mm de diámetro requieren una velocidad del gas de 35 m/s para ser expulsadas del lecho frío y tamaños de 1 mm una velocidad de 10 m/s. En los tres casos las partículas presentan una pérdida de masa instantánea debido al proceso de

desvolatilización del carbón, luego va decayendo hasta volverse casi asintótico puesto que la reacción del material carbonoso se da casi en su totalidad¹⁰¹.

5.4.8. Conversión de partículas

Las partículas de menor tamaño (1 mm) tienen un menor tiempo de residencia, por lo tanto, su conversión alcanzara entre el 60% y 78%, Las partículas de 2 y 3 mm tiene un comportamiento similar en cuanto la conversión, aun así los tiempos de residencia variaran significativamente entre ellos, para lograr una conversión del 82% se necesitaran 50 minutos aproximadamente dentro del lecho y para partículas de 2 mm se alcanzara la misma conversión en 35 minutos. Esto sugiere que las condiciones que se establecerán más adelante el punto de operación pueden reducirse a tamaños de partícula de 2 mm, velocidad del gas de 1,5 a 1,7 y tener conversiones del 78 al 80%.¹⁰²

5.5. Descripción global del proceso de gasificación por plasma

El sistema de gasificación que se propuso para tratar los residuos sólidos urbanos estará integrado por: un reactor de lecho fluidizado, un cambiador de calor (condensador) de tubo espiral, un separador ciclón de partículas, un lavador de gases tipo scrubber, y un sistema de succión.

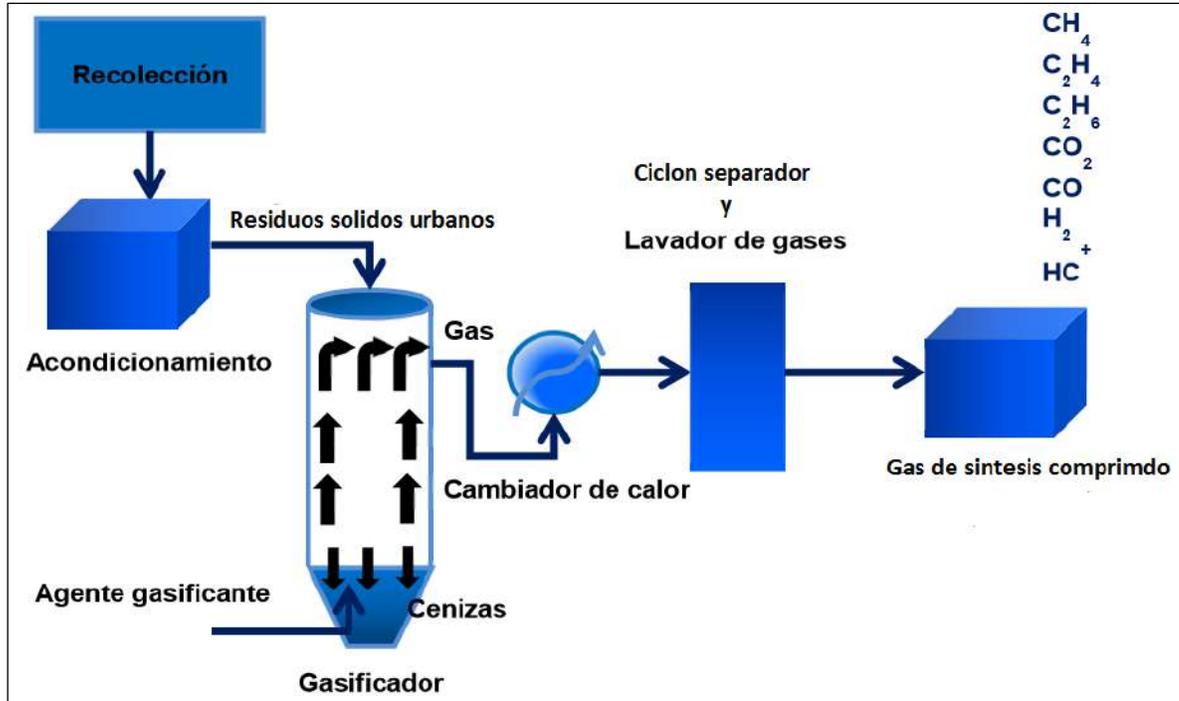
Son las unidades a diseñar y construir más adelante, de tal manera que estos equipos o unidades se sincronicen en un momento dado para su funcionamiento y convertir los residuos sólidos urbanos en gas de síntesis.

El proceso de gasificación por plasma inicia con la recolección de la biomasa, posteriormente se le da un acondicionamiento para ser alimentada al reactor de lecho fluidizado.

¹⁰¹ Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. [tesis licenciatura]. Medellín-Colombia. Pag. 66.

¹⁰² Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. [tesis licenciatura]. Medellín-Colombia. Pag. 70

Grafico 61: Diagrama esquemático del proceso de gasificación por plasma



Fuente: Extraído de EQTEC disponible en: <http://www.eqtec.es/en/business-areas/waste-gasification/eqtec-gasifier-technology>

En el acondicionamiento de los residuos sólidos urbanos primero se realiza una reducción de la cantidad de agua contenida en la muestra hasta alcanzar la humedad ideal, luego del acondicionamiento se procede a la reducción de tamaño según los parámetros de las partículas Geldart tipo B, es alimentado al reactor de gasificación por plasma de lecho fluidizado.

El gasificador previamente es llevado a la temperatura de operación a probar. Alcanzada la temperatura los residuos sólidos urbanos son alimentados por la parte superior del reactor. Por otro lado, el agente gasificante en este caso aire del ambiente es alimentado por la parte inferior del reactor pasando previamente por un arco eléctrico para que pase al estado de plasma y alcance las temperaturas estándar del mismo estado.

La mezcla de gases combustibles generados dentro del reactor es extraída por la parte superior mediante un sistema de succión y fluyen hacia un cambiador el cual tiene el

objeto de disminuir la temperatura de los gases combustibles y algunos productos condensables son eliminados de la corriente gaseosa. Esta misma mezcla de gases fluye hacia un separador ciclón y lavador de gases en el cual son eliminados otros productos condensables, gases ácidos y partículas que fueran arrastradas del reactor. Finalmente, el gas es capturado por un sistema de compresión para su posterior análisis de calidad.

El reactor contará con sistema de control mediante el cual se registrarán la temperatura de operación y un sensor de CO que controlara la conversión a cada segundo.

5.6. Diseño del prototipo

Una vez revisado los aspectos generales pertenecientes al reactor de gasificación se procederá a diseñar cada unidad para el posterior armado del prototipo.

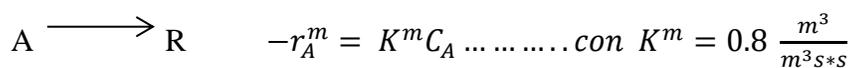
5.6.1. Diseño del reactor de gasificación por plasma

Las dimensiones del reactor estarán en base al volumen de materia que se quiere procesar, en este caso se requiere dimensionar el reactor para un flujo de alimentación de 1 Kg/h y una temperatura de operación de 1300 ° C, con estos datos de partida se procederá al cálculo de las dimensiones.

5.6.1.1. Diseño del reactor de lecho fluidizado

Para el diseño del reactor se tomarán datos teóricos que se asemejen a las características y condiciones de operación planteadas.

Un gas reactivo ($u_0 = 0.3 \text{ m/s}$, $v_0 = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$) fluye hacia arriba a través de un lecho fluidizado de 0.19 m de diámetro ($v_{mf} = 0.03 \text{ m/s}$, $\epsilon_{mf} = 0.5$) que procesara 1 kilogramo de residuos sólidos urbanos ($W = 1 \text{ kg}$, $\rho_s = 0.0012 \text{ kg/m}^3$). La reacción hipotética en conjunto procede de la siguiente forma.



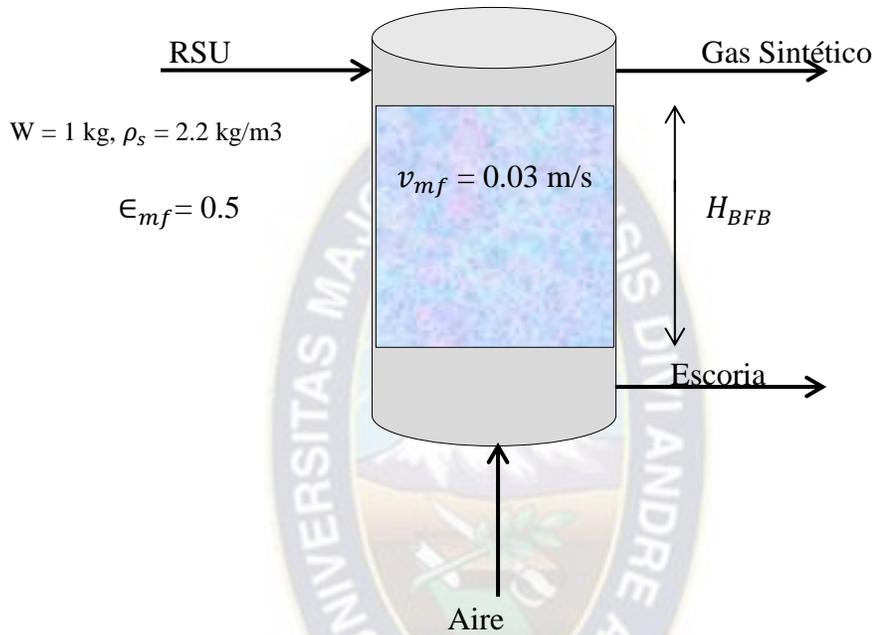
Calcular la conversión del reactivo y la altura del lecho.

Datos adicionales

$$\mathcal{D} = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\alpha = 0.33$$

$$d_b = 0.0013 \text{ m}$$



Solución

Velocidad de ascenso de los micros burbujas creadas por el plasma.

$$\frac{u_b}{u_f} = \frac{u_b}{\frac{u_{mf}}{\epsilon_{mf}}} = \frac{1.53}{\frac{0.03}{0.5}} = 25.5$$

La nube creada por el plasma asciende 25 veces más rápido que el descenso de la materia combustible para formar una lámina en forma de esfera en la interface, se tiene una burbuja rápida con una nube delgada.

En consecuencia, Es posible utilizar con seguridad el modelo de lecho de borboteo.

a) Calculo de H_{BFB} altura del lecho

$$\delta = \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b} = \frac{0.3 - 0.03}{1.53} = 0.176$$

$$\epsilon_f = 1 - (1 - \epsilon_{mf})(1 - \delta) = 1 - (1 - 0.5)(1 - 0.176) = 0.58$$

$$\begin{aligned} k_{bc} &= 4.50 \left(\frac{u_{mf}}{d_b} \right) + 5.85 \left(\frac{D^{1/2} g^{1/4}}{d_b^{5/4}} \right) \\ &= 4.50 \left(\frac{0.03}{0.0013} \right) + 5.85 \left(\frac{(20 \times 10^{-6})^{1/2} (9.8)^{1/4}}{0.0013^{5/4}} \right) = 291.3 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

$$k_{ce} = 6.77 \left(\frac{\epsilon_{mf} D u_{br}}{d_b^3} \right)^{1/2} = 6.77 \left(\frac{0.5 \cdot 20 \times 10^{-6} \cdot 1.26}{0.0013^3} \right)^{1/2} = 512.7 \text{ s}^{-1}$$

$f_b = 0.001$ estimacion aproximada a partir de experimentos.

$$f_c = \delta(1 - \epsilon_{mf}) \left[\frac{\frac{3u_{mf}}{\epsilon_{mf}}}{u_{br} - \frac{u_{mf}}{\epsilon_{mf}}} + \alpha \right] = 0.176(1 - 0.5) \left[\frac{3 * \frac{0.03}{0.5}}{1.26 - \frac{0.03}{0.5}} + 0.33 \right] = 0.042$$

$$f_e = (1 - \epsilon_f) - f_b - f_c = (1 - 0.58) - 0.001 - 0.042 = 0.377$$

$$H_{BFB} = H_f = \frac{W}{\rho_s A (1 - \epsilon_f)} = \frac{1}{2.2(\pi)(1 - 0.58)} = 0.34 \text{ m} = 34 \text{ cm}$$

→ Altura del lecho = 34 cm

b) Grado de conversión

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = \frac{\left[f_b K^m + \frac{1}{\frac{1}{\delta k_{bc}} + \frac{1}{f_c K^m + \frac{1}{\frac{1}{\delta k_{ce}} + \frac{1}{f_e K^m}}}} \right]}{f_{total}} * \frac{f_{total} H_{BFB}}{u_0}$$

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = \frac{\left[0.001 * 0.8 + \frac{1}{\frac{1}{0.176 * 291.3} + \frac{1}{0.042 * 0.8 + \frac{1}{\frac{1}{0.176 * 512.7} + \frac{1}{0.377 * 0.8}}}} \right]}{0.001 + 0.042 + 0.377} * \frac{0.42 * 0.34}{0.3} = 0.38$$

Por lo tanto la conversión en el lecho alcanza a:

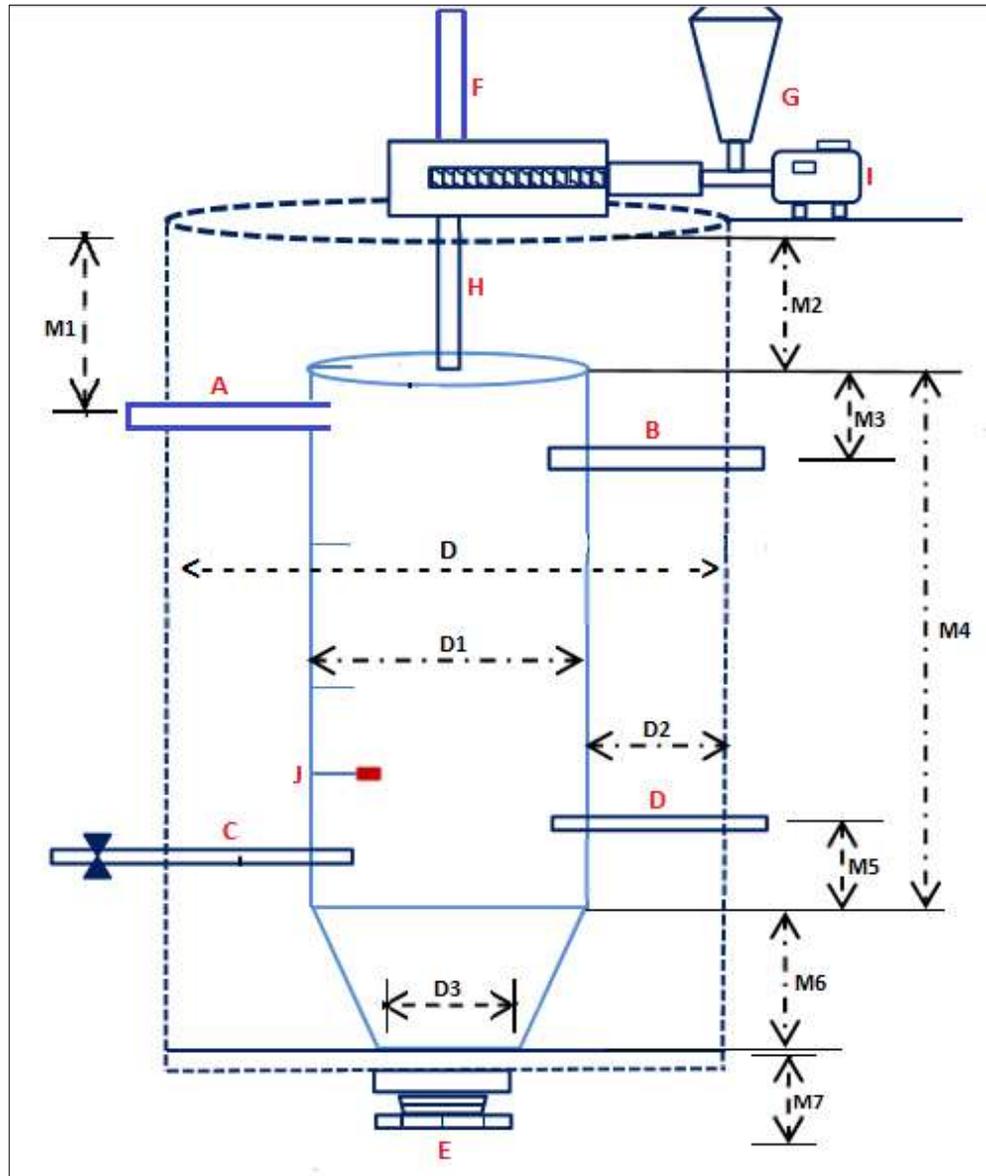
$$\frac{C_A}{C_{A0}} = 0.68 \dots \dots \dots X = 68 \%$$

La conversión de los residuos sólidos urbanos dentro del reactor alcanza al 68 %

5.6.1.2. Dimensiones del reactor

El reactor de gasificación como ya se indicó es uno de los componentes con mayor importancia del proceso, por ello es esencial conocer su estructura de este elemento una vez que ya se determinó su volumen.

Grafico 62: Diagrama del reactor de gasificación de lecho fluidizado



Fuente: Elaboración propia en base a datos determinados

M1 = 6 cm

M2 = 5 cm

M3 = 3 cm

M4 = 45 cm

M5 = 4 cm

M6 = 15 cm

M7 = 5 cm

D = 25 cm

D1 = 19 cm

D2 = 3 cm Aislamiento critico

D3 = 3 cm

Partes de Reactor:

A = Flujo de Alimentación de RSU

B = Salida de Gas de Síntesis

C = Entrada de Aire Ionizado (plasma)

D = Compartimiento del cátodo

E = Salida de la escoria inerte

F = Purga

G = Medidor de presión

H = Salida de gas de síntesis

I = Filtro

J = Sensor de temperatura

El Reactor dimensionado es un reactor de lecho fluidizado y que este llevara un aislante denominado aislamiento crítico para que soporte las temperaturas de operación, más adelante.

En el grafico 62 se puede observar tanto las salidas y entradas de materia en el reactor de gasificación de lecho fluidizado, las dimensiones tendrán que ser plasmadas en un diseño 3D para que pueda ser construido.

5.6.1.3. Aislamiento Crítico del Reactor

Como aislamiento crítico del reactor para evitar la pérdida de calor se utilizará fibra de vidrio y cemento refractario, para determinar el espesor del aislante se partirá de las conductividades de ambos materiales y se elegirá el que mejor se adapte al sistema.

➤ **Determinación del aislamiento crítico.**

Para asilar el reactor se utilizará estuco refractario a continuación se detallan los datos.

Datos:

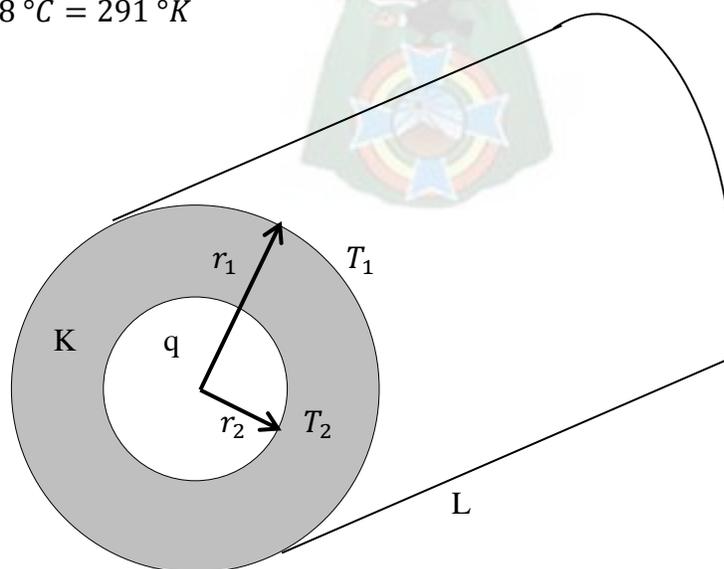
$$K_{ESTUCO} = 0.54 \frac{\text{wat}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$r_1 = 0.115 \text{ m} \quad r_2 = 0.075 \text{ m} \quad L = H = 0.36 \text{ m} \quad D = 0.23 \text{ m}$$

$$T_2 = 1200 \text{ }^\circ\text{C} = 1473 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C} = 291 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$r_c = ?$$



$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{2\pi KL}} = \frac{(1473 - 291)^\circ K}{\frac{\ln\left(\frac{0.115}{0.075}\right)}{2\pi * 0.54 \frac{\text{wat}}{\text{m}^\circ K} * 0.36 \text{ m}}} = 3377.6 \text{ wat}$$

$$A = 0.21 \text{ m}^2$$

$$q = hA(T_2 - T_1) \text{ -----} \rightarrow h = \frac{q [\text{wat}]}{A [\text{m}^2] * (T_2 - T_1)^\circ K}$$

$$h = \frac{3377.6 \text{ wat}}{0.21 \text{ m}^2 * (1473 - 291)^\circ K} = 13.61 \frac{\text{wat}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ K}$$

$$r_c = \frac{K}{h} = \frac{0.54 \frac{\text{wat}}{\text{m}^\circ K}}{13.61 \frac{\text{wat}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ K}} = 0.0396 \text{ m} = 4 \text{ cm}$$

$$D_{\text{interno}} = 8 \text{ cm}$$

El aislamiento (radio crítico) resulta de 8 cm de diámetro y 4 cm de radio, por lo que a partir de ese diámetro se tendrá que aislar.

5.6.1.4. Diseño del reactor en AutoCAD Plant 3D

Este modelo es un diseño simplificado y una vista en 3D del reactor de plasma. Esta unidad solo es una parte del proceso para la conversión de residuos sólidos urbanos, donde busca soluciones como una alternativa eficaz para enfrentar el problema de la basura que está en constante incremento, el reactor en tamaño prototipo simulara las condiciones reales de operación y el grado de transformación de la basura, así como el rendimiento térmico del dispositivo.

¿Qué es reactor de plasma?

Con el crecimiento de la población y el desarrollo continuo en todas las direcciones, hay una cantidad de residuos diferentes, que se ha convertido en un problema mundial. Esto crea una serie de problemas relacionados con el almacenamiento, eliminación o uso de varios tipos de residuos.

Este dispositivo le permite reducir la cantidad de desechos mediante arco de plasma de alta temperatura (1300 – 4000 °C). El producto resultante se llama gas de síntesis, que se puede usar en una unidad de cogeneración para producir energía eléctrica. Otros productos son la escoria inerte que se utiliza como material de construcción en la formación de carreteras o aleaciones metálicas para la eliminación de componentes electrónicos.

A continuación, se observa el diseño del reactor a escala Prototipo, Es un diseño Modular de prueba.

Grafico 63: Vista frontal Del reactor diseñado en Plant 3D



Fuente: Diseño propio en AutoCAD en base a WPC

Grafico 64: Vista lateral Del reactor

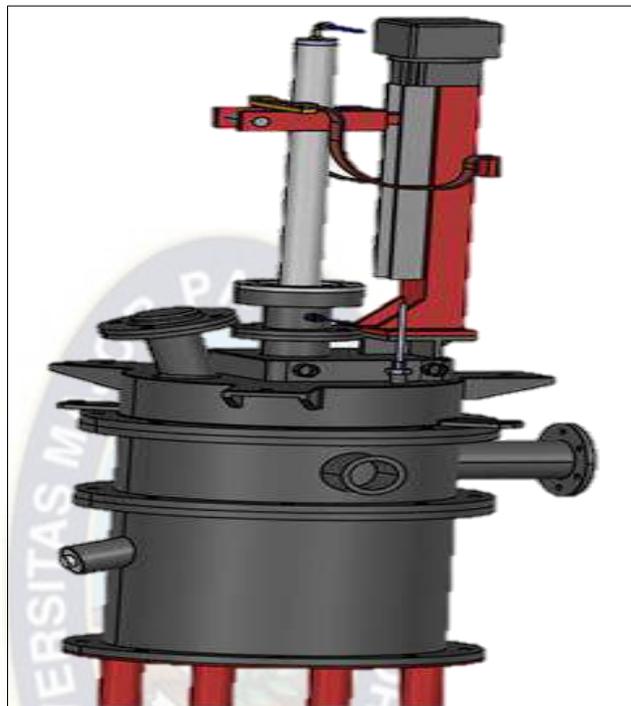
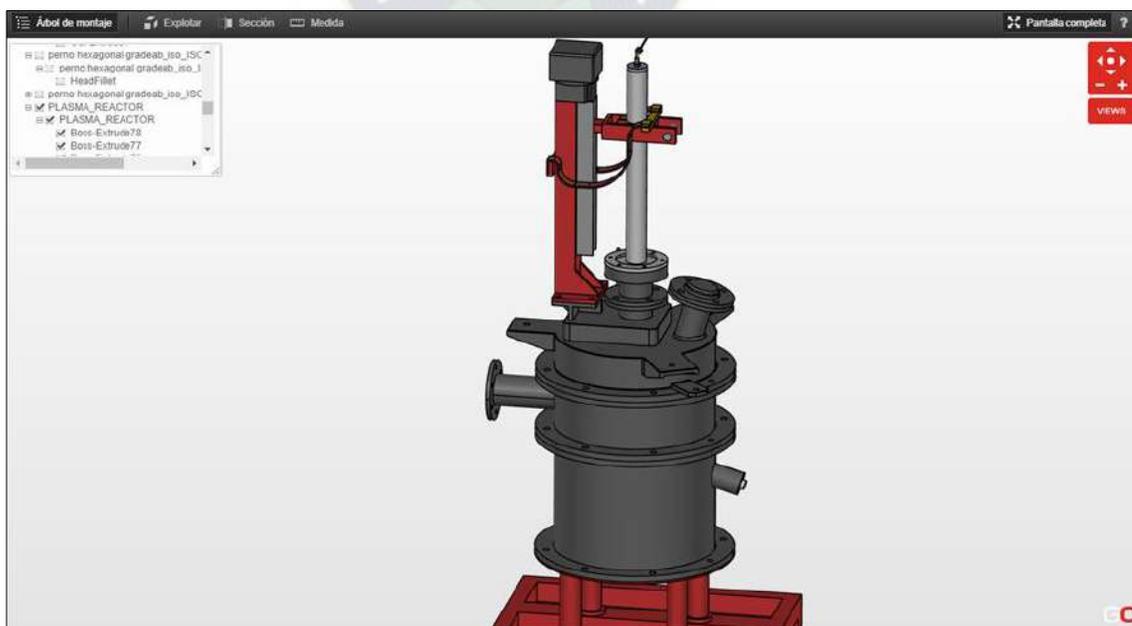
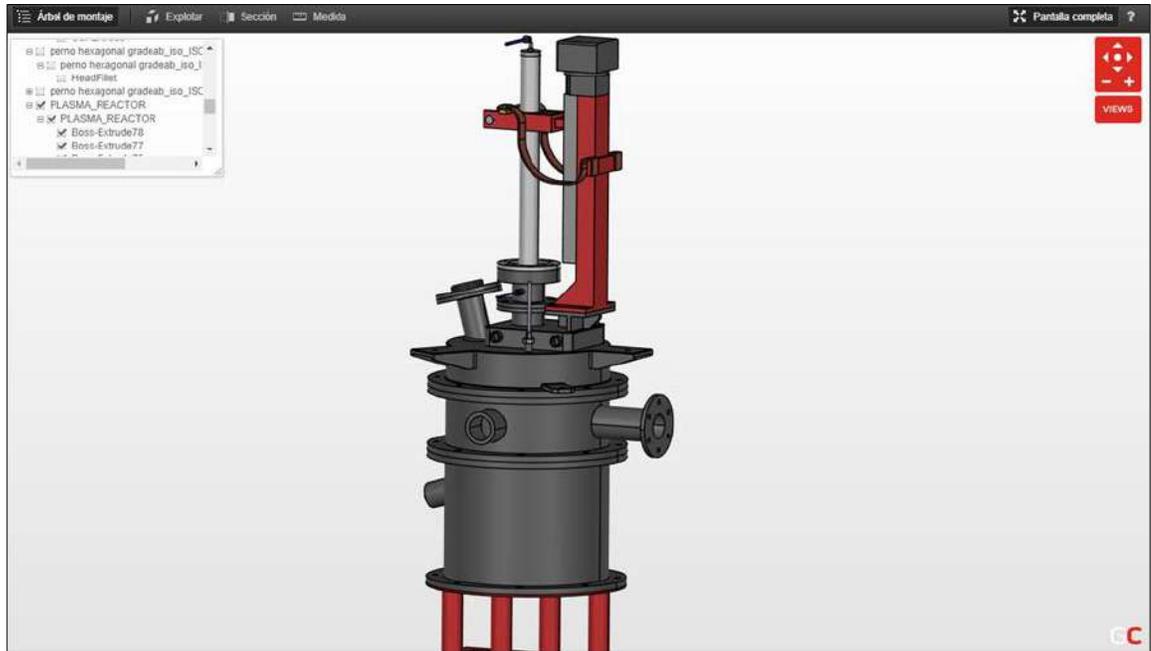


Grafico 65: Vista Lateral del Reactor



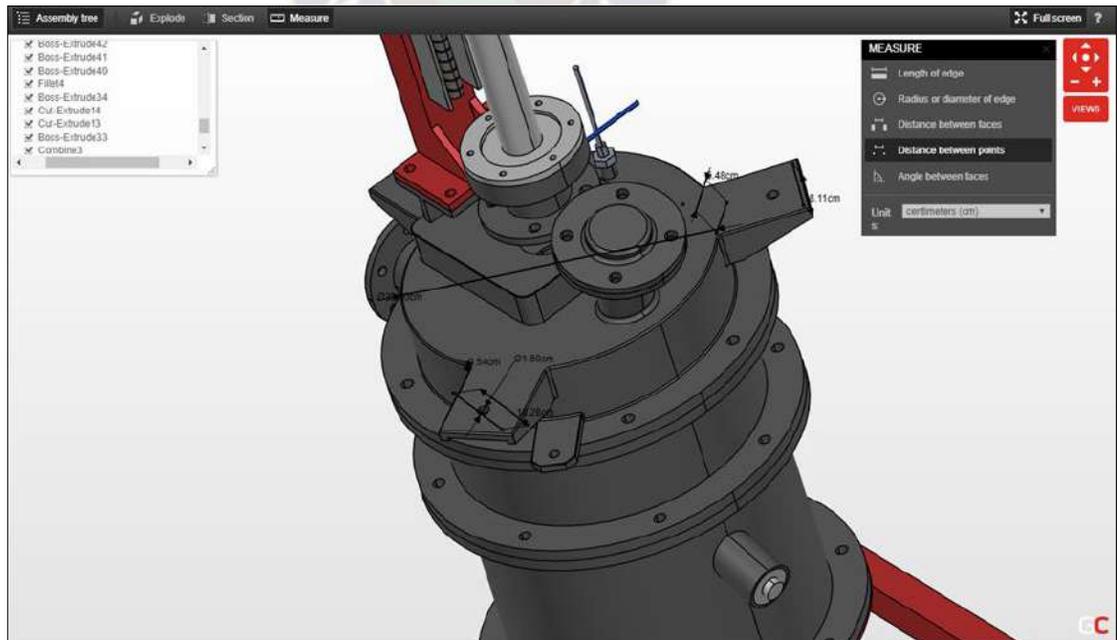
Fuente: Diseño propio en AutoCAD Plant 3D

Grafico 66: Vista Lateral derecha del reactor



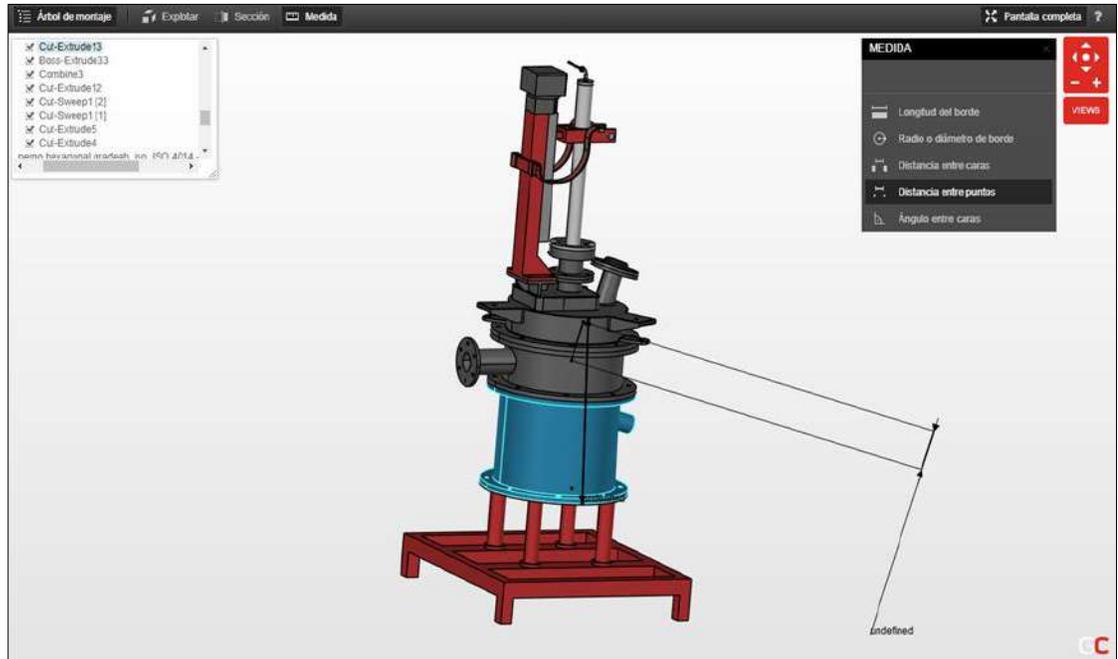
Fuente: Diseño propio en AutoCAD Plant 3D

Grafico 67: Vista General y medidas del reactor



Fuente: diseño propio en AutoCAD Plant 3D

Grafico 68: Zona de Gasificación de Reactor



Fuente: Elaboración propia en Plant 3D

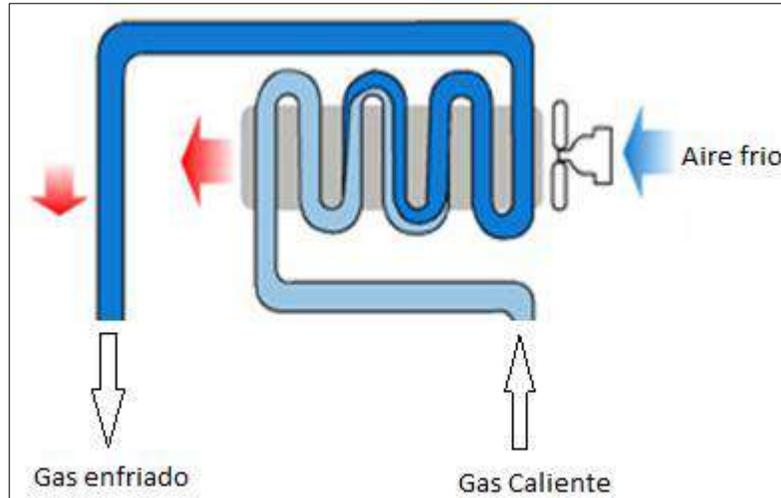
Los gráficos muestran el diseño del reactor de gasificación por plasma en 3D que más adelante se lo construirá.

5.6.2. Diseño del Condensador

El condensador denominado también evaporador es la unidad que se encargara de reducir la temperatura del gas de síntesis a la salida del reactor de gasificación por plasma.

A la salida del reactor el gas de síntesis tendrá una temperatura elevada (800 °C) por lo que debe pasar por un intercambiador de calor donde se produce la transferencia de energía térmica hacia el medio ambiente o en otros casos aprovechar esa energía térmica hacia una turbina de ciclo combinado para generar energía eléctrica.

Grafico 69: Condensador



Fuente: disponible en: www.ciclsorg.

El gas caliente ingresara al condensador a una temperatura de aproximadamente 900°C, este circulara a través del serpentín y para ser enfriado un ventilador emitirá aire frio para bajar la temperatura del gas a unos 300°C para que luego este gas en el trayecto hacia un ciclón siga enfriándose.

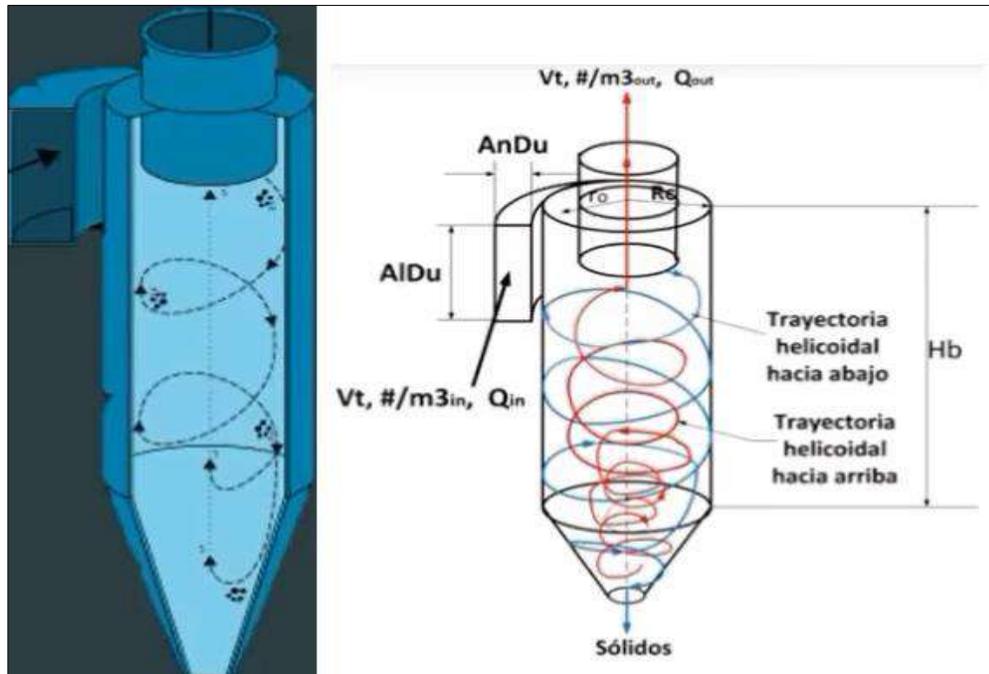
El enfriamiento tendrá que ser brusco principalmente para evitar la formación de dioxinas y furanos.

5.6.3. Diseño del ciclón separador

5.6.3.1. Ciclón

Para separar partículas sólidas pequeñas o polvo fino de los gases, el tipo de equipo de uso más común es el separador de ciclón que se muestra en el grafico 15 el ciclón consta de un cilindro vertical con fondo cónico. La mezcla de gas y partículas sólidas entra tangencialmente por la parte superior. La penetración de la mezcla le imparte un movimiento giratorio, y el remolino que se desarrolla produce la fuerza centrífuga que arrastra a las partículas hacia la pared de forma radial.

Grafico 70: Funcionamiento del ciclón



Fuente: Alberto Echeverri Londoño, *Diseño óptimo de Ciclones*

Al entrar, el aire del ciclón fluye hacia abajo en una espiral o vórtice adyacente a la pared. Cuando el aire se aproxima al fondo cónico, vuelve a subir en una pequeña espiral en el centro del cono y del cilindro. Por consiguiente, se forma un vórtice doble. Las espirales descendente y ascendente giran en el mismo sentido.

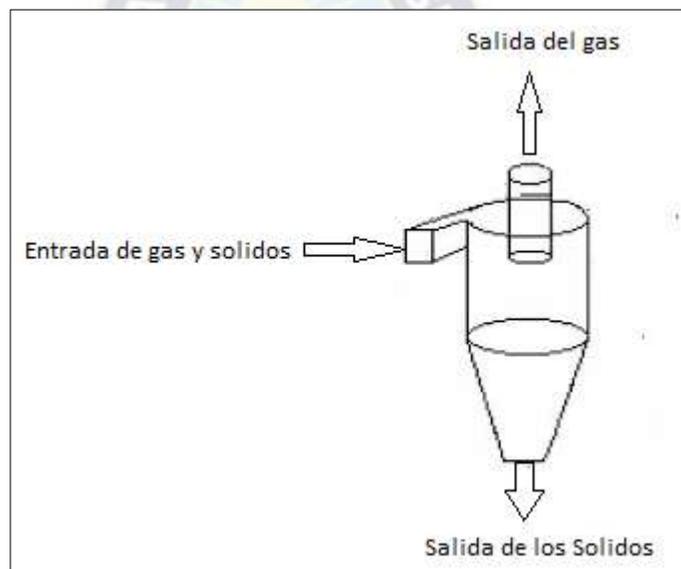
Las partículas son arrastradas hacia la pared y caen al fondo, saliendo por la parte inferior del cono.

Un ciclón es un dispositivo de precipitación, en el que las fuerzas que arrastran a las partículas hacia afuera a velocidades tangenciales altas, son varias veces superiores a la fuerza de gravedad. Por tanto, los ciclones permiten separaciones mucho más efectivas que las cámaras de precipitación por gravedad.

La fuerza centrífuga en un ciclón va desde unas 5 veces la fuerza de la gravedad en unidades grandes de baja velocidad, hasta 2500 veces en unidades pequeñas de alta resistencia. Estos equipos son muy comunes en ciertas aplicaciones, como el secado de

alimentos por rociado, en el que las partículas secas se separan con ciclones; en equipos separadores de polvos ambientales; y en la separación de rocíos finos de los gases. Los ciclones constituyen uno de los sistemas más económicos para la separación de gases y partículas. Se pueden usar para la extracción de partículas de más de 5 μm de diámetro suspendidas en gases; para partículas de más de 200 μm , se prefieren las amaras de precipitación por gravedad. Algunas veces se usan ciclones de purificación en húmedo, en los cuales se rocía agua para ayudar a separar los sólidos¹⁰³.

Grafico 71: Separador de ciclón gas-sólido



Fuente: C.J. Geankopolis. *Procesos de Transporte y operaciones Unitarias*

5.6.3.2. Teoría de separadores de ciclón

Se supone que, al entrar a un ciclón, las partículas adquieren rápidamente sus velocidades terminales de precipitación. Los tamaños de las partículas suelen ser tan pequeños, que se considera que la ley de Stokes es válida. La ecuación expresa la velocidad terminal radial V_{tR} de un movimiento centrifugo.

$$V_{tR} = \frac{w^2 r D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18 \mu}$$

¹⁰³ C.J. Geankopolis. *Procesos de Transporte y operaciones Unitarias*. Editorial Continental. Tercera edición. México 1998. Pag. 927.

Donde V_{tR} es la velocidad de precipitación en sentido radial m/s, D_p el diámetro de la partícula en m, ρ_p la densidad de la partícula en Kg/m³, ρ densidad del líquido en Kg/m³, y u es la viscosidad del fluido en Pa.s.

$w = v_{tan} \cdot r$, donde v_{tan} es la velocidad tangencial de la partícula en e radio r , la ecuación se transforma en:

$$V_{tR} = \frac{D_p^2 g (\rho_p - \rho) v_{tan}^2}{18 u} = V_t \frac{v_{tan}^2}{gr}$$

Donde V_t es la velocidad terminal gravitatoria de precipitación, cuanto más alta sea la velocidad terminal mayor será la velocidad radial V_{tR} y más fácil resultara “precipitar” las partículas en la pared. Sin embargo, la evaluación de la velocidad radial es bastante difícil está en función de la velocidad terminal gravitatoria, de la velocidad tangencial y de la posición radial y axial en el ciclón. Debido a lo anterior, se prefiere usar la siguiente ecuación empírica.

$$V_{tR} = \frac{b_1 D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18 u n}$$

Donde b_1 y n son constantes empíricas.

Para el diseño del ciclón se tomara como base a las ecuaciones mencionadas anteriormente¹⁰⁴.

5.6.3.3. Diseño del ciclón

Los ciclones son un dispositivo de control de material Particulado bastante estudiado, el diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas.

Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son: ciclones de alta eficiencia, ciclones convencionales y ciclones de alta capacidad.

¹⁰⁴ McCabe Smith

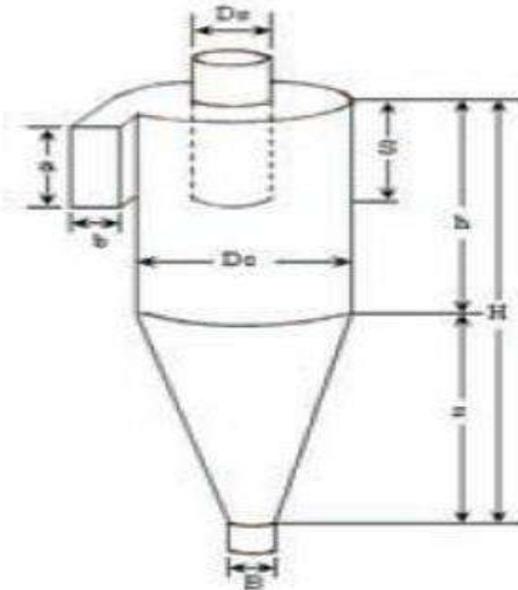
Tabla 22: Intervalo de eficiencia de remoción para las diferentes familias de ciclones

Familia de Ciclones	Eficiencia de Remoción (%)		
	PST	PM10	PM2.5
Convencionales	70 – 90	30 – 90	0 – 40
Alta Eficiencia	80 – 99	60 – 95	20 – 70
Alta Capacidad	80 – 99	10 – 40	0 - 10

Fuente: Alberto Echeverri Londoño, *Diseño óptimo de Ciclones*

Los ciclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. Los ciclones de alta eficiencia pueden remover partículas de 5 μm con eficiencias hasta del 90%, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20 μm , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas¹⁰⁵.

Grafico 72: Medidas de un ciclón



Fuente: C.J. Geankopolis *procesos de transporte*

¹⁰⁵ C.J. Geankopolis. *Procesos de Transporte y operaciones Unitarias*. Editorial Continental. Tercera edición. México 1998. Pag. 930

Para el diseño del ciclón se devén tomar en cuenta sus medidas respectivas.

D_s = Diámetro de salida del gas

S = altura de salida

a = Altura de entrada

b = ancho de entrada

D_c = Diámetro del ciclón

h = Altura parte cilíndrica

H = Altura total del ciclón

Z = Altura parte cónica

B = Diámetro de salida de partículas

El procedimiento general de diseño es el siguiente:

- Seleccionar el tipo de ciclón, dependiendo del funcionamiento o necesidades requeridas.
- Obtener un estimativo de la distribución de tamaño de las partículas en la corriente gaseosa a ser tratada.
- Calcular el diámetro del ciclón para una velocidad de entrada de 22 m/s (opcional), y determinar las otras dimensiones del ciclón.

Se diseñará un ciclón para separar sólidos de una corriente gaseosa de gas de síntesis proveniente del reactor de gasificación. Se asume que la densidad de las partículas es de 15 kg/m³ y el gas de síntesis a 450 °C. El caudal de la corriente es 0.025 m³/s, y la operación es a una presión de 85.3 kPa. La concentración de las partículas es de 2.0 g/m³ y, según las normas de emisión, se requiere una eficiencia de separación del 80%. Estas variables de operación son tomadas de forma hipotética también se utilizarán datos estándares que se usan para el diseño de ciclones.

Se estima que el 45 % de las partículas están por debajo de los 10 μ m, por lo tanto, teóricamente se requiere un ciclón de alta eficiencia.

Tabla 23: Relaciones estándares para ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Ciclón de alta eficiencia			
		Estándar	Distribución de tamaño de las partículas	Tamaño (um)	% másico
Diámetro del ciclón	Dc	1.0		5 - 10	45
Altura de entrada	a	0.5		10 - 30	25
Ancho de entrada	b	0.2		30 - 50	15
Altura de salida	S	0.5		50 - 70	10
Diámetro de salida	Ds	0.5		70 - 100	5
Altura parte cilíndrica	h	1.5			
Altura parte cónica	Z	2.5			
Altura total del ciclón	H	4.0			
Diámetro Salida de partículas	B	0.375			

Fuente: Datos obtenidos de: diseño óptimo de ciclones

- **Desarrollo**

Para calcular el diámetro del ciclón se selecciona una velocidad de entrada que según estándares para el diseño de ciclones debe estar en los intervalos de 15.2 a 27.4 m/s. para este caso se selecciona una velocidad de entrada de 15.2 m/s. con este valor se puede determinar el diámetro del ciclón y las otras dimensiones con base en las relaciones ya establecidas en la tabla 3.

Área del ducto de entrada:

$$\text{Área} = \frac{Q}{V} = \frac{0.025}{15.2} = 0.0016 \text{ m}^2$$

Diámetro del ciclón:

$$D_c = \sqrt[2]{\frac{0.0016}{0.5 \times 0.2}} = 0.12 \text{ m}$$

Altura de entrada al ciclón (a):

$$a = 0.5 \times 0.12 = 0.06 \text{ m}$$

Ancho de entrada al ciclón (b):

$$b = 0.2 \times 0.12 = 0.024 \text{ m}$$

Altura de salida del ciclón (S):

$$S = 0.5 \times 0.12 = 0.06 \text{ m}$$

Diámetro de salida del ciclón (D_s):

$$D_s = 0.5 \times 0.12 = 0.06 \text{ m}$$

Altura cilíndrica del ciclón (h):

$$h = 1.5 \times 0.12 = 0.18 \text{ m}$$

Altura parte cónica del ciclón (z):

$$Z = 2.5 \times 0.12 = 0.3 \text{ m}$$

Altura total del ciclón (H):

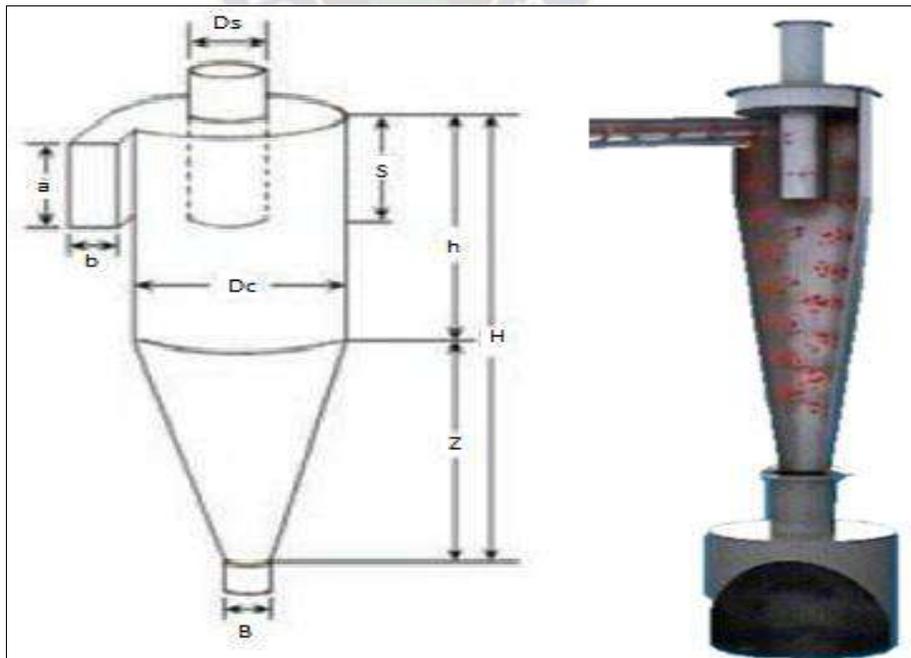
$$H = 4.0 \times 0.12 = 0.48 \text{ m}$$

Diámetro de salida del polvo (B):

$$B = 0.375 \times 0.12 = 0.045 \text{ m}$$

Una vez determinado las medidas que deberá tener el ciclón se procede a un diseño en 3D para su posterior construcción.

Grafico 73: Vista frontal del ciclón



Fuente: Diagrama extraído de Geankopolis

5.6.4. Diseño del lavador de gases

El lavador de gases es un sistema que ofrece el contacto entre el gas y un líquido, para mejorar la calidad de los gases emanados a la atmosfera se debe reducir al máximo los gases ácidos que pudiera contener el gas procedente de la gasificación de los residuos sólidos.

Este lavador está conformado por: un filtro y un reactor tipo Scrubber que alimenta agua o un fluido neutralizador por la parte superior de la torre y en el centro de la torre lleva un filtro empacado tipo tambor para retener partículas sólidas y gases ácidos.

5.6.4.1. Filtración

La filtración es la separación de partículas sólidas a partir de un fluido mediante el paso del fluido a través de un medio filtrante o pared separadora sobre el que se depositan los sólidos. Las filtraciones industriales van desde un sencillo colado hasta separaciones altamente complejas. El fluido puede ser un líquido o un gas, y la corriente valiosa procedente de un filtro puede ser el fluido, los sólidos o ambos productos. En algunos casos ambas corrientes carecen de valor, como en el caso de la separación de sólidos residuales de un fluido residual antes de su vertido.

El fluido circula a través del medio filtrante en virtud de una diferencia de presión a través del medio. Por lo tanto, los filtros se clasifican en función de este aspecto en: filtros que operan con presión superior a la atmosférica en la corriente superior del medio filtrante y los que lo hacen con presión atmosférica en la corriente superior del medio filtrante y a vacío en la corriente inferior. Presiones superiores a la atmosférica se generan por la acción de la fuerza de gravedad actuando sobre una columna de líquido, por medio de una bomba o soplador, o bien por medio de una fuerza centrífuga.

Los filtros se dividen en tres grupos principales: filtros de torta, filtros clarificadores y filtros de flujo transversal. Los filtros de torta separan grandes cantidades de sólidos en forma de una torta de cristales o un lodo. Los filtros clarificadores retiran pequeñas cantidades de sólidos para producir un gas limpio o líquidos transparentes, tales como

bebidas o gases ácidos. En un filtro de flujo transversal la suspensión de la alimentación fluye bajo presión a velocidades ligeramente altas atravesando el medio filtrante. Se forma una capa delgada de sólidos en la superficie del medio, pero la alta velocidad del líquido mantiene la capa formada. El medio filtrante es una membrana de cerámica, metal o de un polímero con poros lo suficientemente pequeños para excluir la mayoría de las partículas suspendidas¹⁰⁶.

5.6.4.2. Ecuaciones de diseño de un filtro

5.6.4.2.1. Filtración a presión constante

Cuando Δp es constante, las únicas variables son V y t , cuando $t = 0$, $V = 0$, y $\Delta p = \Delta p_m$, por lo tanto

$$\frac{uR_m}{A\Delta p} = \frac{dt}{dV} = \frac{1}{q_0} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1}$$

$$\frac{dt}{dV} = \frac{1}{q_0} = K_c v + \frac{1}{q_0} \dots\dots\dots \text{Ecuación 2}$$

$$K_c = \frac{uc\alpha}{A^2 \Delta p} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3}$$

La integración de la ecuación 2 entre los límites (0,0) y (t,v)

$$\frac{t}{v} = \left(\frac{K_c}{2}\right) V + \frac{1}{q_0} \dots\dots\dots \text{Ecuación 4}$$

Por lo tanto, una representación gráfica t/V frente a V será una línea recta de pendiente $K_c/2$ y ordenada en el origen $1/q_0$. A partir de una representación gráfica y de las ecuaciones 1 y 3, se calculan los valores de α y R_m .

5.6.4.2.2. Filtración continua

En un filtro continuo, como el tipo de tambor rotatorio, la alimentación, el filtrado y el gas a filtrar se mueven con velocidades con velocidades

¹⁰⁶ Warren L. McCabe. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ta Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. pag.1054-1055

continuas estacionarias. Sin embargo, las condiciones de un elemento particular cualquiera de la superficie filtrante no es de régimen estacionario sino transitorio. La caída de presión a través del filtro durante el paso del gas se mantiene constante. Por lo tanto, las ecuaciones anteriores para la filtración discontinua a presión constante son aplicables a los filtros continuos introduciendo algunas modificaciones¹⁰⁷.

Si t es el tiempo real de filtrado (por ejemplo, el tiempo que un elemento de filtro está sumergido en la suspensión), partir de la siguiente ecuación.

$$t = \frac{K_c V^2}{2} + \frac{V}{q_0} \dots \dots \dots \text{Ecuación 5}$$

Donde V es el volumen de filtrado recogido durante el tiempo t . Resolviendo la ecuación 5 para V como una ecuación de segundo grado se obtiene.

$$V = \frac{\left(\frac{1}{q_0} + 2K_c t \right)^{1/2} - 1/q_0}{K_c} \quad \text{Ecuación 6}$$

Al sustituir los valores de $1/q_0$ y K_c de las ecuaciones 1 y 3 y dividiendo entre tA , se llega a la ecuación.

$$\frac{V}{tA} = \frac{\left[\frac{2c\alpha\Delta p}{ut} + (Rm/t)^2 \right] \exp \frac{1}{2} - Rm/t}{c\alpha} \quad \text{Ecuación 7}$$

$\frac{V}{t}$ = Velocidad de recolección de filtrado

A = área del filtro

La ecuación 7 puede escribirse en función de la velocidad de producción de sólidos o gases m_c y de las características del filtro: tiempo de ciclo t_c , velocidad de giro del tambor n , y del área total del filtro A_T , si la fracción del tambor sumergida es f .

¹⁰⁷ Warren L. McCabe. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ta Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. pag.1076

$$t = ft_c = \frac{f}{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

La velocidad de producción de sólidos y la retención de gases ácidos, de acuerdo con la ecuación 8 es.

$$m_c = c \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación 9}$$

Puesto que $A/A_t = f$, la velocidad de producción de materia sólida y retención de gases ácidos dividida entre el área total del filtro es.

$$\frac{m_c}{A_T} = \frac{\left[\frac{2c\alpha\Delta pfn}{u} + (nRm)^2 \right]^{1/2} - nRm}{\alpha} \quad \text{Ecuación 10}$$

La resistencia de medio filtrante Rm incluye la de cualquier porción de gas o partículas no retenidas por el mecanismo de descarga y pasa al siguiente ciclo. Cuando el medio filtrante se lava después de atravesar el gas, Rm por lo general es despreciable y la ecuación 8 se transforma en.

$$\frac{m_c}{A_T} = \left[\frac{2c\Delta pfn}{\alpha u} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Si la resistencia específica de la torta varía con la caída de presión, entonces la ecuación se modifica.

$$\frac{m_c}{A_T} = \left(\frac{2c\Delta p^{1-s}fn}{\alpha_0 u} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 12}$$

Las ecuaciones 10 y 11 se aplican tanto a los filtros continuos de vacío como a filtros continuos de presión. Cuando Rm es despreciable, la ecuación 12 predice que la velocidad de flujo de filtrado es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la viscosidad o resistencia de un gas y del tiempo de ciclo. Esto se ha observado de forma experimental con filtros para gases de poros mayores a 2mm y tiempos de ciclo elevados. Sin embargo, con ciclos de tiempo cortos esto no se cumple y es preciso utilizar la relación más complicada correspondiente a la ecuación 10. En

general, la velocidad de filtración aumenta con la velocidad de giro de tambor y disminuye con el tiempo de ciclo t_c , debido a que los sólidos formados sobre la superficie interna del tambor son más delgados. Sin embargo, la velocidad de entrada del fluido (gas o líquido) será la que determine la capacidad de filtración del tambor, donde la velocidad de filtración ya no aumenta, sino que permanece constante, y el tambor tiende a ser húmeda y difícil de descargar.

El área de filtrado que se requiere para una velocidad de filtración dada se calcula con las ecuaciones deducidas anteriormente¹⁰⁸.

5.6.4.3. Dimensionamiento del filtro

El filtro a dimensionar se realizará según las ecuaciones de diseño mencionadas en el anterior punto.

Determinaremos el Área del filtro que tiene forma de tambor y que lleva un eje en el interior del mismo.

Dimensionaremos un filtro de tambor rotativo con 30 % de inmersión, que se utilizara para filtrar sólidos en suspensión y retener gases ácidos de una corriente de gas de síntesis que aproximadamente contiene 14.7 lb de solidos por pie cubico de gas. La caída de presión será de 20 in. De Hg. El empaque del filtro contendrá aproximadamente 50 % de humedad sobre base húmeda, determinaremos el área del filtro que se requiere para filtrar 10 gal/min de suspensión cuando el tiempo de ciclo de filtrado es de 5 minutos. Supondremos que la resistencia especifica del empaque del filtro es ($\alpha = 2.90 \times 10^{10}$ ft/lb dato teórico) y que la resistencia del medio filtrante R_m es despreciable debido a que ese medio estará bañado con un medio básico. La temperatura se toma como referencia a 20 °C.

- **Desarrollo**

Se utilizará la ecuación 12.

¹⁰⁸ Warren L. McCabe. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ta Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. pag.1079

$$\Delta p = 20 \left(\frac{14.69}{29.92} \right) \times 144 = 1414 \text{ lbf/ft}^2$$

$$f = 0.30 \quad tc = 5 \times 60 = 300s \quad n = \frac{1}{300} \text{ s}^{-1}$$

$$\alpha = 2.90 \times 10^{10} \text{ Ft/lb} \quad s = 0.26$$

$$u = 0.0001 \text{ cP} = 7 \times 10^{-8} \text{ lb/fts}$$

$$\rho = 62.3 \text{ lb/ft}^3$$

El valor de c se obtiene a partir de $m_c = Vc$ la concentración de la suspensión C_f es 14.7 lb/ft^3 . Puesto que el empaque del filtro contiene 50% de humedad, $m_F / m_c = 2$. Al sustituir estas cantidades en la ecuación $m_c = Vc$ se obtiene.

$$c = \frac{14.7}{1 - (2 - 1) \left(\frac{14.7}{62.3} \right)} = 19.24 \frac{\text{lb}^3}{\text{ft}}$$

Despejado A_T de la ecuación 12, incluyendo g_c como se requiere, resulta.

$$A_T = m_c \left(\frac{\alpha_0 u}{2c \Delta p^{1-s} g_c f n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 13}$$

La velocidad de producción de sólidos m_c es igual a la velocidad de flujo de suspensión multiplicada por su concentración C_F . Por lo tanto, puesto que la densidad del fluido es 168.8 lb/ft^3 .

$$m_c = \frac{10}{60} \frac{1}{7.48} \left(\frac{1}{\frac{14.7}{168.8} + 1} \right) 14.7 = 0.302 \frac{\text{lb}}{\text{s}}$$

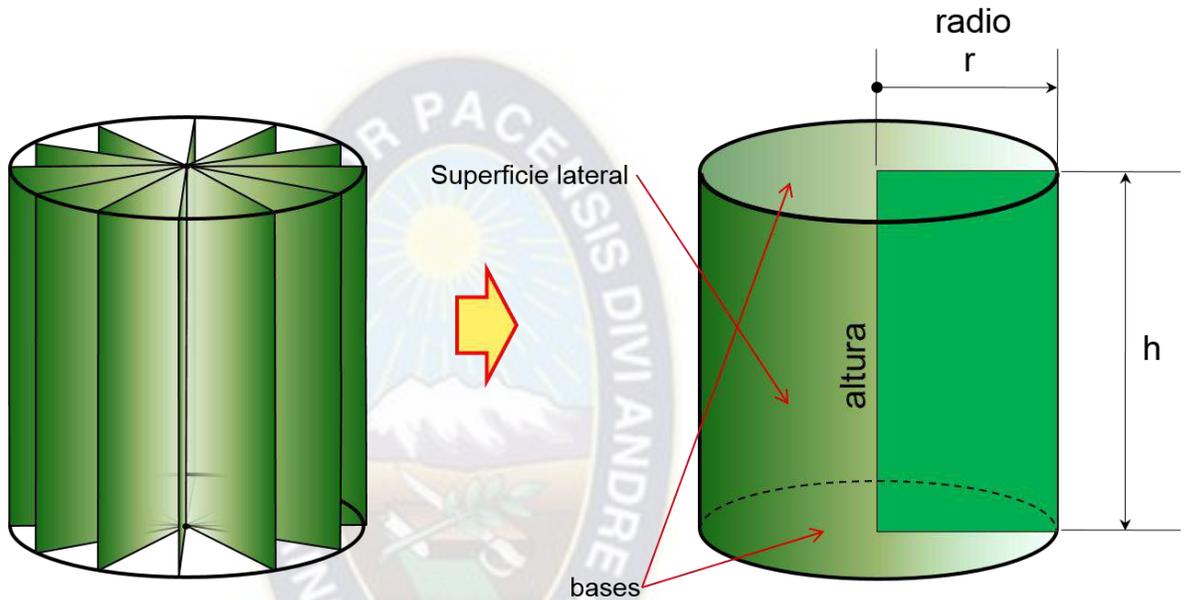
Sustituyendo en la ecuación 13 resulta.

$$A_T = 0.302 \left(\frac{2.90 \times 10^{10} \cdot 7 \times 10^{-8}}{2 \times 19.24 \times 1414^{0.74} \times 32.17 \times 0.30 \times \frac{1}{300}} \right)^{1/2}$$

$$A_T = 0.83 \text{ ft}^2 = 0.077 \text{ m}^2 \quad \text{Area total del filtro}$$

El filtro tendrá un área total de 0.0770 m² y tomando como dato el radio estándar para filtros en forma de tambor procederemos a determinar la altura que deberá tener el filtro.

Grafico 74: Medidas del filtro



Fuente: Elaboración propia en base a datos determinados.

$$A_t = 2\pi r (h + r)$$

$$h = \frac{A_T - 2\pi r^2}{2\pi r} = \frac{0.077 \text{ m} - 2\pi(0.06\text{m})^2}{2\pi(0.06)}$$

$$h = 0.14 \text{ m} = 14 \text{ cm}$$

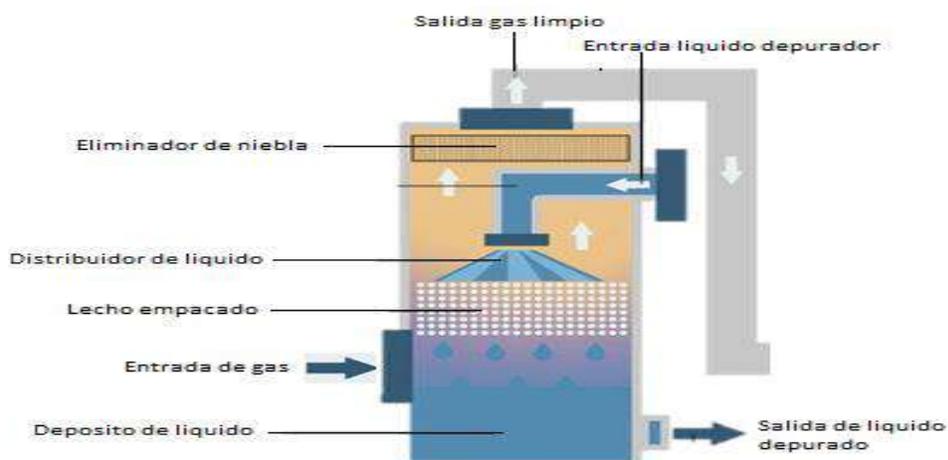
La altura de filtro a utilizar para las condiciones ya mencionadas será de 14 cm y que este tendrá un empaque de polímeros altamente efectivos para retener partículas y gases ácidos.

5.6.4.4. Lavador de gases (scrubber)

El scrubber también conocido como torre empacada es un reactor que ofrece una elevada superficie de contacto entre gas y líquido teniendo como objetivo mejorar la calidad de los gases que se pudieran emitir a la atmosfera, el gas de síntesis es alimentado al scrubber por la parte inferior de la torre. En el interior de la torre se encuentra un material de empaque (filtro) correspondiente a un polímero termoplástico de alta permeabilidad, en la parte superior de la torre se encuentran unos inyectores que suministran el líquido de lavado, este líquido atraviesa el material de empaque reteniendo los gases ácidos y partículas que pudieran existir en el gas, a medida que el gas atraviesa el material de empaque hacia la zona superior las moléculas corrosivas del gas entran en contacto con la película del fluido de lavado durante este contacto el vapor es lavado traspasando hacia el fluido de lavado los compuestos ácidos y corrosivos que traía el gas. El vapor de gas fluye hacia la parte superior de la torre de manera que debe atravesar por un separador de gotas, el separador de gotas sirve para retener las gotas de líquido de lavado. De manera que se tiene un gas sin contaminantes y listo para aplicar en otros procesos¹⁰⁹.

5.6.4.4.1. Diagrama del lavador de gases

Grafico 75: Diagrama de lavador de gases tipo scrubber



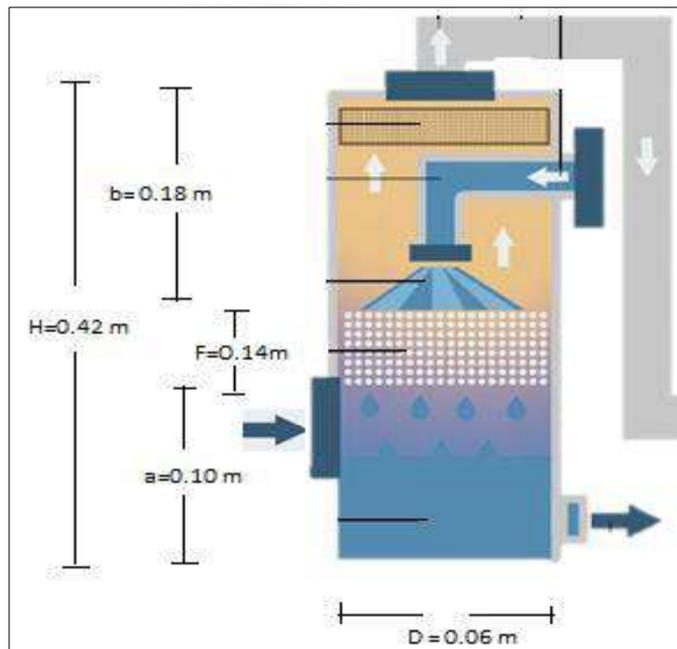
Fuente: condorchem envitech

¹⁰⁹ Ricardo Lucas A. Diseño y modelado virtual de un colector de partículas tipo Scrubber. [tesis de grado].

5.6.4.4.2. Dimensiones del lavador de gases

Para el dimensionamiento del lavador de gases se tomara como base el diámetro del empaque (filtro) y la altura de la torre será tres veces la altura del filtro ya que este será ubicado en el centro de la torre.

Grafico 76: Dimensiones del lavador de gases



Fuente: elaboración propia según al diámetro del filtro calculado

Las dimensiones del lavador de gases son los parámetros que se utilizaran para un diseño en 3D de la unidad de lavado.

5.6.4.4.3. Diseño de lavador de gases en AutoCAD Plant3D

Plant 3D es una herramienta de diseño de plantas y equipos para la industria química en este caso se diseñó el Scrubber.

Grafico 77: Vista frontal del lavador de gases scrubber



Grafico 78: Vista posterior del lavador de gases scrubber



Fuente: diseño propio en AutoCAD Plant 3D

Grafico 79: Vista lateral y vista interior del lavador de gases scrubber



Grafico 80: Vista del empaque al interior scrubber y retenedor de gotas



Fuente: Diseño propio en AutoCAD Plant 3D

5.6.5. Diseño general del prototipo en AutoCAD Plant 3D

El prototipo diseñado que se muestra a continuación es un diseño con todos sus componentes.

Grafico 81: Vista frontal del reactor más el lavador de gases

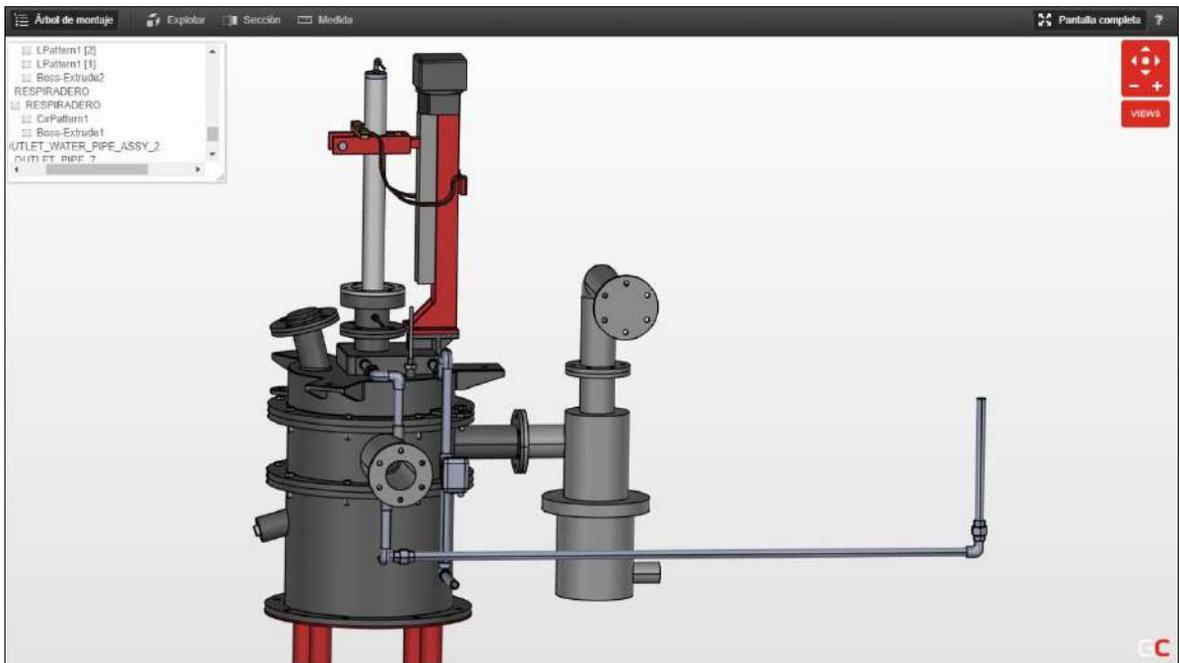
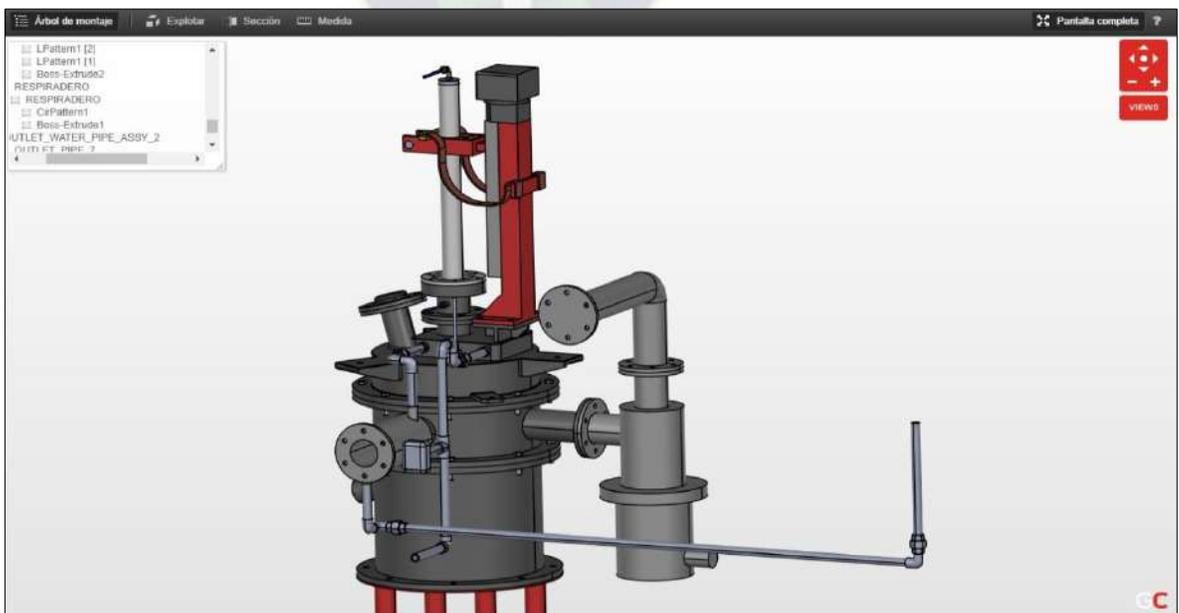


Grafico 82: Vista lateral del reactor y lavador de gases



Fuente: Diseño propio en AutoCAD Plant 3D

Grafico 83: Vista general del prototipo completo

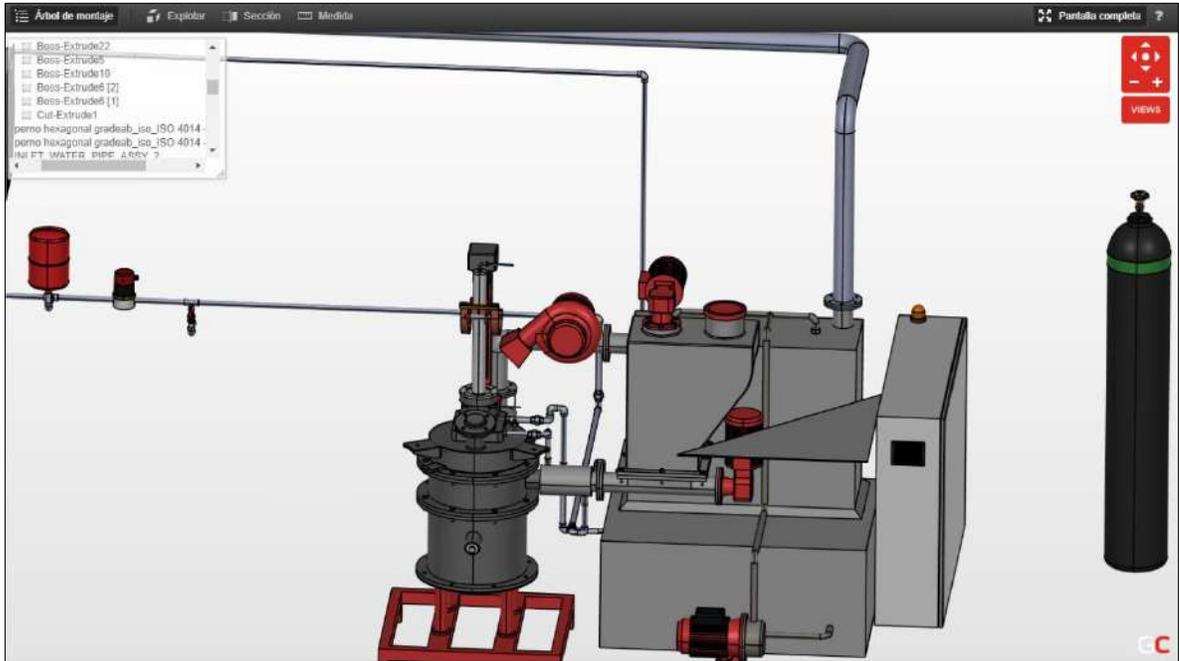
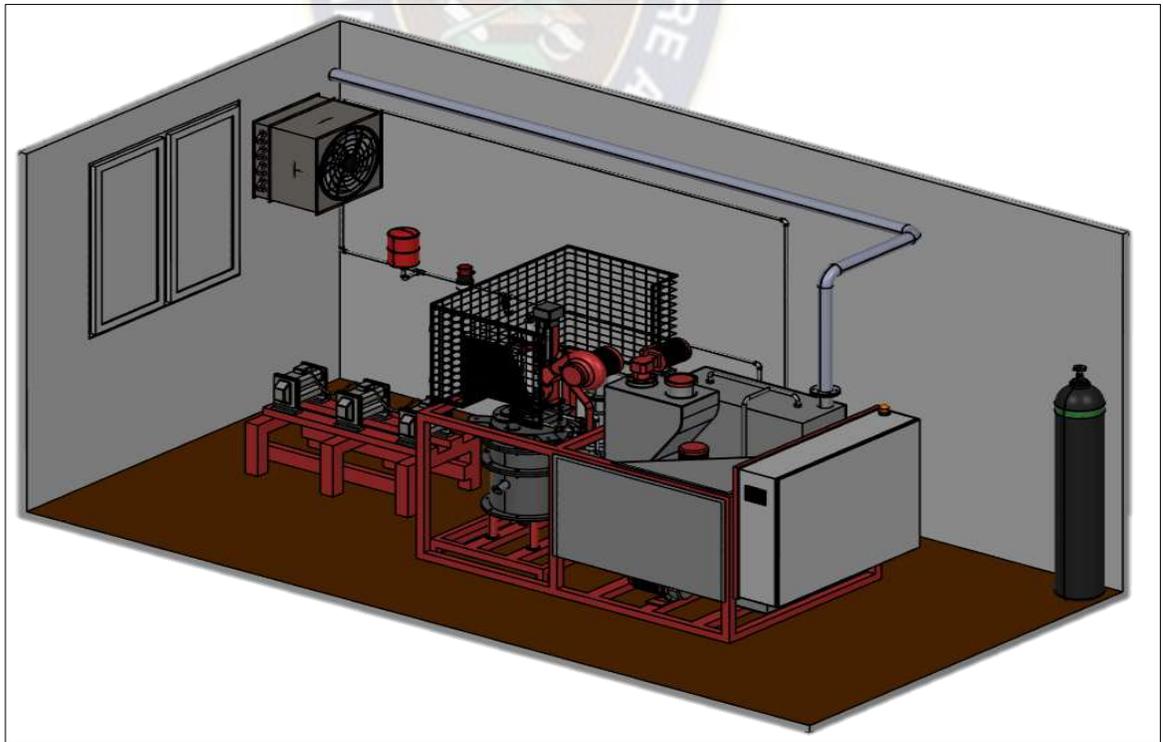


Grafico 84: Vista general y completo del prototipo más accesorio



Fuente: Elaboración propia en AutoCAD Plant 3D

El sistema de gasificación por plasma diseñado que se muestra en los gráficos 79 al 82 es para procesar 1 kg/h de residuos sólidos urbanos, este sistema cuenta con todas las unidades que requiere el proceso.

5.7. Construcción del prototipo

Se construirá un prototipo de gasificación por plasma de lecho fluidizado.

El gasificador producirá gas de síntesis con bajo contenido de alquitranes e impurezas mediante el proceso de conversión termoquímica, con la finalidad de que el gas pueda utilizarse para distintas aplicaciones y una de ellas es alimentar un motor de combustión y así producir electricidad.

A continuación, se describe cada uno de los componentes del equipo de gasificación y su principal función dentro del proceso para la producción de gas de síntesis. También se da a conocer el proceso de ensamble y las herramientas necesarias para que el equipo sea armado desde su proceso inicial.

El equipo de gasificación por plasma está integrado por:

- Tolva de materia prima.
- Compresor de aire.
- Arco eléctrico con antorchas de plasma.
- Reactor de gasificación por plasma.
- Intercambiador de calor.
- Rejillas para el interior del reactor.
- Aislamiento crítico a base de cemento refractario.
- Boquillas de entrada de materia prima y aire ionizado.
- Tuberías de 3/8" para el transporte del gas.

- Ciclón separador de partículas.
- Lavador de gases con filtro de lecho empacado.
- Sistema de compresión del gas de síntesis.
- Sensor de monóxido de carbono.
- Sensor de temperatura.

5.7.1. Componentes del sistema de gasificación

5.7.1.1. Tolva de materia prima

La tolva de materia prima es un contenedor de acero que tiene un volumen de 0.113 m³. Se encuentra en la parte más alta del equipo. Se encarga de almacenar el combustible (Residuos Sólidos Urbanos) y a su vez suministrarlo para que el proceso se lleve a cabo. La tolva se sella con una tapa para mantener el vacío del sistema. La tapa incluye una válvula de liberación de seguridad para el proceso de secado de humedad por condensación en un anillo incorporado en el diseño de la tolva.

grafico 85: tolva de materia prima



Fuente: Elaboración propia

5.7.1.2. Compresor de aire

El compresor se encarga de suministrar aire al sistema de arco eléctrico. Que recibe energía mediante el movimiento de un motor eléctrico y la transforma en energía de presión, comprimiendo el aire que aspira y almacenándolo en un calderín, como norma general, se puede decir que, por cada caballo de potencia del compresor, se obtiene un caudal de 100 litros de aire comprimido por minuto.

En este caso para alimentar al sistema de arco eléctrico se necesita un caudal de aire de 53 lt/min dado que el arco requiere como máximo ese caudal de aire.

A continuación, se detalla las especificaciones del compresor a utilizar.

Compresor de Aire		
Model XYBM20B	Air Delivery $0.1 \text{ m}^3/\text{min}$	Tank 24 L
Power 2HP	Rated Voltage 220V	Rated Frequency 50 Hz
Working pressure 8 bar	Speed 2850 rpm	Weight 26 kg

Grafico 86: Compresor de Aire



Fuente: foto tomada del compresor

5.7.1.3. Arco eléctrico con antorchas de plasma

5.7.1.3.1. Arco eléctrico

El sistema de generación de plasma usado es una cortadora comercial por plasma consta de un arco eléctrico como fuente de potencia y una torcha de corte por arco transferido.

El arco eléctrico entrega un voltaje de 160 V DC y un rango de intensidad de corriente ajustable entre 30 – 105 A

El modelo utilizado es: CUT-60 de plasma inverter, que alcanza temperaturas próximas a los 4000 ° C.

Grafico 87: Fuente de potencia comercial CUT-60 Plasma Inverter



Fuente: Foto tomada del Arco eléctrico CUT 60

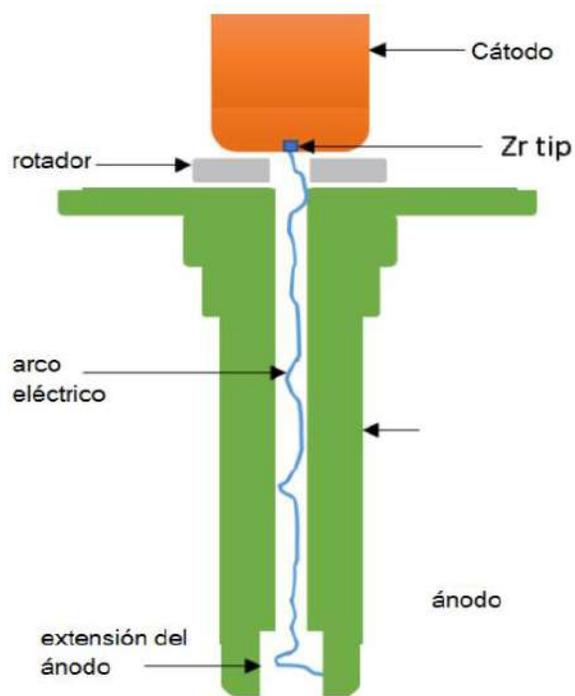
5.7.1.3.2. Torchas de plasma

Una torcha de plasma es un dispositivo para generar un flujo de plasma en una determinada dirección.

Los plasmas térmicos se generan al imponer una diferencia de potencial entre dos conductores formando un arco eléctrico entre ambos. Luego el gas que rodea la descarga

aumenta su temperatura y alcanza el estado plasma. Las torcha de plasmas térmicos pueden ser de corriente continua (DC) o alterna (AC). Los gases más comúnmente usados son aire, Ar, He, N₂, H₂ y mezclas de ellos.

Grafico 88: Esquema de una torcha de plasma



Fuente: elaboración propia en base al catálogo del Arco eléctrico CUT 60

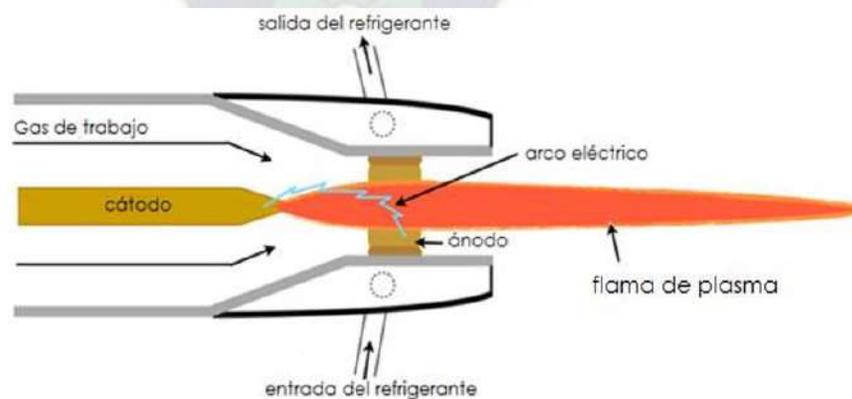
Las Torchas DC son las más comunes y desarrolladas. Respecto de las AC son más estables, silenciosas y no presentan el parpadeo típico de las AC, son más fáciles de controlar y de construir con menos electrodos que se gastan más lentamente. Entre 1970 y 1990 en Estados Unidos, Rusia y Francia se han hecho grandes esfuerzos para desarrollar torchas AC, de alta potencia y eficiencia. Desechos domésticos, agrícolas, industriales, de carpintería, neumáticos, barros, etc. Se clasifican como de baja toxicidad con contenido orgánico. Su tratamiento es de gran interés ya que se puede transformar

en una fuente de energía, siendo la tecnología de las torchas AC una solución de alto rendimiento debido a las eficiencias que se alcanzan¹¹⁰.

5.7.1.3.3. Torcha DC de arco no transferido

Se llama torcha al dispositivo que permite formar plasma. El término “no transferido” hace referencia a como se mantiene el arco eléctrico, si es dentro o fuera de la torcha. En una torcha DC de arco no transferido, el arco eléctrico se forma entre dos electrodos dispuestos dentro de la torcha. Pueden ser de cobre, tungsteno, argón, grafito, molibdeno, plata, etc., y constantemente se inyecta algún gas como aire, nitrógeno, argón, helio, etc. Que se ioniza para formar el jet de plasma. Regulando el caudal de gas se puede controlar el alcance del jet/flama admitiendo un amplio rango desde 80 l/min a 5000 l/min. La temperatura del plasma generado en estas torchas se encuentra entre 6000 y 15000 °C. Estas son las más usadas en tratamiento de residuos y procesamiento de materiales habiéndose logrado condiciones energéticas de 145 MJ/m³ en el plasma.

Grafico 89: Esquema de torcha de arco no transferido



Fuente: Catalogo de la torcha CUT 60.

¹¹⁰ Hypertherm Powermax 105. Plasma arc cutting systems. Service Manual 807580. Revision 1. Hypertherm, Inc., Hanover USA.

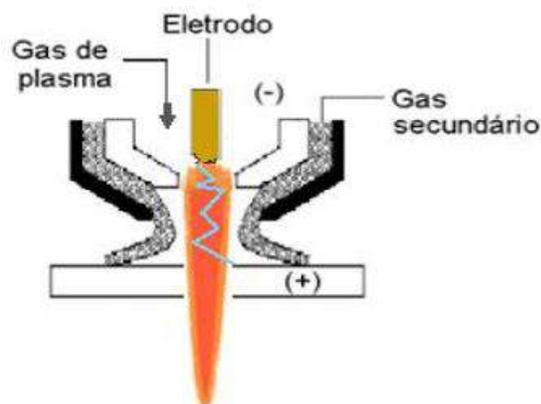
Las desventajas de esta tecnología son que contaminan el producto debido al desgaste del electrodo, y una muy buena eficiencia térmica. Solo el 50% de la energía de entrada se transforma en calor útil para el proceso ya que utiliza la flama del plasma.

5.7.1.3.4. Torcha de DC de arco transferido

Es un tipo de torcha cuyo diseño intenta maximizar la energía transferida al gas, y por consiguiente maximiza el calor útil para el proceso. Estas son muy eficientes desde el punto de vista térmico habiendo alcanzado una densidad de energía del plasma de 2800 Mj/m³.

La disposición de los electrodos en una torcha de arco no transferido tiene por desventaja que la refrigeración remueve una gran parte de la energía del plasma resultando en una flama de menor temperatura. En una torcha de arco transferido el ánodo se encuentra fuera de la misma, de modo que la refrigeración es necesaria solo en el cátodo, utilizando un gas secundario (que puede ser el mismo que el gas de plasma). Esto resulta en un aumento de la temperatura del plasma, superando los 20000 °C con caudales de gas no mayores a 200 l/min¹¹¹.

Grafico 90: Esquema de una torcha de arco transferido



Fuente: Imagen extraída de: análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma

¹¹¹ Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q. y Armijo-de Vega, C. (2009). La tecnología de plasma y residuos sólidos. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-2, pp. 51-56, ISSN: 1665-529X.

Si la refrigeración es suficiente se puede evitar que el electrodo que se encuentra fuera de la torcha se funda y en consecuencia, no contaminar el producto. Este tipo de torchas se utiliza típicamente en el proceso de fundición del titanio. Otra gran rama de aplicaciones son las herramientas de corte y soldadura. Una ventaja que ofrece este tipo de torchas es que el electrodo externo puede servir para más de una torcha en simultáneo, esto se suele denominar sistema de torchas mellizas.

5.7.1.3.5. Torcha seleccionada para el prototipo

El Prototipo utilizará una torcha DC de arco no transferido, debido a que no utiliza un gas secundario y que este alcanza temperaturas superiores a los 3000 ° C.

La torcha requiere un caudal de aire de 117 LPM a una presión de 2,5 bares para la formación del plasma y su propia refrigeración, para la operación de equipo debe existir una separación entre la torcha y el electrodo al cual transfiere el arco menor a 10 mm. Si es mayor no se formará el arco eléctrico.

A continuación, se observa un despiece y descripción de las partes que componen la torcha utilizada. La misma puede operar en modo corte o desbaste.

Grafico 91: Esquema y despiece del cabezal de corte



Fuente: foto tomada de la antorcha de plasma

5.7.1.4. Reactor de gasificación por plasma

El Reactor de gasificación se construye según las mediadas ya determinadas, de material de acero al carbono de 4 mm de espesor, también se lo incorpora los orificios de salida de gas y para la alimentación de materia prima.

Grafico 92: Reactor de gasificación por plasma, construido.

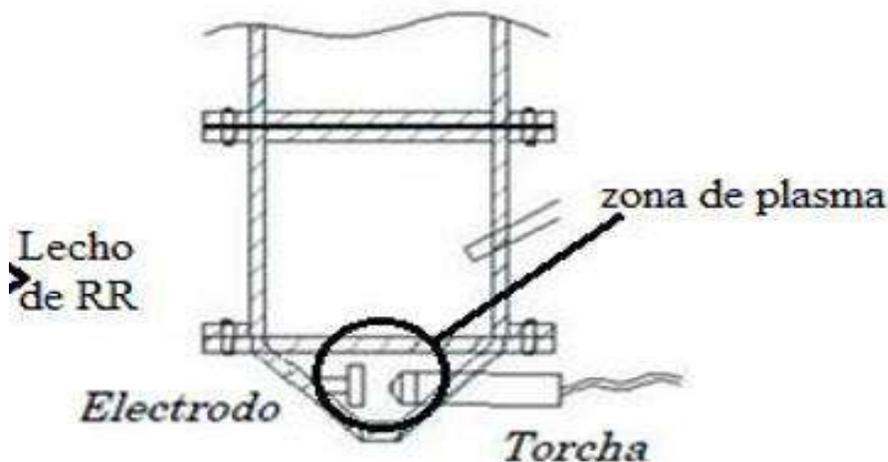


Fuente: Foto tomada del reactor.

El reactor construido contara con una torcha de plasma de arco no transferido de 15 KW lo cual es óptimo para desintegrar 1 Kg/h de residuos sólidos, y el volumen del rector se adapta para esa cantidad determinada.

El reactor es un sistema de lecho fluidizado la cual fue diseñada y construida, donde la principal zona, es la zona de plasma.

Grafico 93: Zona de plasma



Fuente: extraído de EQTEC plasmagasificación

En la zona de plasma es donde ocurrirá la reacción directa de los residuos sólidos urbanos con el plasma, luego este se convertirá en un lecho fluidizado, que a medida que caigan los residuos sólidos por gravedad por la parte superior el lecho empezará desintegrar los residuos en sus respectivos átomos cargados eléctricamente.

La torcha requerirá como mínimo para procesar 1kg/h de residuos 48 L/min de flujo de aire. La torcha tiene un ánodo de cobre y un cátodo de cobre con un tip central de zirconio separados por 1.8 – 2 mm donde se genera el arco eléctrico, y que comienza a ascender y elevarse la temperatura, ya que el reactor esta herméticamente aislado, y por consecuente también incrementa la presión dentro del reactor por las colisiones que existe al desintegrarse los RSU en sus mismos átomos.

El reactor es un cilindro de acero al carbono con capacidad de almacenamiento por carga de 0.0129 m³ de Residuos sólidos urbanos. A este elemento se le considera el corazón del proceso de gasificación por plasma, al realizarse en él los procesos de desintegración y reducción. El reactor es compacto de corrientes descendentes multietapa capaz de generar gas con bajo contenido de alquitranes para el uso de motores de combustión interna. El reactor se muestra en el grafico 36, y cumple con las características de diseño propuesto

5.7.1.5. Intercambiador de calor

El Serpentín o evaporador es un intercambiador de calor de gas circulante con un volumen de 0.00821 m³ utilizado para introducir fuentes externas de calor a la zona de pirolisis de un gasificador de tiro descendente.

En este caso será el encargado de reducir la temperatura del gas de síntesis a la salida del reactor, reducirá la temperatura de aproximadamente 1300 °C a 200 °C, y que este gas se dirija a un ciclón separador de partículas.

El serpentín utilizado es un componente de un sistema de refrigeración, pero este se acomoda a nuestros requerimientos.

Grafico 94: Cambiador de calor



El intercambiador de calor es un tubo adaptado en su interior un capilar de cobre por donde circula agua, para que este gane calor y así el vapor de agua pueda ser aprovechado en una turbina, mientras el gas baja su temperatura para ser alimentado al ciclón.

5.7.1.6. Aislamiento crítico

El aislamiento es el encargado de mantener la temperatura de operación interna en el reactor, este aislamiento está a base de cemento refractario y fibra de vidrio, fue rellenado según el diámetro crítico determinado en el diseño y según el volumen del reactor, este aislamiento tiene la capacidad de soportar temperaturas muy altas hasta 1200 °C.

Grafico 95: Aislamiento de reactor (vista interna)



Fuente: Foto tomada del reactor

5.7.1.7. Ciclón separador de partículas

El ciclón se construye según las dimensiones ya determinadas en el diseño, de material de acero galvanizado soldado con bronce de una capacidad de 0.001 m³.

Después de que el gas de síntesis sale del reactor de gasificación, éste pasa a través de un cambiador de calor luego llega al ciclón. que separa las partículas más grandes que pueden haber sido arrastradas en la corriente de gas. El condensado y las partículas caen a través de la trampa en la parte inferior del ciclón. El frasco de condensado o tarro de vidrio del ciclón debe vaciarse antes de cada operación, para así evitar que se alcance su

máxima capacidad durante el funcionamiento del gasificador. El ciclón se encarga de eliminar la mayoría de las partículas antes de ingresar a un lavador de gases.

Grafico 96: Ciclón separador de partículas



Fuente: Foto tomada del ciclón construido

El ciclón construido, en la parte superior lleva un manómetro para medir la presión de salida del gas para ser alimentado a la unidad de limpieza.

5.7.1.8. Lavador de gases con filtro de lecho empacado

El lavador de gases es construido de la misma forma que el ciclón con material de acero galvanizado y según las dimensiones ya determinadas cuando fue diseñado, este lavador lleva en su interior un filtro de lecho empacado que está ubicado al centro de la torre y la parte superior tiene un atomizador de agua para lavar el gas y una trampa de gotas de agua de condensado.

El filtro de lecho compacto es el cilindro metálico que tiene capacidad de 0.06 m³ y se llena de carbón con tamaño de partícula entre 1.16 a 1.4” o y láminas de polímeros altamente porosos para retener los gases ácidos. De tal manera que el gas de síntesis este apto para su uso final.

Grafico 97: Filtro tipo Scrubber



Fuente: foto tomada del prototipo

El filtro scrubber en su interior lleva un separador en forma de tambor con una cavidad empacada con carbón activado, el filtro esta humedecido con una solución básica para disminuir la acides del gas.

5.7.1.9.Compresor para el gas de síntesis

El compresor que se utiliza para comprimir el gas de síntesis es aquel que se utiliza en un sistema de refrigeración, Consiste en forzar mecánicamente la circulación de un fluido en un circuito cerrado creando zonas de alta y baja presión.

Grafico 98: Compresor de gas y su unidad de almacenamiento



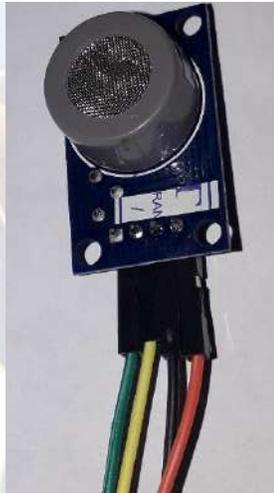
Fuente: Foto tomada del prototipo

El compresor es la última unidad del prototipo que es el encargado de comprimir el gas de síntesis y almacenarlo en un recipiente graduado que consta de una válvula para medir la presión y el volumen de gas generado

5.7.1.10. Sensor de monóxido de carbono

El sensor de CO MQ7 que se utiliza es un sensor electroquímico y varía su resistencia cuando es expuesto a CO, internamente posee un calentador encargado de aumentar la temperatura interna y con esto el sensor pueda reaccionar con la presencia de CO provocando un cambio en el valor de la resistencia. El calentador dependiendo del modelo puede necesitar un voltaje entre 5 y 2 voltios, el sensor se comporta como una resistencia y necesita una resistencia de carga (RL) para cerrar el circuito y con esto hacer un divisor de tensión y poder leerlo desde un micro controlador o una computadora mediante programación con arduino.

grafico 99; Sensor de CO MQ-7



Fuente: foto tomada del sensor

5.7.1.11. Sensor de temperatura

El equipo cuenta con dos lecturas diferentes de temperatura, una ubicada en la parte inferior del reactor (zona de plasma) y la segunda a la salida del reactor.

- La temperatura de la parte inferior de reducción de campana mide la temperatura de la zona plasma, dentro de la restricción de la campana de la reducción.

- La temperatura de la parte superior a la salida del reactor mide la temperatura antes que ingrese al cambiador de calor, y este mismo medirá la temperatura a la salida del cambiador de calor.

grafico 100: Sensor de temperatura



Fuente: Foto tomada de la tapa del reactor

5.7.1.12. Sensor de humedad

El sensor de humedad determinara la cantidad de vapor de agua contenida en el gas de síntesis antes de ser comprimido, se expresa en porcentaje (%). También es importante que para aprovechar a los residuos sólidos urbanos ésta debe tener un porcentaje de humedad menor al 15%.

5.7.1.13. Resumen de componentes del equipo de gasificación

Tabla 24: Resumen de componentes de gasificación

N°	Componente	Especificaciones	Funcionamiento
1	Tolva de materia prima	Barril de acero de 0.113 m ³	Almacenar materia prima
2	Zona de secado	Elemento de acero	Calentar y disminuir la humedad de la materia prima
3	Compresor de aire	2 HP, 0.1 L/min, 24 L	Suministro de aire al sistema de arco eléctrico y torchas de plasma
4	Reactor de gasificación	Acero al carbono, D=19 cm. H=55 cm	Corazón del proceso en el que se lleva a cabo la gasificación por plasma y la conversión de los residuos sólidos.
5	Sistema de arco eléctrico	112 kw. 1 torcha de plasma	Generador del estado plasma a altas temperaturas
6	Boquillas de aire	Hierro colado de 3/8" y orificio de 5/32"	Elementos que direccionan la torcha al proceso de gasificación
7	Rejilla	Metálica circular	Sostiene la materia que no se haya convertido dentro del reactor
8	Cambiador de calor	Serpentín de acero	Reducir la temperatura del gas de síntesis a la salida del reactor
9	Ciclón	Cono metálico	Separa las partículas mas grandes que pueden haber sido arrastradas en la corriente de gas.
10	Lavador de gases de lecho empacada	Torre de acero galvanizado de 0.060 m ³	Retiene las partículas que hubieran pasado de ciclón y retiene gases ácidos (tóxicos)
11	Sistema de compresión	1/3 HP	Comprime el gas de síntesis procedente de todo el proceso
12	Sensor de monóxido de carbono	Detecta concentraciones de CO de 11 hasta 999 ppm	Medirá la conversión de los residuos sólidos por minuto
13	Sensor de Temperatura	Rango de temperatura de -50 °C hasta 1300 °C	Registra la temperatura del proceso de gasificación en la zona de plasma
14	Sensor de Humedad	Rango de medición de humedad del 5% al 40%	Registra la humedad relativa del gas a la salida del proceso.

5.8. Ensamblaje del prototipo

Una vez construido todas las unidades del prototipo se procede a ensamblar unidad por unidad para que se tenga todo el sistema completo de gasificación por plasma y sus accesorios para la limpieza de gases, luego se procederá a la simulación y arranque del mismo.

Grafico 101: Prototipo ensamblado



Fuente: Foto tomada del prototipo ensamblado

El prototipo ensamblado cuenta con 7 unidades que se encargaran de convertir a basura en gas de síntesis.

El proceso comenzará con el preparado de la materia prima, luego pasará al reactor de lecho fluidizado donde el plasma se encargará de descomponer la basura en sus componentes elementales debido a las altas temperaturas que se generará dentro del reactor, el tiempo de residencia por kilogramos se estima que será de 30- 40 minutos por kilogramos de residuos sólidos.

Una vez convertido los residuos en gas, este pasará por un tubo que en su interior lleva un capilar de cobre por donde circula agua, el gas caliente transferirá energía al agua de tal manera que reducirá su temperatura, para luego pasar al ciclón separador de partículas. En el ciclón se separarán parte de las cenizas y polvos que podría transportar el gas. Luego pasara a la unidad de limpieza del gas, que es una mini torre que en su interior lleva un filtro en forma de tambor empacado con carbón activado y una solución básica para reducir la acides del gas.

Finalmente, el gas será succionado por un compresor que se encargará de comprimir el gas y almacenarlo en un recipiente.

CAPITULO VI: SIMULACION Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

La simulación se llevará en dos entornos, la primera será mediante la aplicación del software de Apen Hysys v8.8, para la determinación de sus variables de operación principalmente en el reactor y la calidad del gas de síntesis que se podrá obtener. La segunda será mediante un balance de materia para la determinación de la composición del gas resultante.

Para el funcionamiento del prototipo se utilizarán las variables de operación determinadas en la simulación, y se tendrá como base al balance de materia para predecir y confirmar la composición del gas resultante.

Los residuos sólidos urbanos es la materia prima a utilizar que es considerado como un combustible para el sistema de gasificación por plasma, mediante datos de dirección de medio ambiente del municipio de El Alto se tiene el análisis último de estos residuos lo cual se utilizara en este acápite como datos de partida para la simulación y funcionamiento del prototipo.

6.1. Reacciones químicas en la gasificación de RSU

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son alimentados a reactor de gasificación por plasma donde las altas temperaturas creadas por la torcha de plasma hacen posible la disociación de las moléculas que componen los residuos en sus constituyentes elementales.

Las reacciones químicas que involucra este proceso son los siguientes:





El calor necesario para que se produzcan las reacciones de reducción, (marcadamente endotérmicas y representadas en las reacciones [3] y [7]), se genera al tener lugar la oxidación, (de carácter exotérmico representada por [1]). Las reacciones de hidrogenación, [4] y [11], y reformado, [12] y [9], dependiendo de las condiciones (humedad y presión parcial de CO₂), tienen lugar en pequeña extensión.

El resultado final es un gas compuesto básicamente por H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H_n, H₂O, N₂, alquitranes en minoría y partículas sólidas en suspensión.

Destacar que las condiciones del proceso de gasificación por plasma logran conversiones de carbono a gas cercanas al 95% y una concentración muy baja de alquitranes del orden de 5 g/m³N de gas a la salida del gasificador.

6.2. Simulación del proceso en Aspen Hysys v8.8

La simulación en software se realizará según el proceso descrito en el diagrama de flujo del proceso de gasificación por plasma.

6.2.1. Determinación de las variables de operación por simulación

Las variables de operación se las determinara simulando el proceso en el reactor, como se indicó, el reactor es el corazón de todo el sistema.

6.2.1.1. Datos teóricos de entrada al reactor

Los residuos sólidos urbanos se alimentan de forma continua al reactor previa trituración según a la clasificación de las partículas geldart tipo B.

Se alimenta aire mediante un compresor para la generación de plasma, el aire es ionizado en un arco eléctrico dentro de una torcha y genera temperaturas superiores a los 1000 ° C.

- Alimentación de RSU:

$$F^1 = 1 \text{ kg/h}$$

- Características finales de los residuos (% peso):

F^1	(% peso base seca)
C	47.68
H	6.18
O	32.88
N	1.8
S	0.28
Cenizas	11.18

- Alimentación de aire:

El sistema de alimentación de aire es un compresor que tiene las siguientes características:

$$\dot{Q} = 0.1 \text{ m}^3/\text{min} = 1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 24 \text{ L}$$

$$P = 2 \text{ HP}$$

$$P = 8 \text{ bar} = 7.8952 \text{ atm}$$

$$2850 \text{ rpm}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.225 \text{ kg/m}^3 \quad a \quad T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Calculo del flujo másico de aire.

$$\dot{m} = \rho_{\text{aire}} * Q$$

$$\dot{m} = 1.225 \frac{\text{kg}^3}{\text{m}} * \frac{1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{\text{s}} = 0.00204 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 7.3515 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.21$$

$$\dot{m} = 1.5438 \text{ kg/h}$$

$$m_{\text{aire}} = 1.5438 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ mol}}{28.84 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 53.5298 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$N^2 = 53.5298 \text{ mol/h}$$

N^2 : es el flujo molar de alimentación de aire que se utilizara para todo cálculo requerido.

- Composición del aire:

N^2	% PESO
O_2	21 %
N_2	78 %
H_2O	1 %

Con los datos ya mencionados realizaremos la simulación para determinar la temperatura y presión optima de operación, el flujo de aire se lo determino en base al requerimiento del arco eléctrico por lo que ese dato se mantendrá constante, así como el flujo de alimentación de RSU, composición de RSU, composición de aire.

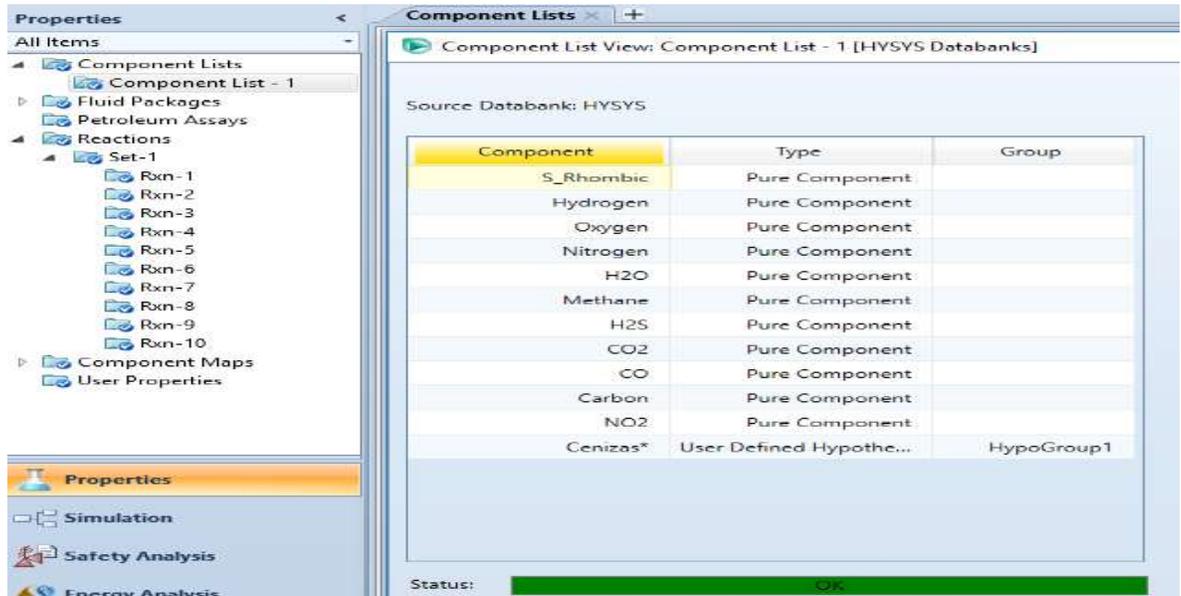
6.2.1.2. Simulación en el reactor

El reactor que se utilizara en la simulación es un rector de conversión donde se llevara a cabo 10 reacciones químicas ya mencionadas anteriormente, el paquete fluido que utilizaremos se la de Peng Robinson y le añadiremos las 10 reacciones.

Toda la simulación se llevará en base seca.

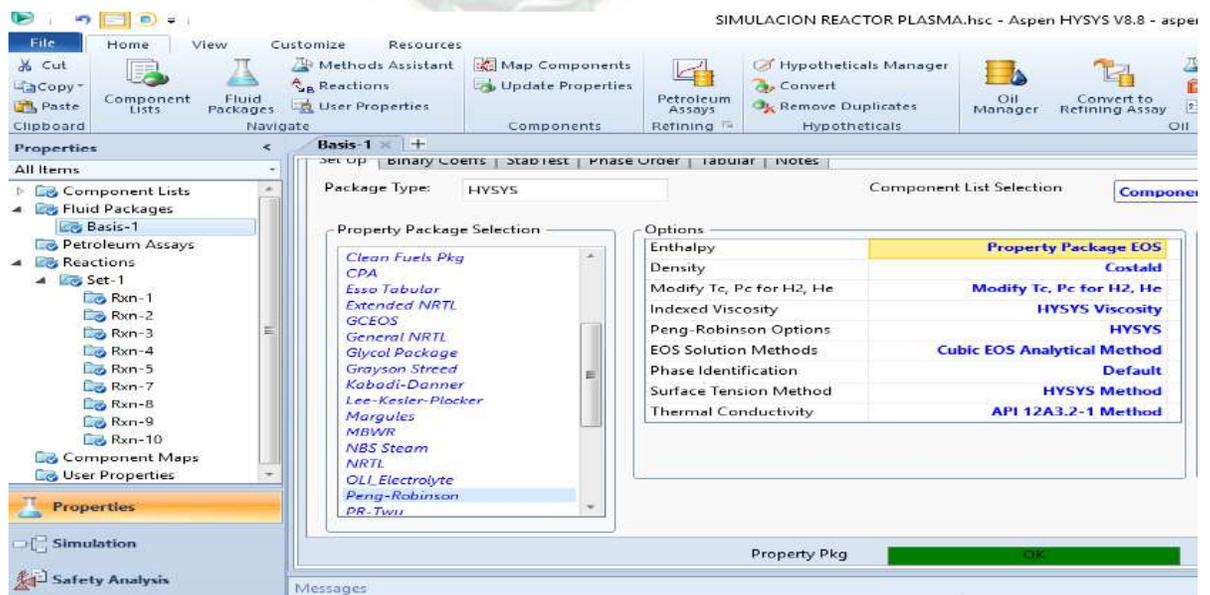
6.2.1.2.1. Selección de componentes

Se seleccionaron todos los componentes que participaran en la reacción.



6.2.1.2.2. Selección del paquete de fluido

Se selecciona el paquete de fluido de peng Robinson, porque este es el que más se adapta al caso de estudio.



6.2.1.2.3. Adición de las reacciones químicas

Al paquete de fluido se adicionan diez reacciones químicas, y estos se convertirán dentro de un reactor de conversión.

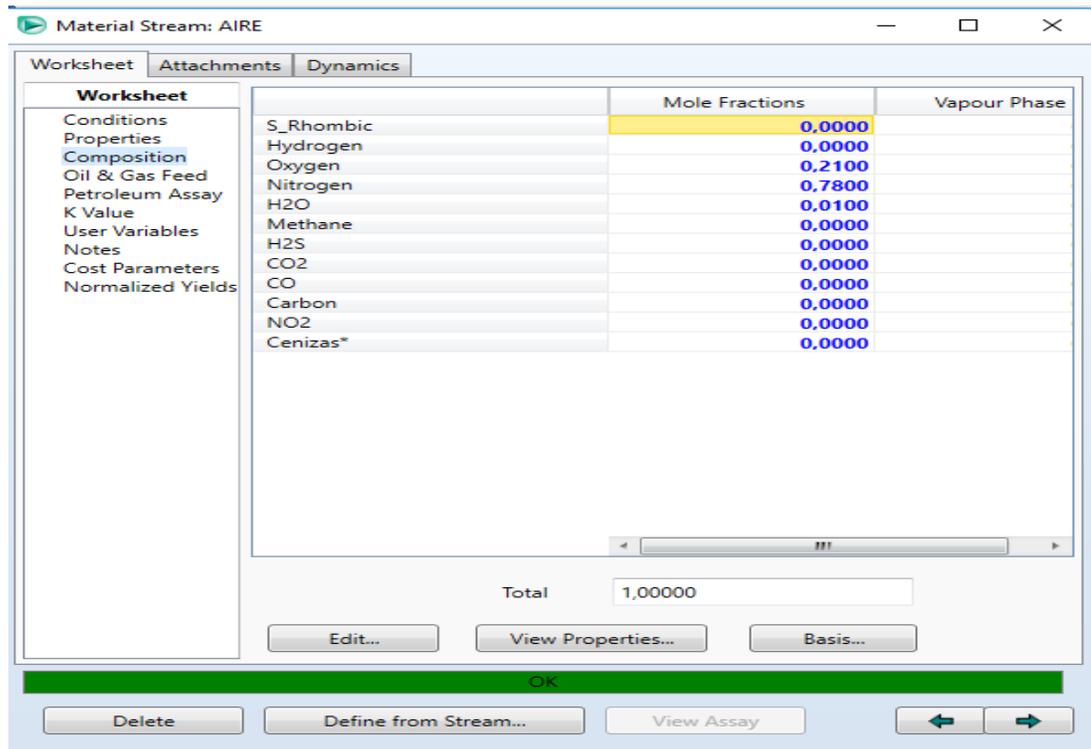
The screenshot shows the 'Reaction Sets: Set-1' configuration window. On the left, a tree view shows 'Reactions' expanded to 'Set-1', listing Rxn-1 through Rxn-10. The main area shows 'Set Info' with 'Set Type' set to 'Conversion' and 'Ready' checked. Below this is a table of 'Active Reactions' with columns for 'Type', 'Configured', and 'Operations Attached'. All 10 reactions are listed as 'Conversion' and 'Configured' with green checkmarks. The 'Operations Attached' column for all reactions is 'REACTOR PLASMA'. At the bottom, there are buttons for 'Add Reaction', 'Delete Reaction', and 'Copy Reaction'.

Active Reactions	Type	Configured	Operations Attached
Rxn-1	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-2	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-3	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-4	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-5	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-6	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-7	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-8	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-9	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-10	Conversion	✓	REACTOR PLASMA

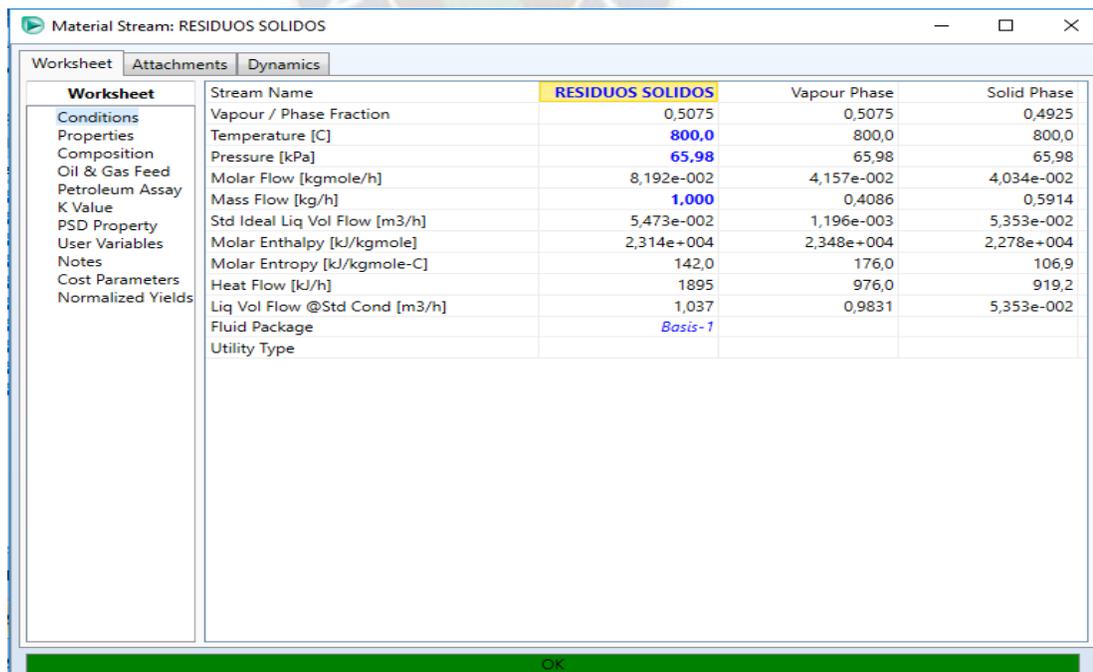
6.2.1.2.4. Especificación de flujos de entrada

The screenshot shows the 'Material Stream: AIRE' configuration window. The 'Worksheet' tab is active, displaying a table of properties for the 'AIRE' stream. The 'Fluid Package' is set to 'Basis-1'. The table includes properties such as Vapour / Phase Fraction, Temperature, Pressure, Molar Flow, Mass Flow, Std Ideal Liq Vol Flow, Molar Enthalpy, Molar Entropy, Heat Flow, Liq Vol Flow @Std Cond, and Utility Type.

Worksheet	Stream Name	AIRE	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	1000	1000
Composition	Pressure [kPa]	800,0	800,0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	5,370e-002	5,370e-002
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1,544	1,544
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,782e-003	1,782e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	2,877e+004	2,877e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	180,7	180,7
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	1545	1545
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1,269	1,269
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		



Se especifica el flujo de entrada del aire con las condiciones de P, T y su respectiva composición.



Material Stream: RESIDUOS SOLIDOS

Worksheet Attachments Dynamics

Worksheet

- Conditions
- Properties
- Composition
- Oil & Gas Feed
- Petroleum Assay
- K Value
- PSD Property
- User Variables
- Notes
- Cost Parameters
- Normalized Yields

	Mass Fractions	Vapour Phase	Solid Phase
S_Rhombic	0,0028	0.0000	0.0047
Hydrogen	0,0618	0.1512	0.0000
Oxygen	0,3288	0.8047	0.0000
Nitrogen	0,0180	0.0441	0.0000
H2O	0,0000	0.0000	0.0000
Methane	0,0000	0.0000	0.0000
H2S	0,0000	0.0000	0.0000
CO2	0,0000	0.0000	0.0000
CO	0,0000	0.0000	0.0000
Carbon	0,4768	0.0000	0.8062
NO2	0,0000	0.0000	0.0000
Cenizas*	0,1118	0.0000	0.1890

Total 1,00000

Edit... View Properties... Basis...

OK

Delete Define from Stream... View Assay

Se especifica la corriente de entrada de los residuos sólidos urbanos con su respectiva P, T y Composición.

6.2.1.2.5. Especificación del reactor de conversión

Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Design

Name: REACTOR PLASMA

Inlets

- AIRE
- RESIDUOS SOLIDOS
- << Stream >>

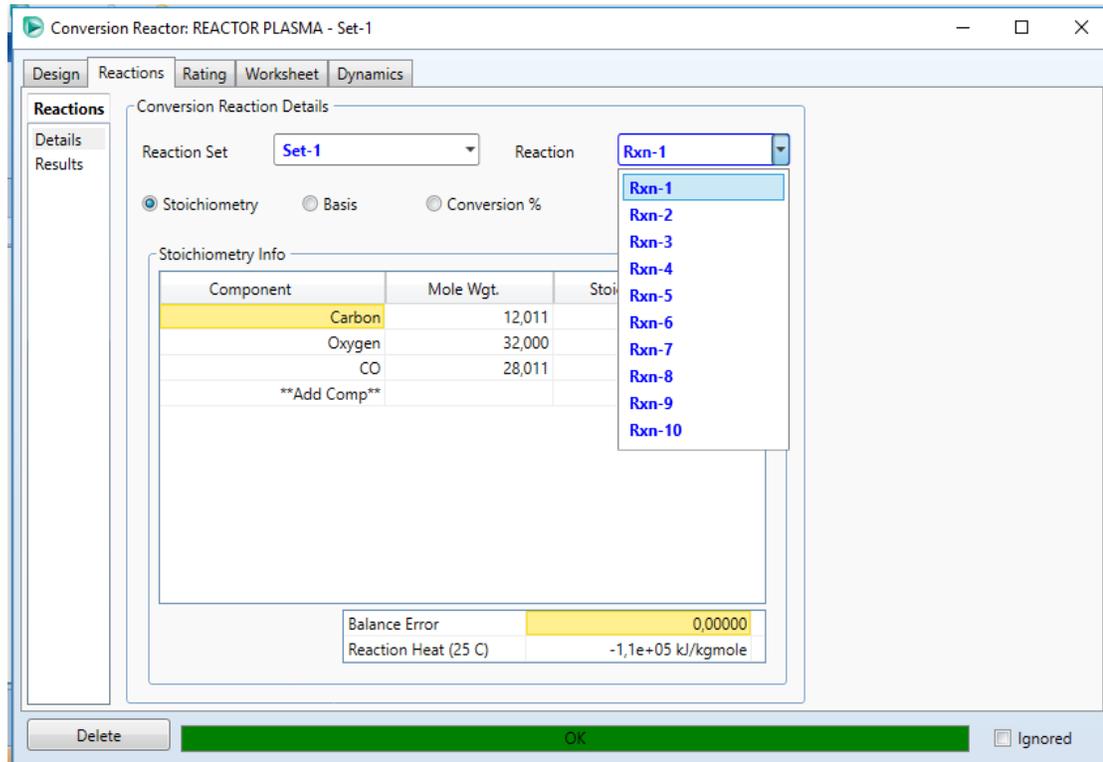
Vapour Outlet: GAS SINTETICO-

Liquid Outlet: ESCORIA

Energy (Optional): ARCOELECTRICO

Fluid Package: Basis-1

Delete OK Ignored



Al reactor de conversión se añaden las reacciones químicas que ocurrirán.

6.2.1.2.6. Composición teórica del gas de síntesis

La composición del gas de síntesis está dada por lo siguiente:

Tabla 25: Composición típica del gas de síntesis (Bridgwater 1995)

Gas	% en volumen
Hidrogeno (H_2)	11
Monóxido de carbono (CO)	24
Dióxido de carbono (CO_2)	9
Metano (CH_4)	3
Nitrógeno (N_2)	53

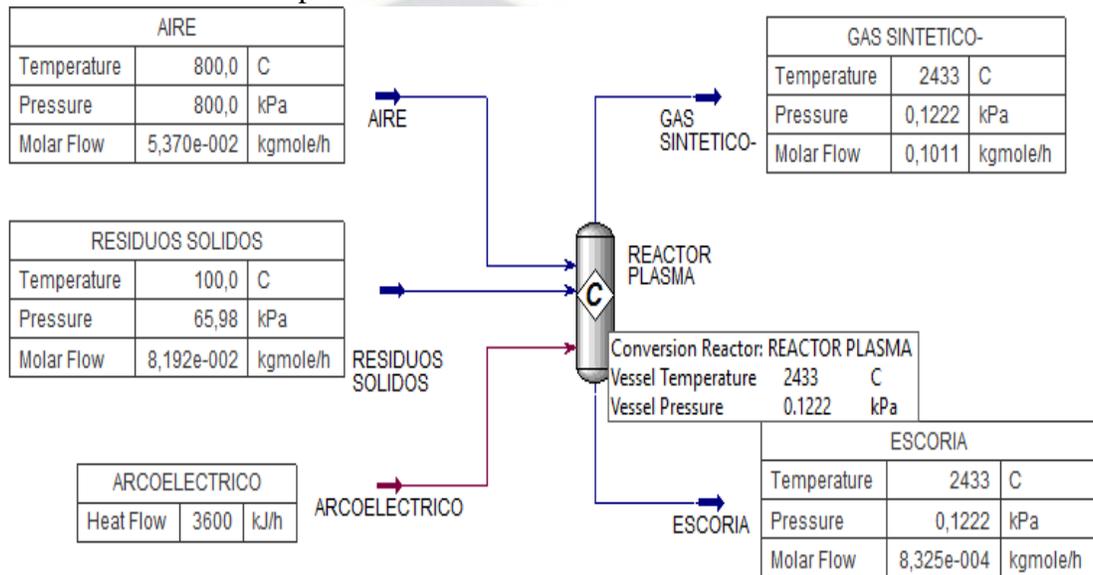
Fuente: Bridgwater 1995

El gas obtenido es una mezcla principalmente de hidrogeno (H_2), metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y nitrógeno (N_2), y otros hidrocarburos gaseosos en menor proporción. Utilizaremos estos parámetros como referencia en la simulación y funcionamiento del prototipo.

6.2.1.2.7. Operación del reactor

El programa ya está correctamente especificado y se muestran los primeros resultados de la simulación, se especificaron las corrientes de Aire, RSU y condiciones del Reactor. Como resultado de la simulación se obtuvieron las corrientes de salida: Gas Sintético, Escoria y (T, P) de operación al interior del reactor.

- **Condición 1:** Especificación de corrientes de entrada



Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet

Name	AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Vapour	1,0000	0,5075	0,0000	1,0000
Temperature [C]	800,0	100,0	2433	2433
Pressure [kPa]	800,0	65,98	0,1222	0,1222
Molar Flow [kgmole/h]	5,370e-002	8,192e-002	8,325e-004	0,1011
Mass Flow [kg/h]	1,544	1,000	0,1151	2,429
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,782e-003	5,473e-002	5,324e-002	3,707e-003
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	2,198e+004	2182	1,368e+006	3,777e+004
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	175,0	110,9	4458	304,2
Heat Flow [kJ/h]	1180	178,8	1139	3820

Delete OK Ignored

Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

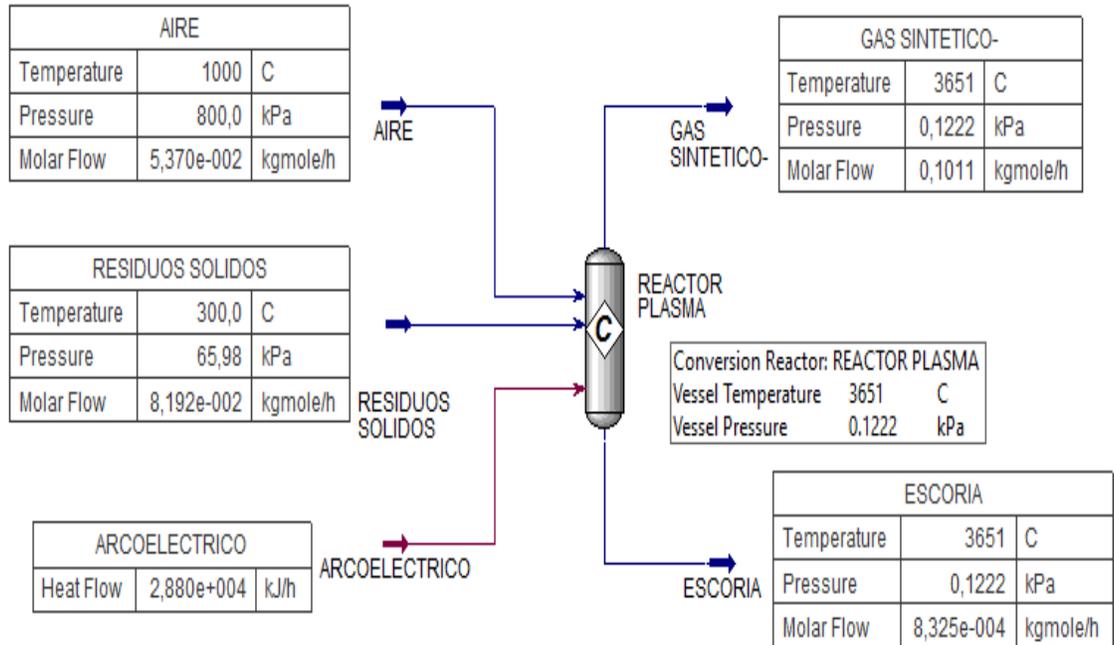
Worksheet

	AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
S_Rhombic	0,0000	0,0011	0,0000	0,0000
Hydrogen	0,0000	0,3742	0,0000	0,1871
Oxygen	0,2100	0,1254	0,0000	0,0000
Nitrogen	0,7800	0,0078	0,0000	0,4205
H2O	0,0100	0,0000	0,0000	0,0017
Methane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0594
H2S	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0993
CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,2311
Carbon	0,0000	0,4846	0,3285	0,0000
NO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cenizas*	0,0000	0,0068	0,6715	0,0000

Delete OK Ignored

Con la condición 1 el reactor operará a una temperatura de 2433 °C, a una presión de 0.12 Kpa y la potencia requerida para alcanzar esa condición será de 1kw.

- **Condición 2:** Se especifican las corrientes de entrada y la potencia en el arco eléctrico



Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet

Name	AIRE	RESIDUOS SOLIDOS	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Vapour	1,0000	0,5075	0,0000	1,0000
Temperature [C]	1000	300,0	3651	3651
Pressure [kPa]	800,0	65,98	0,1222	0,1222
Molar Flow [kgmole/h]	5,370e-002	8,192e-002	8,325e-004	0,1011
Mass Flow [kg/h]	1,544	1,000	0,1151	2,429
Std Ideal Liq Vol Flo	3,2e-003	5,473e-002	5,324e-002	3,707e-003
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	2,877e+004	7693	2,062e+006	2,893e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	180,7	122,7	4670	377,4
Heat Flow [kJ/h]	1545	630,1	1717	2,926e+004

Delete OK Ignored

Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

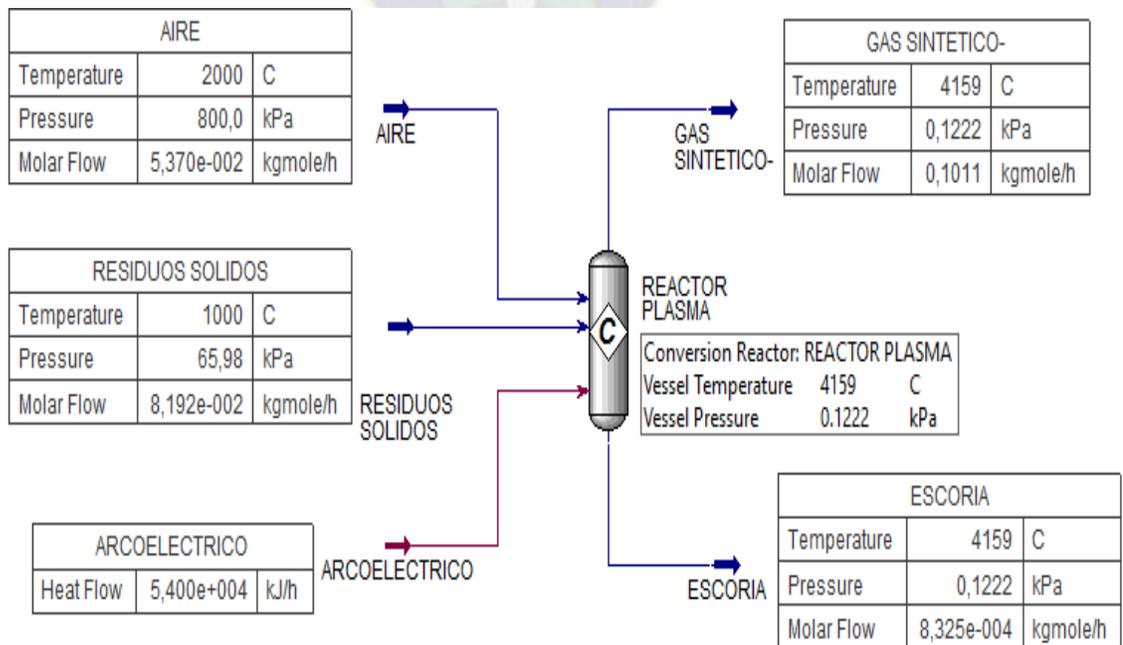
Worksheet

	AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Conditions	S_Rhombic	0,0000	0,0011	0,0000
Properties	Hydrogen	0,0000	0,3742	0,0000
Composition	Oxygen	0,2100	0,1254	0,0000
PF Specs	Nitrogen	0,7800	0,0078	0,0000
	H2O	0,0100	0,0000	0,0017
	Methane	0,0000	0,0000	0,0000
	H2S	0,0000	0,0000	0,0009
	CO2	0,0000	0,0000	0,0993
	CO	0,0000	0,0000	0,2311
	Carbon	0,0000	0,4846	0,3285
	NO2	0,0000	0,0000	0,0000
	Cenizas*	0,0000	0,0068	0,6715

Delete OK Ignored

Con la condición 2 el reactor operará a una temperatura de 3651 °C, a una presión de 0.12 Kpa y la potencia requerida para alcanzar esa condición será de 8kw.

- **Condición 3:** Se especifican las corrientes de entrada y la potencia en el arco eléctrico.



Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet	Name	AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Conditions	Vapour	1,0000	0,5075	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	2000	1000	4159	4159
Composition	Pressure [kPa]	800,0	65,98	0,1222	0,1222
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	5,370e-002	8,192e-002	8,325e-004	0,1011
	Mass Flow [kg/h]	1,544	1,000	0,1151	2,429
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,782e-003	5,473e-002	5,324e-002	3,707e-003
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	6,435e+004	2,960e+004	2,352e+006	5,727e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	201,3	147,5	4740	444,9
	Heat Flow [kJ/h]	3455	2425	1958	5,792e+004

Delete OK Ignored

Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

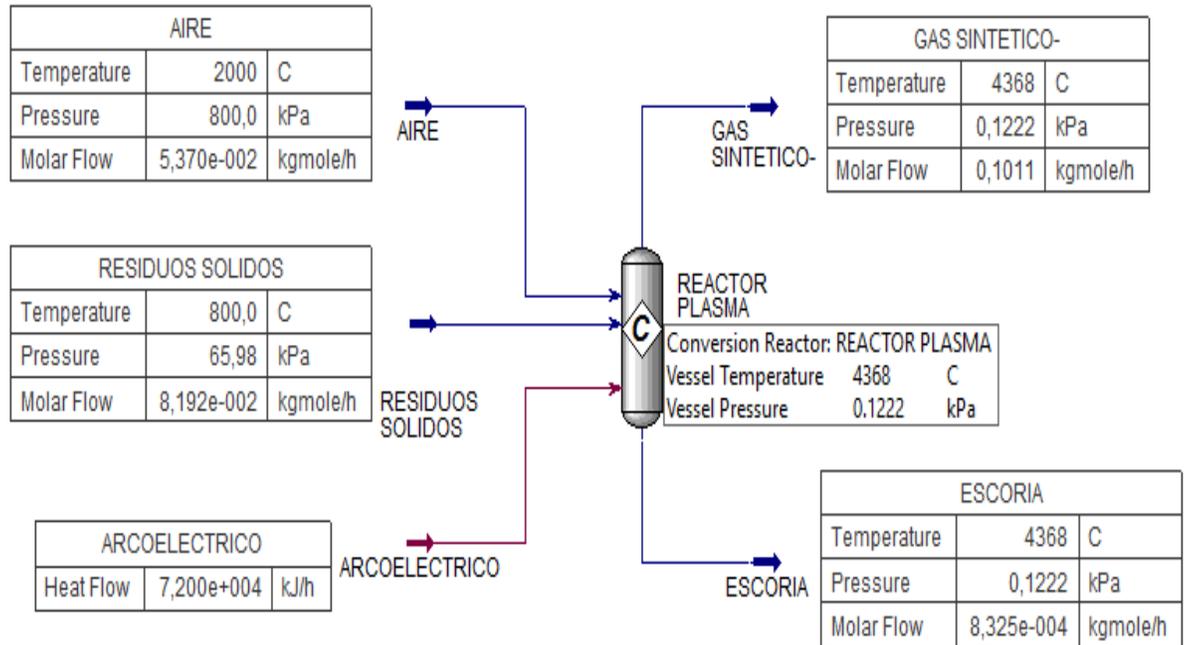
Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet		AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Conditions	S_Rhombic	0,0000	0,0011	0,0000	0,0000
Properties	Hydrogen	0,0000	0,3742	0,0000	0,1871
Composition	Oxygen	0,2100	0,1254	0,0000	0,0000
PF Specs	Nitrogen	0,7800	0,0078	0,0000	0,4205
	H2O	0,0100	0,0000	0,0000	0,0017
	Methane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0594
	H2S	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
	CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0993
	CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,2311
	Carbon	0,0000	0,4846	0,3285	0,0000
	NO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	Cenizas*	0,0000	0,0068	0,6715	0,0000

Delete OK Ignored

Con la condición 3 el reactor operará a una temperatura de 4159 °C, a una presión de 0.12 Kpa y la potencia requerida para alcanzar esa condición será de 15kw.

- **Condición 4:** Se especifican las corrientes de entrada y la potencia en el arco eléctrico.



Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet	Name	AIRE	RESIDUOS SOLID	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Conditions	Vapour	1,0000	0,5075	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	2000	800,0	4368	4368
Composition	Pressure [kPa]	800,0	65,98	0,1222	0,1222
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	5,370e-002	8,192e-002	8,325e-004	0,1011
	Mass Flow [kg/h]	1,544	1,000	0,1151	2,429
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,782e-003	5,473e-002	5,324e-002	3,707e-003
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	6,435e+004	2,314e+004	2,471e+006	7,445e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	201,3	142,0	4766	482,8
	Heat Flow [kJ/h]	3455	1895	2057	7,529e+004

Delete OK Ignored

Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

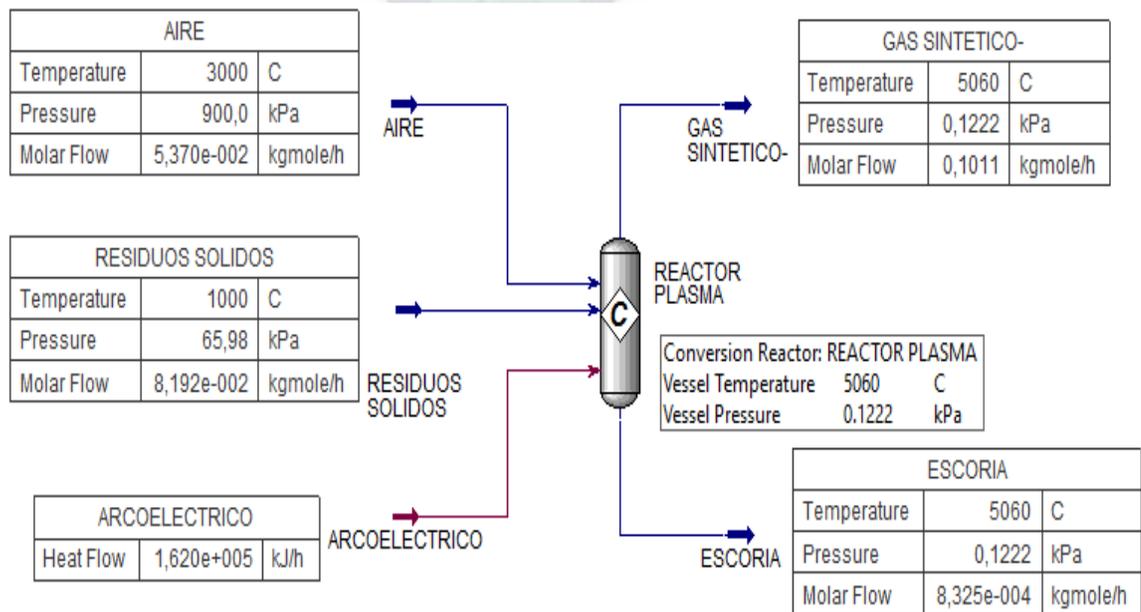
Worksheet

	AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
S_Rhombic	0,0000	0,0011	0,0000	0,0000
Hydrogen	0,0000	0,3742	0,0000	0,1871
Oxygen	0,2100	0,1254	0,0000	0,0000
Nitrogen	0,7800	0,0078	0,0000	0,4205
H2O	0,0100	0,0000	0,0000	0,0017
Methane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0594
H2S	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0993
CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,2311
Carbon	0,0000	0,4846	0,3285	0,0000
NO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cenizas*	0,0000	0,0068	0,6715	0,0000

Delete OK Ignored

Con la condición 4 el reactor operara a una temperatura de 4368 °C, a una presión de 0.12 Kpa y la potencia requerida para alcanzar esa condición será de 20 kw.

- **Condición 5:** Se especifican las corrientes de entrada y la potencia en el arco eléctrico



Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet

Name	AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Vapour	1,0000	0,5075	0,0000	1,0000
Temperature [C]	3000	1000	5060	5060
Pressure [kPa]	900,0	65,98	0,1222	0,1222
Molar Flow [kgmole/h]	5,370e-002	8,192e-002	8,325e-004	0,1011
Mass Flow [kg/h]	1,544	1,000	0,1151	2,429
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,782e-003	5,473e-002	5,324e-002	3,707e-003
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	1,017e+005	2,960e+004	2,867e+006	1,656e+006
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	213,9	147,5	4845	664,5
Heat Flow [kJ/h]	5460	2425	2387	1,675e+005

Delete OK Ignored

Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet

	AIRE	RESIDUOS SOLIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
S_Rhombic	0,0000	0,0011	0,0000	0,0000
Hydrogen	0,0000	0,3742	0,0000	0,1871
Oxygen	0,2100	0,1254	0,0000	0,0000
Nitrogen	0,7800	0,0078	0,0000	0,4205
H2O	0,0100	0,0000	0,0000	0,0017
Methane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0594
H2S	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0993
CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,2311
Carbon	0,0000	0,4846	0,3285	0,0000
NO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cenizas*	0,0000	0,0068	0,6715	0,0000

Delete OK Ignored

Con la condición 5 el reactor operará a una temperatura de 5060 °C, a una presión de 0.12 Kpa y la potencia requerida para alcanzar esa condición será de 45 kW.

Se hicieron 5 simulaciones en el reactor donde las variables de operación necesarias y claves para el funcionamiento son: Temperatura, Potencia, y Presión.

Estas variables son las que determinaran el buen funcionamiento del prototipo.

En la simulación también se determinó la composición del gas de síntesis a la salida del reactor, por lo tanto, compararemos estos resultados con la composición teórica del gas sintético planteado en la tabla 25.

En las 5 simulaciones realizadas se puede observar que la composición del gas de síntesis no varía, por lo que se deberá elegir las condiciones de operación de una de las simulaciones para poder aplicarlo en el prototipo.

6.2.1.2.8. Comparación de datos teóricos con la simulación

Los datos teóricos que se plantearon durante toda la simulación fueron los flujos de alimentación y estos se mantuvieron constantes durante todo el proceso.

- Flujo de alimentación de RSU: $F^1 = 1 \text{ kg/h}$

F^1	(% peso base seca)
C	47.68
H	6.18
O	32.88
N	1.8
S	0.28
Cenizas	11.18

- Flujo de alimentación de aire: $\dot{m} = 1.5438 \text{ kg/h}$

N^2	% PESO
O_2	21 %
N_2	78 %
H_2O	1 %

Con estos datos se dio comienzo a la simulación para determinar las condiciones de operación, y dieron como resultado.

Tabla 26: Datos obtenidos de la simulación

	CONDICIONES DE OPERACIÓN			FLUJOS DE SALIDA	
	Temperatura (°C)	Potencia (Kw)	Presión (Kpa)	Gas sintético (Kg/h)	Escoria (kg/h)
Simulación 1	2433	1	0.12	2.429	0.1151
Simulación 2	3651	8	0.12	2.429	0.1151
Simulación 3	4159	15	0.12	2.429	0.1151
Simulación 4	4368	20	0.12	2.429	0.1151
Simulación 5	5060	45	0.12	2.429	0.1151

Fuente: Elaboración propia

En las simulaciones se pueden observar que la temperatura de operación depende directamente de la potencia suministrada al arco eléctrico que es el encargado de generar el estado plasma y así el reactor adquirirá una temperatura de operación óptima.

La presión y los flujos de salida se mantienen constantes durante las 5 simulaciones realizadas.

En cuanto al balance de materia en la simulación se puede observar lo siguiente:

$$F^1 + F^2 = F^3 + F^4$$

$$1 \frac{kg}{h} + 1.5438 \frac{kg}{h} = 0.1151 \frac{kg}{h} + 2.429 \frac{kg}{h}$$

$$2.5438 \text{ kg/h} = 2.538 \text{ kg/h}$$

$$2.54 = 2.54$$

El balance de materia muestra que los flujos de entrada son igual a la salida, lo que indica que la simulación no tuvo errores y es confiable para elegir una de las variables de operación y hacer funcionar el prototipo.

Otro parámetro que se utilizó para la simulación fue la composición teórica del gas de síntesis, esto está relacionado directamente con la temperatura de operación y la potencia suministrada en el arco eléctrico.

Por lo tanto, haremos una comparación para ver como resultado la simulación en cuanto a la composición del gas de síntesis obtenido.

- Composición teórica del gas de síntesis

Gas	% en volumen
Hidrogeno (H_2)	11
Monóxido de carbono (CO)	24
Dióxido de carbono (CO_2)	9
Metano (CH_4)	3
Nitrógeno (N_2)	53

- Composición del gas de síntesis obtenida en la simulación

Gas	% en volumen
Hidrogeno (H_2)	18.71
Monóxido de carbono (CO)	23.11
Dióxido de carbono (CO_2)	9.93
Metano (CH_4)	5.94
Nitrógeno (N_2)	42.05
Agua (H_2O)	0.17
Sulfuro de hidrogeno (H_2S)	0.09
Óxidos de nitrógeno NOx	0.00

Se puede concluir que la composición del gas de síntesis obtenido en la simulación se acerca a la composición teórica, estas composiciones del gas en las cinco simulaciones se mantuvieron constantes por que los reactivos alcanzaron su conversión máxima y por eso a partir de la segunda simulación ya no varía la composición de salida del gas sintético.

Al comparar con la composición teórica aparecen 3 componentes más, uno de ellos es el NOx que no aparece en la composición, pero si se lo introdujo como una reacción que pudiera ocurrir, pero no se formó NOx debido a que las altas temperaturas del plasma no permiten que ocurra la reacción.

Una vez que ya se sabe la composición del gas de síntesis que se va obtener se puede decir que la simulación es confiable y se podrá elegir una de las variables de operación.

Con respecto al sulfuro de hidrogeno y dióxido de carbono, se tendrá que proceder a una limpieza y lavado del gas por que estos compuestos pueden ser contaminantes.

6.2.1.3. Variables de operación determinadas

En las simulaciones se tomaron en cuenta variables de operación para el reactor de conversión, por que esta unidad es el corazón del proceso y se determinaron cinco condiciones, de los cuales se elige la primera condición para operar en el prototipo.

La primera simulación es la que más se adapta para el funcionamiento del prototipo por que esta condición es más viable para aplicar en un gasificador por plasma. Además se decide elegir esta condición por que ya con esta temperatura la composición del gas sintético se acerca a la composición teórica del mismo gas.

- Variables de operación según la primera simulación para aplicar en el prototipo de gasificación por plasma:
 - Variables de alimentación de materia prima y aire.

Variables de operación			
Material Stream	Temperatura (°C)	Presión (KPa)	Fulgo de alimentación (kg/h)
RSU	100	65.98	1
Aire	800	800	1.5438

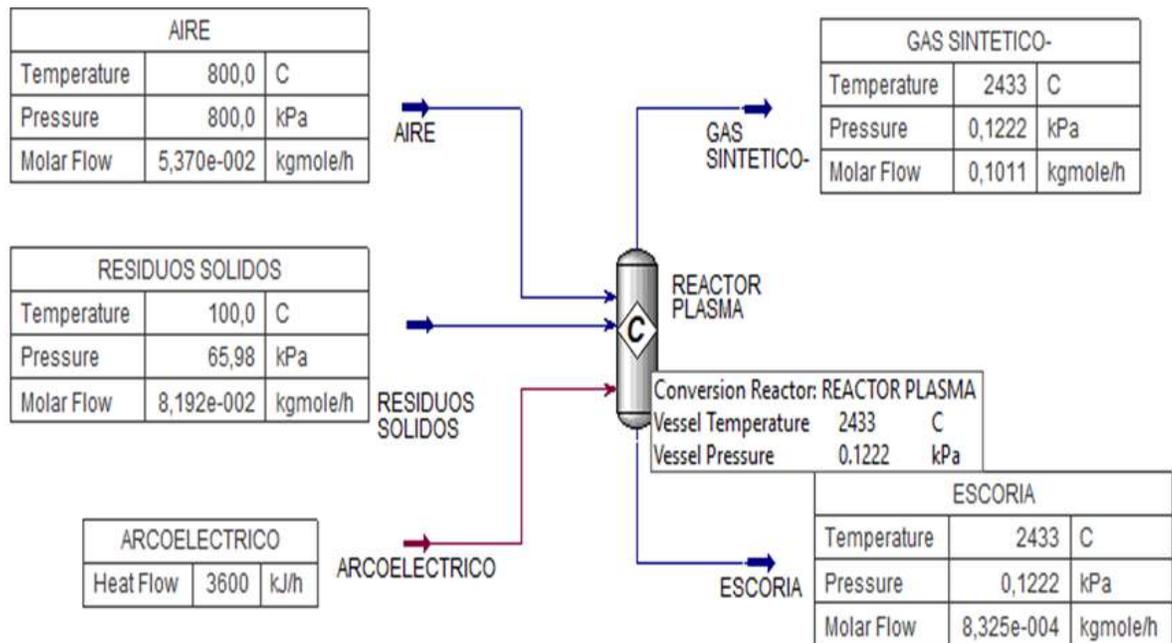
- Condiciones de operación en el reactor

Condiciones de operación			
	Temperatura (°C)	Potencia arco eléctrico (Kw)	Presión (KPa)
Reactor	2433	1 kw = 3600 kj/h	0.1222

Las condiciones de operación se determinaron en base a la primera simulación realizada, por que las condiciones a alcanzar dentro del reactor son accesibles.

Teóricamente el estado plasma ioniza el gas y alcanza temperaturas superiores a los 1300 °C de forma brusca, con la primera simulación se cumple correctamente con este

parametro teorico y por, lo tanto utilizaremos estas condiciones para todo el proceso, incluyendo el funcionamiento del prototipo.



Es la simulacion junto a sus variables de operacion tanto del reactor como los flujos de alimentacion y salida.

6.2.2. Simulacion del proceso completo

La simulacion completa del proceso se llevara a cabo con las variables y condiciones de operacion ya determinadas para el reactor, por que este es considerado el corazon del proceso.

La simulacion comienza con la seleccion de los componentes que intervienen en todo el proceso, prosigue con la seleccion del paquete de fluido, con la adiccion de las reacciones quimicas y las especificaciones correspondientes tanto de los flujos de entrada como del reactor

El proceso comienza con el suministro de aire comprimido hacia el arco electrico y el flujo de calor creado calienta el reactor de manera gradual proximos a los 600 °C, luego

es alimentado la materia prima RSU cuando el reactor junto con las torchas de plasma haya alcanzado a temperatura de operacion y este es transformado en gas de sintesis.

El gas de sintesis obtenido pasa a un cambiador de calor para bajar la temperatura del gas, y este pasa a un sistema de lavado de gases, mediante un sistema de succion el gas limpio es comprimido.

6.2.2.1. Introduccion de las condiciones de operaci3n

Conversion Reactor: REACTOR PLASMA - Set-1

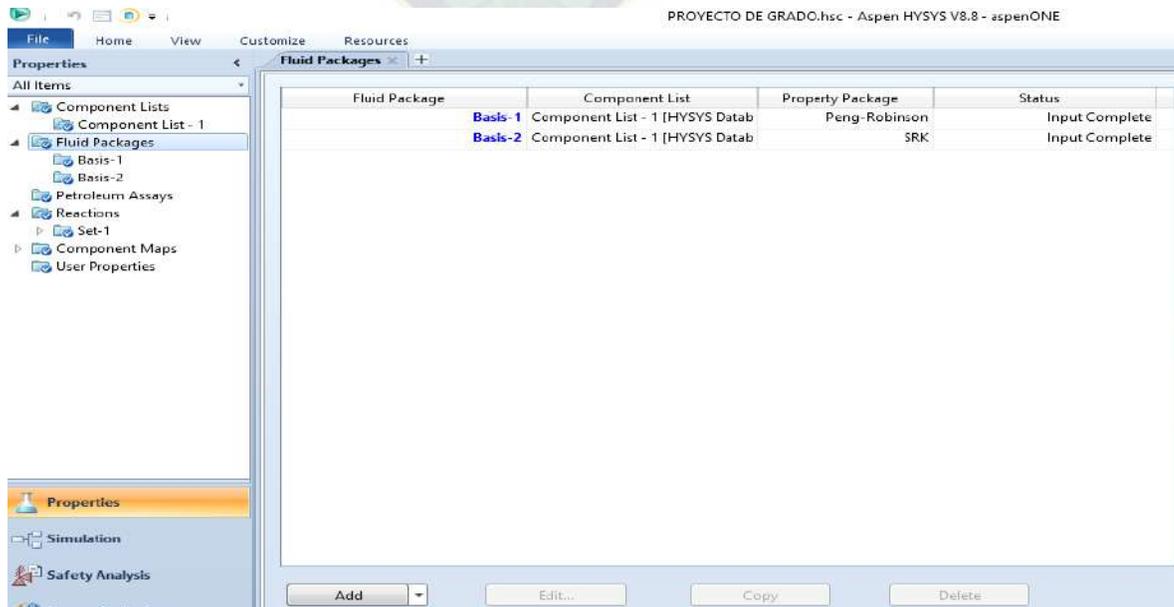
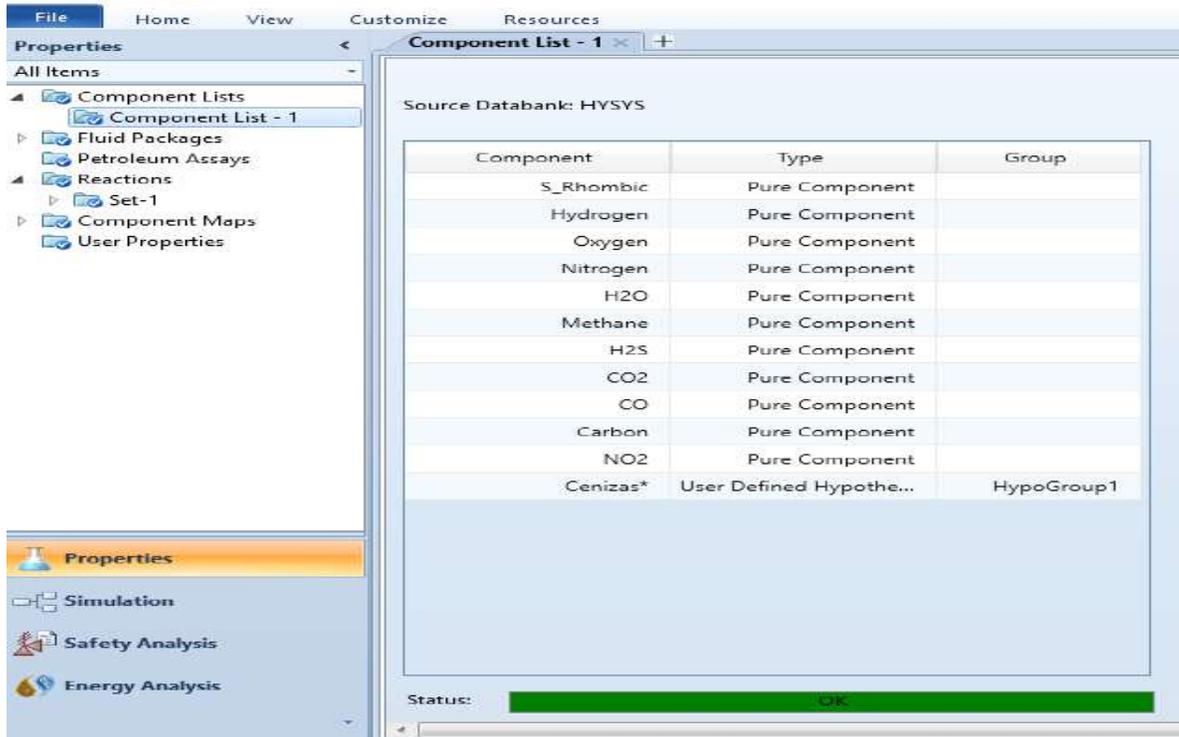
Design Reactions Rating Worksheet Dynamics

Worksheet	Name	RESIDUOS SOLIDOS	AIRE COMPRIMIDO	ESCORIA	GAS SINTETICO-
Conditions	Vapour	0,5075	1,0000	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	100,0	800,0	2433	2433
Composition	Pressure [kPa]	65,98	800,0	0,1222	0,1222
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	8,192e-002	5,370e-002	8,325e-004	0,1011
	Mass Flow [kg/h]	1,000	1,544	0,1151	2,429
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	5,473e-002	1,782e-003	5,324e-002	3,707e-003
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	2182	2,198e+004	1,368e+006	3,777e+004
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	110,9	174,9	4458	304,2
	Heat Flow [kJ/h]	178,8	1180	1139	3820

Delete OK Ignored

6.2.2.2. Selección de componentes y paquete de fluido

Se seleccionaran todos los componentes que participan en las reacciones químicas.



6.2.2.3. Adcion de las reacciones quimicas

Se adicionaron las 10 reacciones quimicas que involucra el proceso de conversion de los residuos solidos urbanos.

Reaction Set: Set-1

Set Info

Set Type: Conversion

Ready

Independent

Add to FP

Detach from FP

Ranking...

Advanced...

Active Reactions	Type	Configured	Operations Attached
Rxn-1	Conversion	✓	REACTOR PLASMA
Rxn-2	Conversion	✓	
Rxn-3	Conversion	✓	
Rxn-4	Conversion	✓	
Rxn-5	Conversion	✓	
Rxn-6	Conversion	✓	
Rxn-7	Conversion	✓	
Rxn-8	Conversion	✓	
Rxn-9	Conversion	✓	
Rxn-10	Conversion	✓	

Add Reaction

Delete Reaction

Copy Reaction

Conversion Reaction: Rxn-1

Set Info

Set Type: Conversion

	Mole Weight	Stoich Coeff
Carbon	12,011	-1,000
Oxygen	32,000	-0,500
CO	28,011	1,000
Comp**		

Basis

Base Component	Value
Carbon	10,00
Rxn Phase	Overall
Co	10,00
C1	<empty>
C2	<empty>

Conversion (%) = Co + C1*T + C2*T^2

[T in Kelvin]

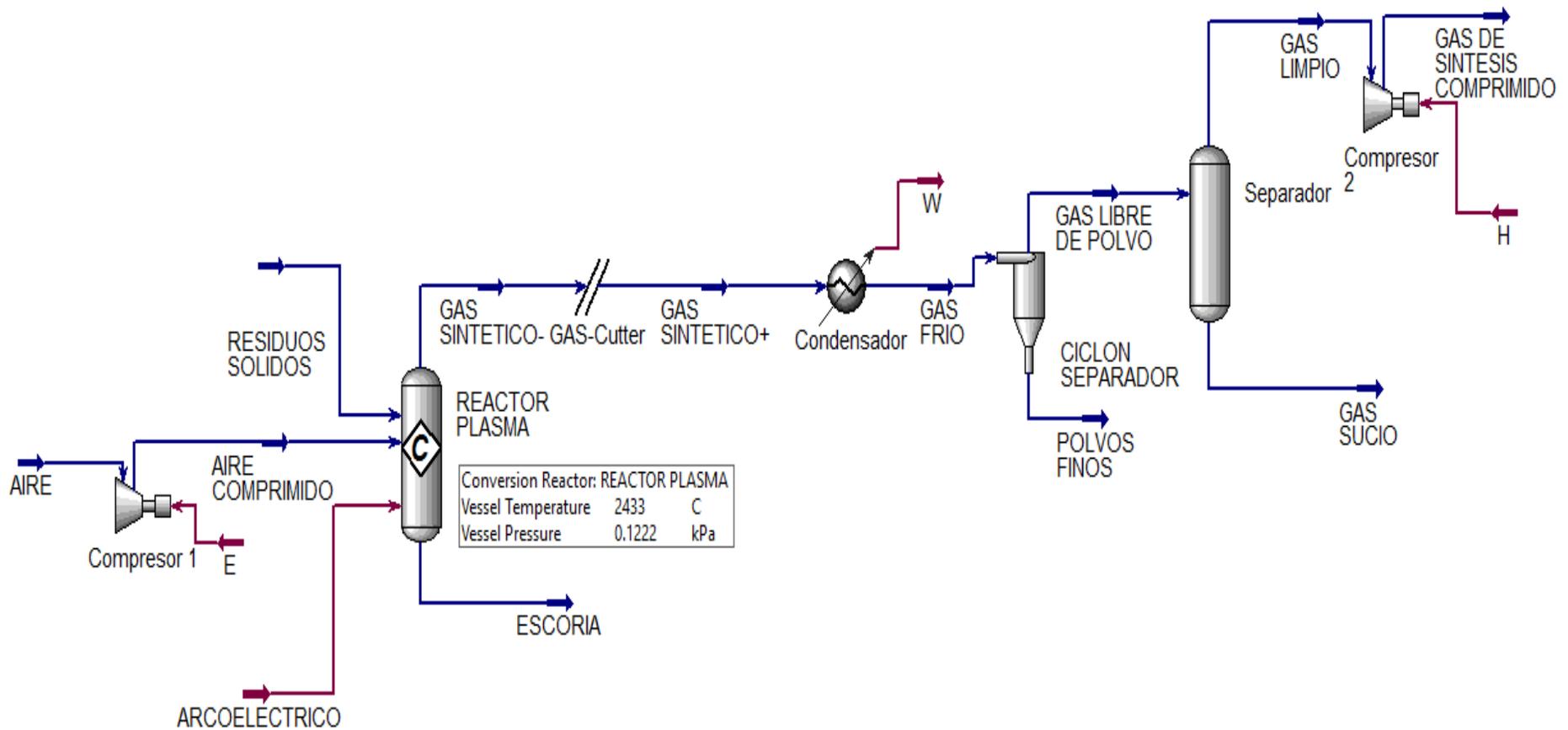
Balance Error: 0,00000

Reaction Heat (25 C): -1,1e+05 kJ/kgmole

Ready

6.2.2.4. Diagrama de Simulación

Con las condiciones de operación y las reacciones químicas ya introducidas al simulador se procede a armar el proceso y obtener resultados.



Material Streams

		RESIDUOS SOLIDOS	AIRE	GAS SINTETICO+	ESCORIA	GAS SINTETICO-	GAS FRIO	GAS LIMPIO	GAS SUCIO	AIRE COMPRIMIDO	GAS LIBRE DE POLVO	POLVOS FINOS	GAS DE SINTESIS COMPRIMIDO
Vapour Fraction		0,5075	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000
Temperature	C	100,0	15,00	2433	2433	2433	25,00	25,00	25,00	800,0	25,00	25,00	72,67
Pressure	kPa	65,98	12,78	65,99	0,1222	0,1222	65,99	65,99	65,99	800,0	65,99	65,99	100,0
Molar Flow	kgmole/h	8,192e-002	5,370e-002	0,1011	8,325e-004	0,1011	0,1011	0,1011	7,987e-007	5,370e-002	0,1011	2,123e-007	0,1011
Mass Flow	kg/h	1,000	1,544	2,428	0,1151	2,429	2,428	2,428	1,597e-004	1,544	2,428	4,246e-005	2,428
Liquid Volume Flow	m3/h	5,473e-002	1,782e-003	3,802e-003	5,324e-002	3,707e-003	3,802e-003	3,706e-003	7,607e-005	1,782e-003	3,782e-003	2,022e-005	3,706e-003
Heat Flow	kJ/h	178,8	-145,6	3823	1139	3820	-7031	-7031	0,0000	1180	-7031	0,0000	-6884



Compositions

	RESIDUOS SOLIDOS	AIRE	GAS SINTETICO+	ESCORIA	GAS SINTETICO-	GAS FRIO	GAS LIMPIO	GAS SUCIO	AIRE COMPRIMIDO	GAS LIBRE DE POLVO	POLVOS FINOS	GAS DE SINTESIS COMPRIMIDO
Comp Mole Frac (S_Rhombic)	0,0011	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Comp Mole Frac (Hydrogen)	0,3742	0,0000	0,1871	0,0000	0,1871	0,1871	0,1871	0,0000	0,0000	0,1871	0,0000	0,1871
Comp Mole Frac (Oxygen)	0,1254	0,2100	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2100	0,0000	0,0000	0,0000
Comp Mole Frac (Nitrogen)	0,0078	0,7800	0,4205	0,0000	0,4205	0,4205	0,4205	0,0000	0,7800	0,4205	0,0000	0,4205
Comp Mole Frac (H2O)	0,0000	0,0100	0,0017	0,0000	0,0017	0,0017	0,0017	0,0000	0,0100	0,0017	0,0000	0,0017
Comp Mole Frac (Methane)	0,0000	0,0000	0,0594	0,0000	0,0594	0,0594	0,0594	0,0000	0,0000	0,0594	0,0000	0,0594
Comp Mole Frac (H2S)	0,0000	0,0000	0,0009	0,0000	0,0009	0,0009	0,0009	0,0000	0,0000	0,0009	0,0000	0,0009
Comp Mole Frac (CO2)	0,0000	0,0000	0,0992	0,0000	0,0993	0,0993	0,0993	0,0000	0,0000	0,0993	0,0000	0,0993
Comp Mole Frac (CO)	0,0000	0,0000	0,2311	0,0000	0,2311	0,2311	0,2311	0,0000	0,0000	0,2311	0,0000	0,2311
Comp Mole Frac (Carbon)	0,4846	0,0000	0,0000	0,3285	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Comp Mole Frac (NO2)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Comp Mole Frac (Cenizas*)	0,0068	0,0000	0,0001	0,6715	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000

6.2.2.4.1. Balance de Materia en la simulacion

6.2.2.4.1.1. Balace en el Reactor

El balance de materia que según la simulacion resulto lo siguiente:

Worksheet	Name	RESIDUOS SOLIDOS	AIRE COMPRIMID	ESCORIA	GAS SINTETICO
Conditions	Vapour	0,5075	1,0000	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	100,0	800,0	2433	2433
Composition	Pressure [kPa]	65,98	800,0	0,1222	0,1222
PF Specs	Molar Flow [kgmole/h]	8,192e-002	5,370e-002	8,325e-004	0,1011
	Mass Flow [kg/h]	1,000	1,544	0,1151	2,429
	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	5,473e-002	1,782e-003	5,324e-002	3,707e-003
	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	2182	2,198e+004	1,368e+006	3,777e+004
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	110,9	174,9	4458	304,2
	Heat Flow [kJ/h]	178,8	1180	1139	3820

Residuos Solidos + Aire Comprimido = Escoria + Gas Sintetico

$$1 \frac{kg}{h} + 1.5438 \frac{kg}{h} = 0.1151 \frac{kg}{h} + 2.429 \frac{kg}{h}$$

$$2.5438 \text{ kg/h} = 2.538 \text{ kg/h}$$

$$2.54 = 2.54$$

6.2.2.4.1.2. Balance en el proceso

Flujos de entrada = Flujos de salida

AIRE+RESIDUOS SOLIDOS = ESCORIA + POLVOS FINOS + GAS SUCIO + GAS DE SINTESIS COMPRIMIDO

$$1.544 \text{ Kg/h} + 1.000 \text{ Kg/h} = 0.1151 \text{ Kg/h} + 0.00004246 \text{ Kg/h} + 0.0001597 \text{ Kg/h} + 2.428 \text{ Kg/h}$$

$$2.5440 \text{ Kg/h} = 2.5443 \text{ Kg/h}$$

6.2.2.4.2. Composición del gas de síntesis en la simulación

6.2.2.4.2.1. Composición del gas a la salida del reactor

	RESIDUOS SOLIDC	AIRE COMPRIMIDC	ESCORIA	GAS SINTETICO-
S_Rhombic	0,0011	0,0000	0,0000	0,0000
Hydrogen	0,3742	0,0000	0,0000	0,1871
Oxygen	0,1254	0,2100	0,0000	0,0000
Nitrogen	0,0078	0,7800	0,0000	0,4205
H2O	0,0000	0,0100	0,0000	0,0017
Methane	0,0000	0,0000	0,0000	0,0594
H2S	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
CO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0993
CO	0,0000	0,0000	0,0000	0,2311
Carbon	0,4846	0,0000	0,3285	0,0000
NO2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cenizas*	0,0068	0,0000	0,6715	0,0000

6.2.2.4.2.2. Composición del gas al final del proceso

Material Stream: GAS DE SINTESIS COMPRIMIDO		
Worksheet Attachments Dynamics		
Worksheet		Mole Fractions
Conditions	S_Rhombic	0.0000
Properties	Hydrogen	0.1871
Composition	Oxygen	0.0000
Oil & Gas Feed	Nitrogen	0.4214
Petroleum Assay	H2O	0.0017
K Value	Methane	0.0594
User Variables	H2S	0.0000
Notes	CO2	0.0993
Cost Parameters	CO	0.2311
Normalized Yields	Carbon	0.0000
	NO2	0.0000
	Cenizas*	0.0000

La composición del gas de síntesis obtenida en la simulación no varía en gran magnitud respecto a la composición teórica del gas de síntesis.

Comparación del gas de síntesis teórica con la simulación		
Componentes	Composición	
	Teórico (% volumen)	Simulación (% volumen)
Hidrogeno (H_2)	11	18.71
Monóxido de carbono (CO)	24	23.11
Nitrógeno (N_2)	53	42.14
Metano (CH_4)	3	5.94
Agua (H_2O)	0	0.17
Dióxido de carbono (CO_2)	9	9.93

Como se puede observar en la tabla, la composición del gas de síntesis obtenida en la simulación se acerca a la composición teórica, por lo tanto, las variables de operación con las que se hizo la simulación pueden ser aplicadas para el funcionamiento del prototipo.

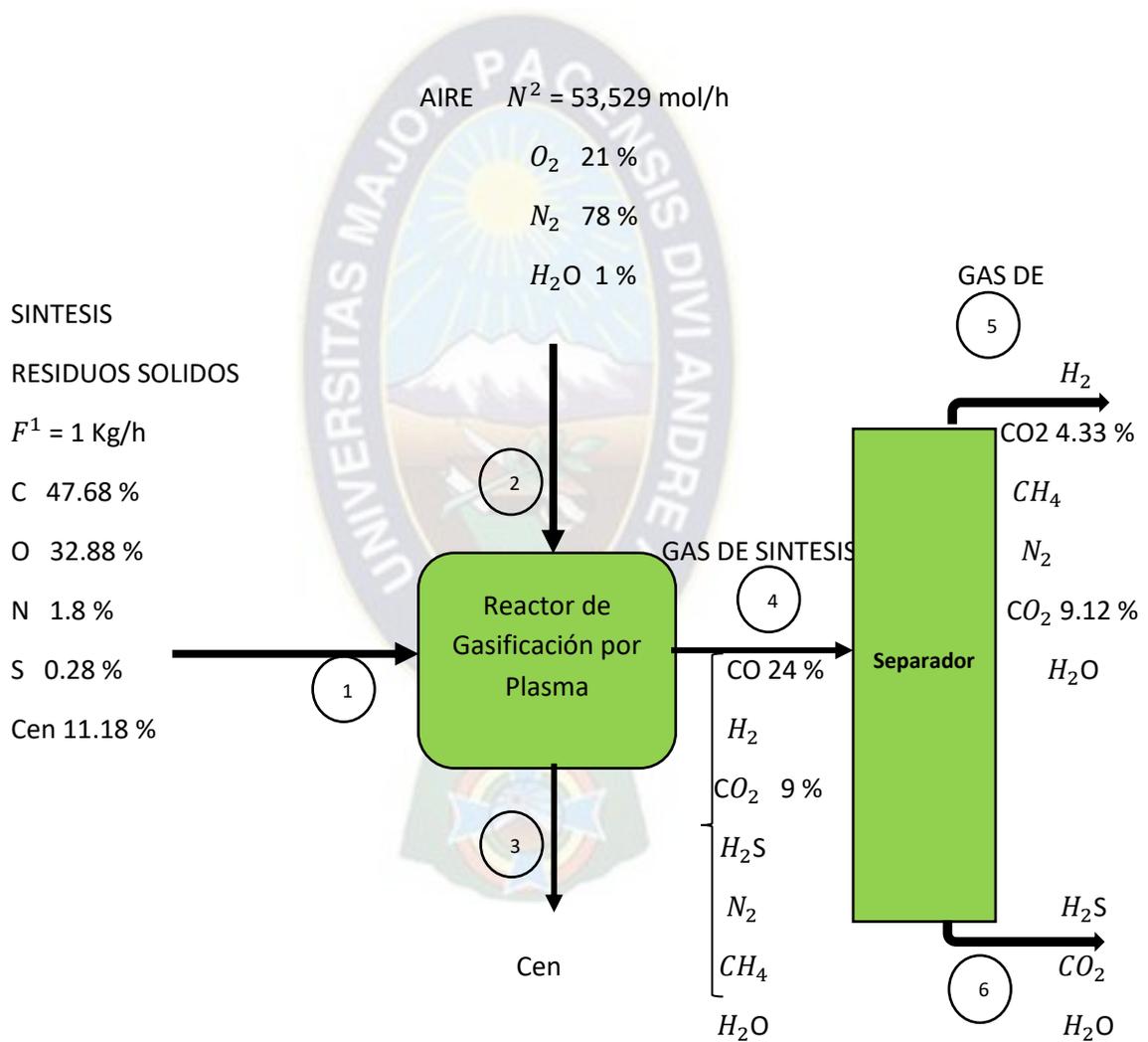
6.3. Simulación del proceso por balance de materia con reacción química

Una vez determinadas las variables de operación para convertir los residuos sólidos urbanos en gas de síntesis, se procedió a la simulación del proceso.

En este punto realizaremos otra simulación por balance de materia por componentes con reacción química, donde determinaremos la composición del gas de síntesis que se podrá obtener en dicho proceso.

Los Residuos sólidos urbanos se alimentan al reactor a una velocidad de flujo de 1 kg/h, por otro lado, se alimenta aire mediante un compresor a una velocidad de flujo de 1.5438 kg/h = mol/h, la operación en el reactor se llevará a cabo cuando este alcance la temperatura de operación de 2433 °C, con una potencia suministrada en el arco eléctrico de 1 KW = 3600 KJ/h.

6.3.1. Diagrama de balance



BALANCE DE MATERIA CON REACCION QUIMICA EN EL REACTOR

MATRIZ ATOMICA (REACTOR)

5 Ecuaciones de Balance

	H_2	O_2	CH_4	N_2	H_2S	CO	CO_2	H_2O
H	2	0	4	0	2	0	0	2
O	0	2	0	0	0	1	2	1
C	0	0	1	0	0	1	1	0
N	0	0	0	2	0	0	0	0
S	0	0	0	0	1	0	0	0

Reactor correctamente Especificado

	Reactor	Separador	
# Var. Corriente	+ 16	+16	
# Ec. Balance	- 5	-7	
# Comp. Esp.	- 8	-2	
# Flujos Esp.	-2	----	
Rel. Ad.	-1	----	
	0	+7	

FLUJOS NETOS DE SALIDA

$$C: 0 - \frac{0,4768 \cdot 1000}{12} = -39.73$$

$$H: 0 - \frac{0,0618 \cdot 1000}{1} = -61.8$$

$$O: 0 - \frac{0,3288 \cdot 1000}{16} = -20.55$$

$$S: 0 - \frac{0,0028 \cdot 1000}{32} = -0.0875$$

$$N: 0 - \frac{0,018 \cdot 1000}{14} = -1.2857$$

$$CO: 0,24 N^4 - 0$$

$$H_2: N_{H_2}^4 - 0$$

$$H_2S: N_{H_2S}^4 - 0$$

$$CH_4: N_{CH_4}^4 - 0$$

$$N_2: N_{N_2}^4 - 41.7526$$

$$O_2: 0 - 11.2410$$

$$H_2O: N_{H_2O}^4 - 0.5353 = N_{H_2O}^4 - 0.5353$$

ECUACIONES DE BALANCE

$$H: 2 N_{H_2}^4 + 4 N_{CH_4}^4 + 2 N_{H_2S}^4 + 2(N_{H_2O}^4 - 0.5353) - 61.8 = 0 \dots\dots\dots 1$$

$$O: 2(- 11.2410) + 0,24 N^4 + 2(0,09 N^4) + (N_{H_2O}^4 - 0.5353) - 20.55 = 0 \dots\dots\dots 2$$

$$C: N_{CH_4}^4 + 0,24 N^4 + 0,09 N^4 - 39.73 = 0 \dots\dots\dots 3$$

$$N: 2(N_{N_2}^4 - 41.7526) - 1.2857 = 0 \dots\dots\dots 4$$

$$S: N_{H_2S}^4 - 0.0875 = 0 \dots\dots\dots 5$$

$$Cen: F^3 - 0.1118 = 0 \dots\dots\dots 6$$

ECUACION DE RECURRENCIA

$$N^4 = 0,24 N^4 + 0,09 N^4 + N_{H_2S}^4 + N_{N_2}^4 + N_{CH_4}^4 + N_{H_2}^4 + N_{H_2O}^4 \dots\dots\dots 7$$

DETERMINACION DE FLUJOS DE SALIDA

De 4:

$$N_{N_2}^4 = 42.3954 \frac{mol}{h}$$

De 5:

$$N_{H_2S}^4 = 0.0875 \frac{mol}{h}$$

De 6:

$$F^3 = 0.1118 \frac{Kg}{h}$$

$$\text{De 1:} \quad 2 N_{H_2}^4 + 4 N_{CH_4}^4 + 2 N_{H_2O}^4 = 62.8706$$

$$\text{De 2:} \quad 0.42 N^4 + \quad \quad \quad + N_{H_2O}^4 = 43.5673$$

$$\text{De 3:} \quad 0.33 N^4 + \quad \quad \quad + N_{CH_4}^4 = 39.7300$$

$$\text{De 7:} \quad -0.67 N^4 + N_{H_2}^4 + N_{CH_4}^4 + N_{H_2O}^4 = - 42.4729$$

} 4 ecuaciones con 4 incógnitas

RESOLUCION

FLUJOS DE SALIDA

$N^4 = 100.5241 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$
$N_{H_2O}^4 = 1.3472 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$
$N_{CO}^4 = 24.1257 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$

$N_{H_2}^4 = 16.9749 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$
$N_{H_2S}^4 = 0.0875 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$
$N_{CO_2}^4 = 9.0472 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$

$N_{CH_4}^4 = 6.5570 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$
$N_{N_2}^4 = 42.3954 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$
$F^3 = 0.1118 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$

6.3.2. Balance de Materia con reacción química en el reactor

$$F^1 + F^2 = F^3 + F^4$$

$$1 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 1.5438 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0.1118 \frac{\text{kg}}{\text{h}} + 2.4347 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$2.5438 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 2.5463 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

6.3.3. Composición del gas de síntesis a las salidas del reactor

COMPOSICIONES DE SALIDA EN BASE SECA A LA SALIDA DEL REACTOR

$$N_{GasSeco}^4 = 99.1769 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$CO = 24.33 \%$$

$$N_{H_2O}^4 = 1.3472 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$H_2 = 17.12 \%$$

$$H_2O = 1.34 \%$$

$$CO_2 = 9.12 \%$$

$$H_2S = 0.088 \%$$

$$N_2 = 42.74 \%$$

$$CH_4 = 6.61 \%$$

6.3.4. Balance de materia por componentes en el separador

$$CO: 0.2433 N^5 = 24.1257 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$H_2: N_{H_2}^5 = 16.9749 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$H_2O: N_{H_2O}^5 + N_{H_2O}^6 = 1.3472 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$N_{H_2O}^5 = 0.0638 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$N_{H_2O}^6 = 1.2834 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$CH_4: N_{CH_4}^5 = 6.5570 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$N_2: N_{N_2}^5 = 42.3954 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$CO_2: 0.0912 N^5 + N_{CO_2}^6 = 9.0472 \rightarrow N_{CO_2}^6 = 0.00379 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$H_2S: N_{H_2S}^6 = 0.0875 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$N^6 = 0.0912 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$N^5 = 99.1602 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$N^4 = N^5 + N^6 + N_{H_2O}^6$$

$$100.5241 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 99.1602 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 0.0912 \frac{\text{mol}}{\text{h}} + 1.2834 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$100.5241 \frac{\text{mol}}{\text{h}} = 100.5348 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

6.3.5. Composición del gas de síntesis a la salida del proceso

Gas Limpio (base seca)

$$N^5 = 99.1602 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$CO = 24.33 \%$$

$$H_2 = 17.12 \%$$

$$CO_2 = 9.12 \%$$

$$N_2 = 42.75 \%$$

$$CH_4 = 6.61 \%$$

$$H_2O = 0.06 \% = 0.0638 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

Gas Sucio (base seca)

$$N^6 = 0.0912 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

$$H_2S = 95.94 \%$$

$$CO_2 = 4.16 \%$$

$$N_{H_2O}^6 = 1.2834 \frac{\text{mol}}{\text{h}}$$

6.3.6. Comparación de la composición gas de síntesis

Comparación del gas de síntesis teórica con la simulación			
Componentes	Composición		
	Teórico (% Vol.)	Simulación (% Vol.)	Balance (%Vol.)
Hidrogeno (H_2)	11	18.71	17.2
Monóxido de carbono (CO)	24	23.11	24.33
Nitrógeno (N_2)	53	42.14	42.75
Metano (CH_4)	3	5.94	6.61
Agua (H_2O)	0	0.17	0.06
Dióxido de carbono(CO_2)	9	9.93	9.12

En la tabla se puede observar que la composición del gas de síntesis determinada mediante simulación con software y resolución por balance con reacción no difiere de la composición teórica, es decir que los cálculos realizados en la simulación y en el balance con reacción son confiables.

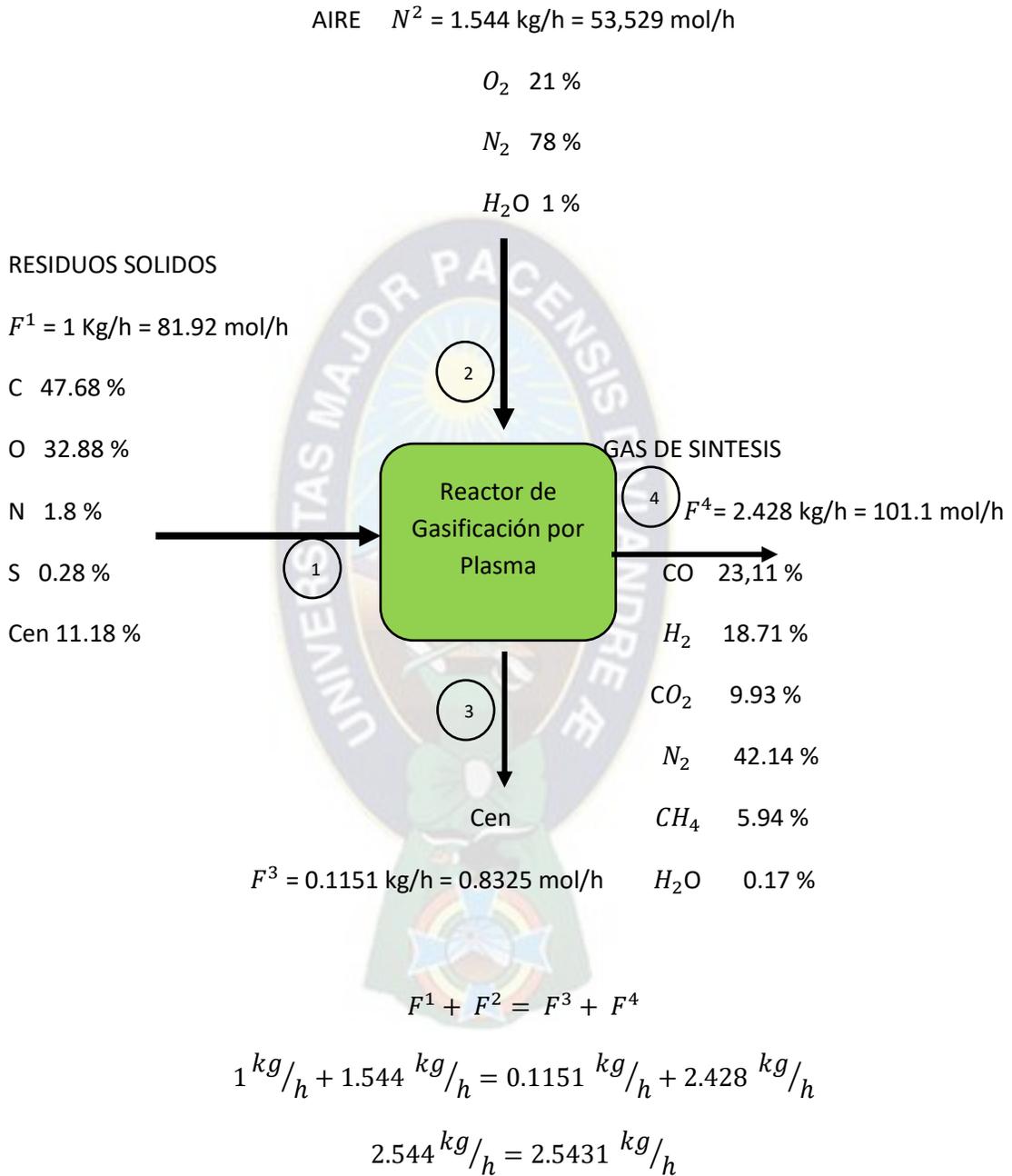
Las condiciones que operación que se utilizaron fueron las mismas para los dos tipos de simulación, por lo que ya se puede aplicar para el funcionamiento del prototipo, porque se tiene la composición del gas sintético como parámetro de referencia.

6.4. Balance de energía

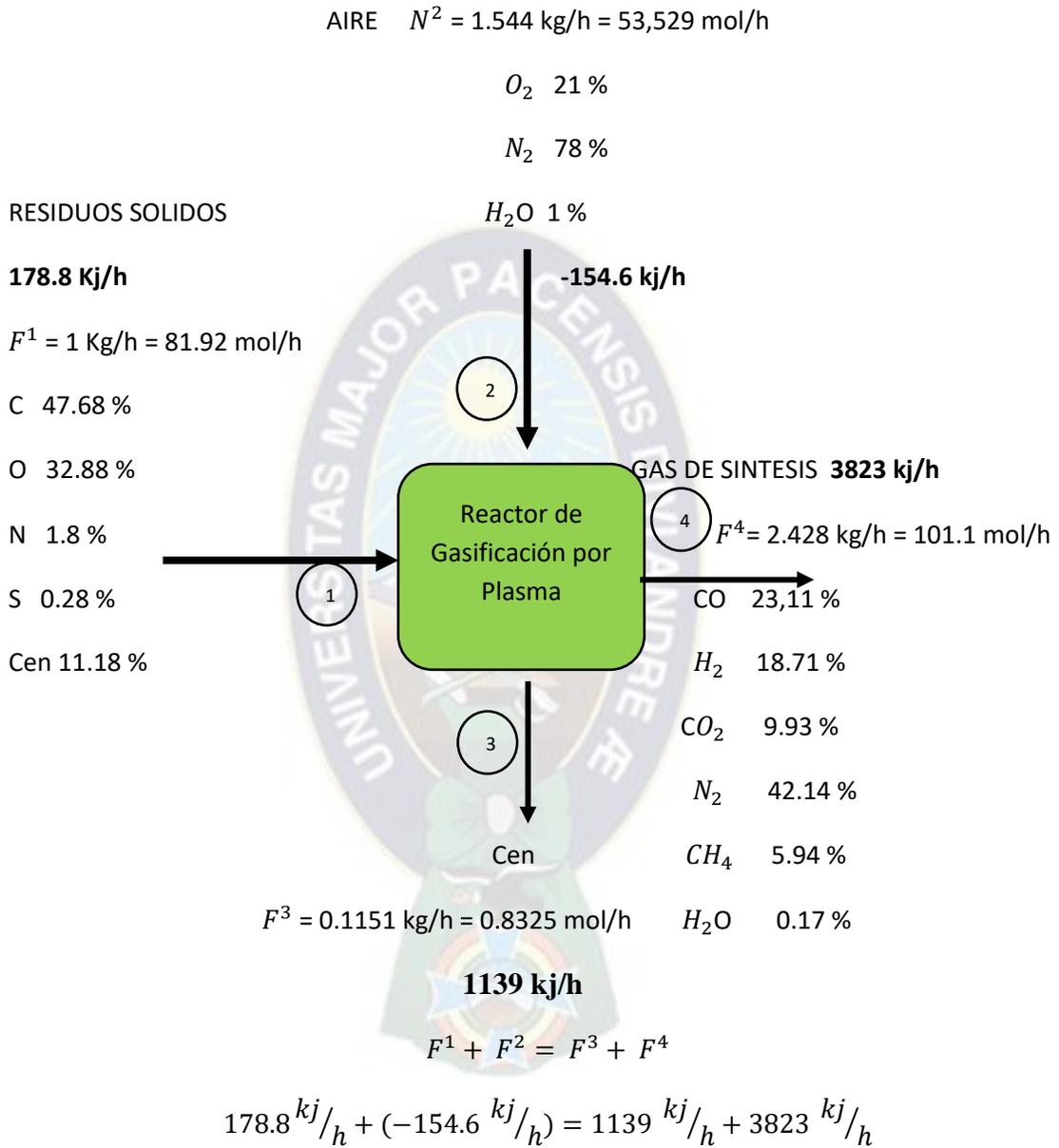
	INPUT	OUTPUT (energía útil)
Compresor de aire	338 kWh	
Arco eléctrico	89 kWh	
Compresor de gas sintético	58 kWh	
Gas de síntesis		6884 kj/h = 1.91 kWh

En el balance de flujo energético la energía útil presente en el gas de síntesis es de 1.91 kWh, este dato se obtuvo de la simulación. Donde el gas de síntesis comprimido es (- 6884 kj/h). Por lo tanto, esto es considerado la energía útil que contiene el gas.

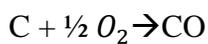
Balance de Materia



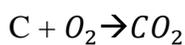
Balance de Energía por simulación



Balance de Energía por entalpías



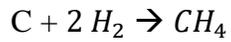
$$\Delta H_{25^\circ C} = -26.5 \text{ kcal/mol}$$



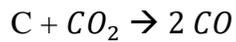
$$\Delta H_{25^\circ C} = -94.5 \text{ kcal/mol}$$



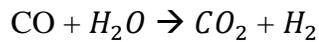
$$\Delta H_{25^\circ C} = 31.5 \text{ kcal/mol}$$



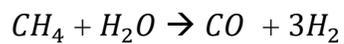
$$\Delta H_{25^\circ C} = -18.0 \text{ kcal/mol}$$



$$\Delta H_{25^\circ C} = 41.4 \text{ kcal/mol}$$



$$\Delta H_{25^\circ C} = -9.8 \text{ kcal/mol}$$



$$\Delta H_{25^\circ C} = 39.6 \text{ kcal/mol}$$

$$\Delta H = \sum n_i H_i \text{ (Salida)} - \sum n_i H_i \text{ (entrada)}$$

n_i : flujo molar componenete

H_i : Entalpia especifica del flujo molar

Componente	Cp [Kj/kg °K]
H_2	14.3193
N_2	1.0404
H_2O	1.8649
CH_4	2.2537
CO_2	0.8464
CO	1.0411
O_2	0.9190
C	0.711

$$\text{Entrada: } \Delta H_{gas} = \Delta H_{formacion} + \int_{25^\circ C}^{100^\circ C} Cp_{gas} dT$$

$$\text{Salida: } \Delta H_{gas} = \Delta H_{formacion} + \int_{25^\circ C}^{800^\circ C} Cp_{gas} dT$$

Sustancia	Com. formación	Entrada		Salida	
		$n_i (\frac{mol}{h})$	$H_i (\frac{kJ}{mol} * kg)$	$n_i (\frac{mol}{h})$	$H_i (\frac{kJ}{mol} * kg)$
C	-----	39,05	53,32	0,83	551
H ₂	---	-----	-----	18,91	11097
N ₂	---	41,8	78,03	42,14	806
H ₂ O	O ₂ , H ₂	0.53	- 101,93	0,1719	1191,2
CH ₄	C, H ₂	-----	-----	6.005	2131,9
O ₂	-----	11.27	68,92	-----	-----
CO ₂	C, O ₂ , H ₂ O	-----	-----	10.039	262,4
CO	C, O ₂ , CH ₄	-----	-----	23,364	565.2
Σ		92.65	98,34	101,45	16604,7

$$\Delta H = \sum n_{i(\text{reactivo limitante})} H_i - \sum n_i H_i$$

$$\Delta H = 0,83 \text{ [mol/h]} * 16604,7 \text{ [kJ/mol*kg]} - 92,65 \text{ [mol/h]} * 98,34 \text{ [kJ/mol*kg]}$$

$$\Delta H = 4670,7 \text{ [kJ/h]*kg}$$

Flujo de energía del gas de síntesis [F⁴]

El Balance de energía se acerca a la simulación con una aproximación del 80 %

BALANCE DE ENERGIA			
SIMULACION		ENTALPIAS	
ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
178 kJ/h	3823 [kJ/h] * kg	178 kJ/h	4670,7 [kJ/h] * kg
% aproximación del flujo de salida		81 %	

Poder Calórico del gas de Síntesis a la salida del reactor

$$PCI = 4670,7 \frac{kJ}{h \text{ kg}} * 1h$$

$$PCI = 4670,7 \frac{kJ}{kg} = 1115,57 \frac{Kcal}{kg}$$

La cantidad de energía desprendida por 1 kg de RSU es equivalente a 1115,57 Kcal/Kg, es la energía que liberaran los RSU sin contar al calor latente de vaporización del agua, porque los cálculos se hicieron en base seca y no se produce cambio de fase.

El poder calorífico inferior del gas natural es 1090,82 Kcal/kg, mientras que del gas de síntesis es 1115,57 kcal/kg. Lo que indica que este gas obtenido a partir de la basura es totalmente combustible.

6.5. Funcionamiento del prototipo

El funcionamiento del prototipo se dará con la sincronización de todas las unidades del proceso de conversión de residuos sólidos urbanos, el proceso está comprendido de 6 etapas y las variables de operación con que se operara será lo que se determinó mediante simulación con aspen Hysys v8.8, como parámetro de medición de funcionamiento del prototipo se utilizara la composición del gas de síntesis determinada en la simulación por software y balance con reacción.

Al final del proceso se medirá la composición del gas de síntesis obtenida mediante el funcionamiento del prototipo de gasificación por plasma y se hará una comparación con los datos de la simulación y los datos teóricos.

6.5.1. Preparado de la materia prima

Los residuos sólidos deben ser triturados para luego ser alimentados al reactor.



6.5.2. Arranque del sistema de plasma

El sistema de plasma es la etapa principal del proceso, el arranque se da con el suministro de aire comprimido para luego generar el plasma dentro del reactor.

Gráfico 102: Arranque del sistema de plasma

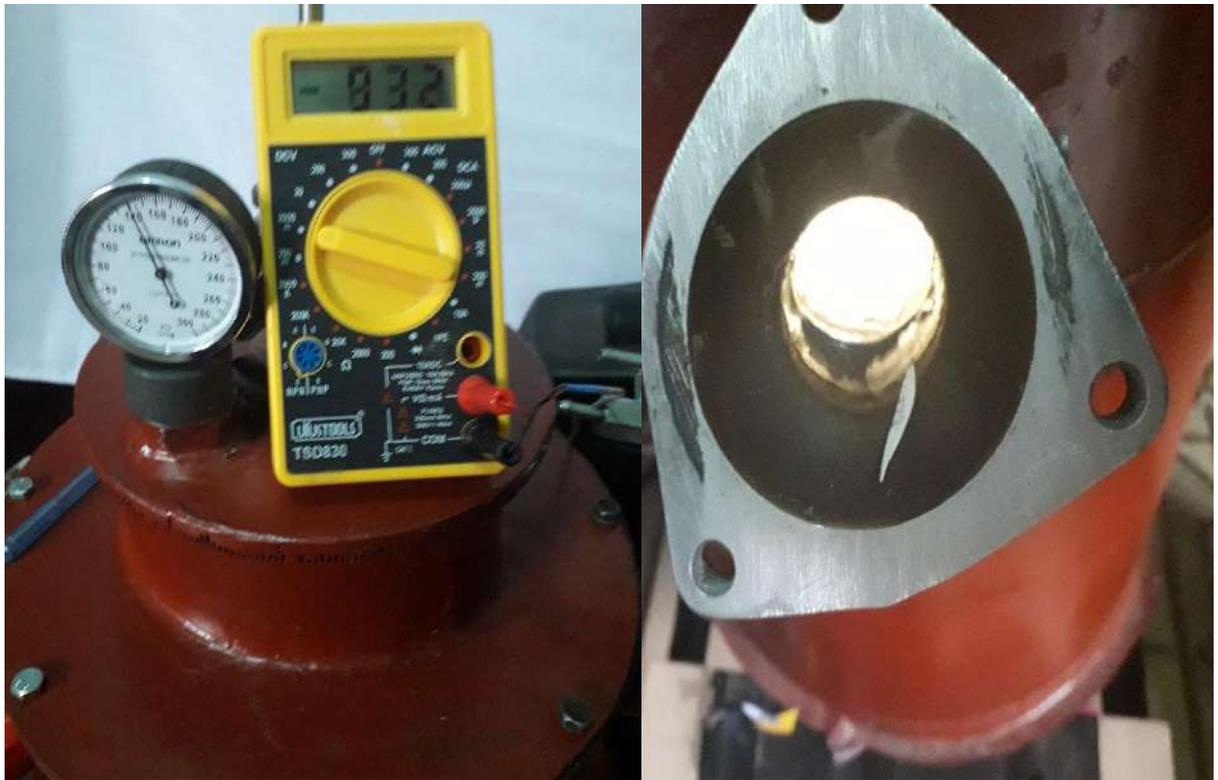


Fuente: foto tomada al momento de la generación de plasma

6.5.3. Funcionamiento del reactor de gasificación

El reactor empieza a funcionar una vez que es activado el sistema de plasma, seguidamente se va alimentando 1 kg de residuos sólidos para que sea procesado, tanto la temperatura como la presión dentro del mismo van incrementando, hasta alcanzar las condiciones de operación.

Gráfico 103: Condiciones del reactor en el momento del arranque



Fuente: foto tomada al momento de iniciar el funcionamiento del prototipo

6.5.4. Funcionamiento del ciclón y el filtro

El filtro y el ciclón ingresan en funcionamiento una vez que se activa la unidad de succión (compresor).

grafico 104: Ciclón y filtro en funcionamiento



Fuente: Foto tomada en el momento del funcionamiento

6.5.5. Funcionamiento del sistema de succión y compresión

Esta unidad entra en funcionamiento una vez transcurrido 20 min después del arranque de la unidad principal, se encarga de succionar el gas de síntesis y comprimirlo en un tanque.

Gráfico 105: Sistema de succión y compresión



Fuente: foto tomada del prototipo

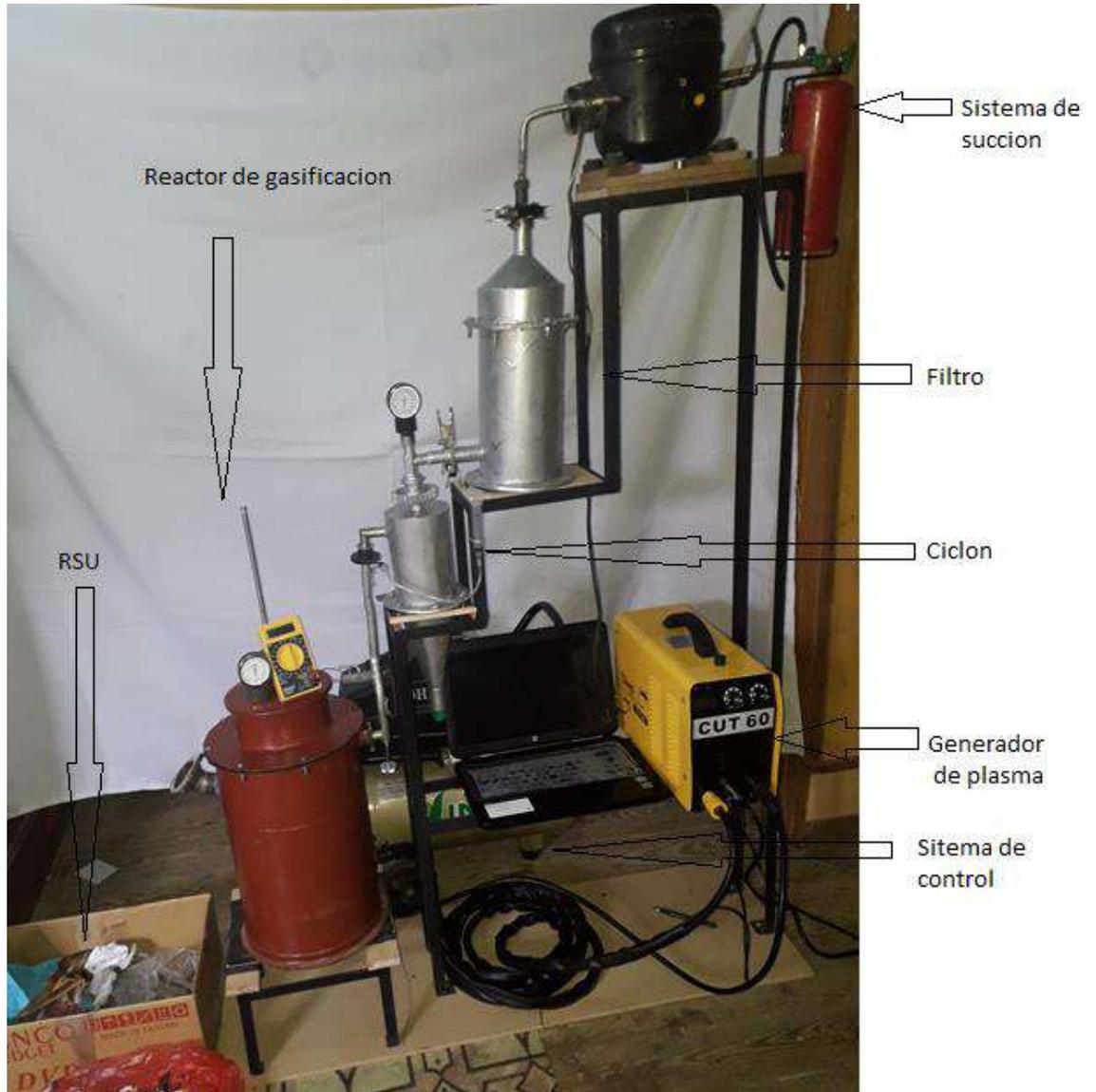
6.5.6. Sistema de control de generación de monóxido de carbono

Gráfico 106: Control de CO



Fuente: foto tomada del prototipo

Grafico 107: Prototipo en funcionamiento



Fuente: foto tomada del prototipo

El funcionamiento del prototipo se da en base a todo lo establecido anteriormente, cumpliendo las condiciones de operación determinadas en la simulación.

La basura procesada fue de 1 kg, se logró convertirlo en gas durante un tiempo de 40 minutos, y la conversión alcanzada fue de 72 % que se midió con el sensor de CO.

Gráfico 108: Prototipo en funcionamiento

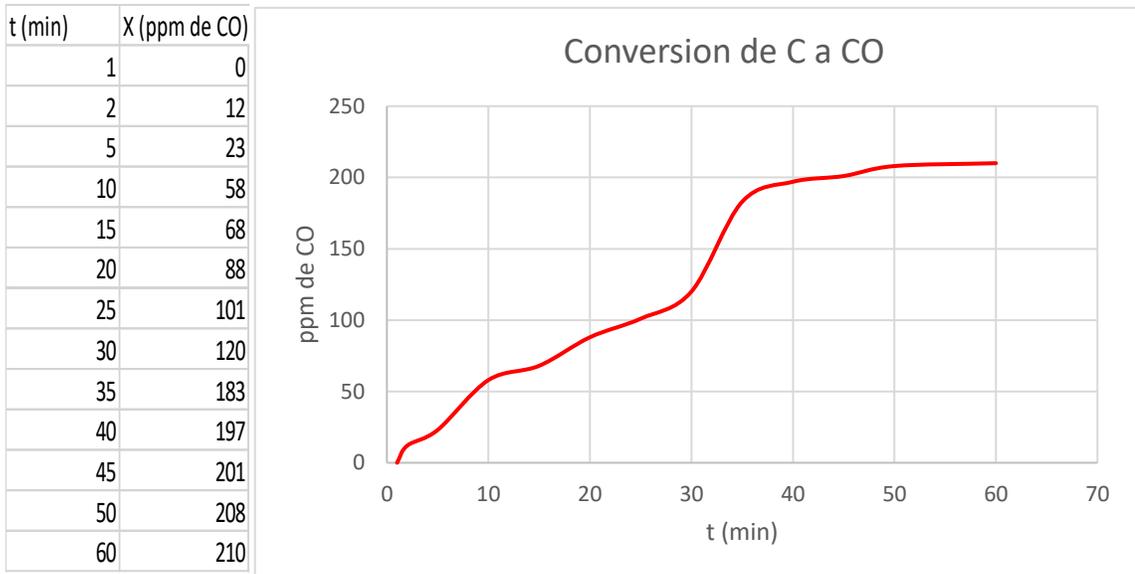


Fuente: foto tomada de prototipo en funcionamiento

6.6. Grado de conversión dentro del reactor

Es la relación entre la cantidad convertida y la cantidad alimentada del mismo, en este caso se toma como base al carbón C y al monóxido de carbono CO.

grafico 109: grado de conversión de C



Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos por el sensor MQ-7

$$X_c = \frac{N_c^1 - N_{CO}^4}{N_c^1}$$

$$X_c = \frac{39.73 \text{ mol/h} - 24.1254 \text{ mol/h}}{39.73 \text{ mol/h}}$$

$$X_c = 0.397 = 40 \%$$

$$X_c = \frac{N_c^1 - N_{CH4}^4}{N_c^1}$$

$$X_c = \frac{39.73 \text{ mol/h} - 6.5570 \text{ mol/h}}{39.73 \text{ mol/h}}$$

$$X_c = 0.834 = 83 \%$$

Grado de conversión del Carbono: $X_c = \frac{0.397+0.834}{2} = 61.5 \%$

6.7. Composición de gas de síntesis al final del proceso

Comparación del gas de síntesis: teórica, simulación y experimental					
Componentes	Composición				
	Teórico (% Vol.)	Simulación (% Vol.)	Balance (%Vol.)	Experimental (% Vol.)	
Hidrogeno (H_2)	11	18.71	17.2	17.2	Determinado por balance
Monóxido de carbono (CO)	24	23.11	24.33	18.3	Determinado con sensor
Nitrógeno (N_2)	53	42.14	42.75	42.75	Determinado por balance
Metano (CH_4)	3	5.94	6.61	9.8	Determinado con sensor
Agua (H_2O)	0	0.17	0.06	0.10	Determinado con sensor
Dióxido de carbono (CO_2)	9	9.93	9.12	11.85	Determinado con sensor

El gas de síntesis obtenido (experimental) tiene una aproximación del 87% a la composición teórica.

6.8. Presencia de contaminantes en el gas de síntesis

El gas de síntesis obtenido debe estar bajo los límites permisibles según la ley 1333, en lo que respecta a los contaminantes peligrosos.

<i>Gas de síntesis</i>	<i>Valor determinado</i>	<i>Límite permisible</i>	<i>Observación</i>
SO_2	0 ug/m ³	80 ug/m ³ – 365 ug/m ³	Componente no encontrado
H_2S	138 ug/m ³	150 ug/m ³	Componente por debajo del límite permisible
CH_4Cl_2	0,8 mg/m ³	1 mg/m ³	Componente por debajo del límite permisible.
Hg	0 ug/m ³	1 ug/m ³	No existe hg en el gas

Partículas suspendidas totales (PST)	92 ug/m ³	75 ug/m ³ – 260 mg/m ³	Parámetro que se encuentra dentro de los límites permisibles
HCHO (COV)	110 ug/m ³	100 ug/m ³	Parámetro por encima del valor permisible, se sugiere hacer otra determinación, debido a que los COV son peligrosos
NO _x	1,2 ug/m ³	150 ug/m ³ – 400 ug/m ³	Parámetro que se encuentra muy por debajo de los límites permisibles.

Los componentes analizados corresponden al gas de síntesis obtenido en el proceso de gasificación por plasma.

En conclusión, se puede indicar que el gas de síntesis está dentro de los límites permisibles en cuanto a la emisión hacia la atmosfera. Los componentes presentes no contaminaran el medio ambiente si se diera su emisión.

En cuanto a la calidad del gas, se puede observar una mayor presencia de CO y de H₂ lo que le da la característica de que sea combustible. Los otros componentes presentes en este gas no afectan en la combustión justamente por los parámetros ya determinados.

6.9.Capacidad real del prototipo

Capacidad teórica diseñada: Todas las unidades del prototipo fueron diseñadas para procesar 1 kg/h de residuos sólidos urbanos.

Capacidad comprobada mediante experimentación: se procesó 1 kg de residuos sólidos urbanos en un tiempo de 40 minutos.

La capacidad de procesamiento del prototipo depende del reactor y del compresor que cumple la función de succionar y comprimir al gas de síntesis.

	Capacidad Teórica	Capacidad Real
Reactor	1 kg/h	1.33 kg/h
Unidades de limpieza del gas	1 kg/h	2.54 kg/h
Compresor	1 kg/h	2.54 kg/h a P=250 PSI Capacidad de generación de gas: $\dot{V} = 2.08 \text{ m}^3/\text{h}$

La capacidad el prototipo fue comprobado mediante experimentación, donde a partir de 1.33 kg de residuos sólidos urbanos se genera 2.08 m³ de gas de síntesis en 1 hora.

Las unidades principales para que esta capacidad sea el adecuado, son el reactor y el compresor, que cumple la función de succionar y comprimir.

6.10. Aplicaciones del gas Síntesis (Syngas)

El gas de síntesis es las diversas mezclas de monóxido de carbono e hidrógeno (CO, H₂) que se emplean para fabricar productos químicos, y generar energía eléctrica.

6.10.1. Usos energéticos

- El gas de síntesis puede emplearse como sucedáneo de los combustibles fósiles en las centrales eléctricas ya existentes, sustituyendo así valiosos recursos, el gas es alimentado a las turbinas de gas o a turbinas de vapor de ciclo combinado.

6.10.2. Usos en la obtención de materias - Síntesis química

Si el gas de síntesis se destina a sintetizar productos químicos.

•Obtención de hidrógeno H₂ Es el elemento más simple y el más generalizado en el universo. Una tonelada de desechos permite obtener aprox. 600 m³ de hidrógeno.

•Producción de metanol CH₃OH La obtención de metanol a partir del gas de síntesis responde a las tecnologías más avanzadas: $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$ Cada tonelada de

basura permite obtener unos 300 kg de metanol. Esta sustancia sirve p.ej. de carburante y es un sustituto de la gasolina, funciona en pilas de combustible y como disolvente de pinturas y barnices.

- Amoniac (NH₃) - Urea (fertilizante) Con los métodos de síntesis modernos se obtiene el amoniaco a partir del hidrógeno y el nitrógeno. Del gas de síntesis se puede extraer hidrógeno puro; el nitrógeno es un subproducto de un sistema de descomposición del aire incorporado, El amoniaco es una materia base para la industria de los fertilizantes, se utiliza como cáustico y decapante y forma parte de los endurecedores de las colas de carpintero.



CAPITULO VII: REQUERIMIENTO Y COSTO DEL PROTOTIPO

Los costos económicos se calcularán en base a la capacidad del prototipo que se construyó.

Capacidad de procesamiento: $F^1 = 1 \text{ kg/h}$

Tiempo de operación: $t = 8 \text{ h/día}$

La cantidad de residuos sólidos urbanos a procesar será de 1 kilogramo por cada hora y se operará 8 horas al día por 5 días. Por consiguiente, los costos se calcularán para esta capacidad de procesamiento y tiempo de operación.

7.1. Requerimientos

7.1.1. Requerimiento de equipos

El requerimiento de los equipos es solo para el prototipo.

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>DESCRIPCION</i>	<i>ESPECIFICACIONES TECNICAS</i>
1	Reactor Lecho fluidizado	1	Es un equipo de gasificación por plasma en cuyo interior se lleva reacciones en cadena ionizando a toda la materia presente en el Reactor.	CAPACIDAD CON AIRE: 1 kg/h DIAMETRO EXTERIOR: 0.24 m DIAMETRO INTERIOR : 0.19 m ALTURA: 0.53 m FORMA: Cónica parte inferior interna ACCESORIOS: -manómetro -Boquillas
2	Antorcha de plasma	1	En el prototipo modelo se utilizarán antorchas de arcos no-transferidas, consistentes en un par de electrodos tubulares de cobre. El gas de operación se introducirá a través de una pequeña ranura entre los electrodos.	DIAMETRO: 89 (mm) LONGITUD TIPICA: 826(mm) PESO: 0.5 Kg ACCESORIOS: Completo
3	Arco eléctrico	1	El arco eléctrico se encargara de generar un campo eléctrico para la generación del plasma térmico, y como combustible utiliza aire.	POTENCIA MINIMA: 650 KW POTENCIA MAXIMA: 800 KW FLUJO DE AIRE: 42 Kg/hr EFICIENCIA TERMICA: 70% CORRIENTE MAX.OPER.: 400 (A)

				TENSION DE ARCO MAXIMA DE OPERCION: 860 (V) PESO: 2.5 Kg ACCESORIOS: -Toma de corriente -Aislante
4	Compresor de aire	1	Equipo que se encargara de comprimir aire y suministrar al arco eléctrico para que este se convierta en plasma.	MODELO: WD30100B CAPACIDAD DE ESTANQUE: 100 L PRESION: 125 lb CAUDAL: 260 L/min POTEN. DEL MOTOR: 3 HP RPM: 2800 VOLTAJE: 220 volt. FRECUENCIA: 50 Hz LARGO: 79 cm ALTO: 66 cm PESO: 88 Kg ACCESORIOS: Manómetros, Ruedas, Manilla tipo L.
5	Condensador- evaporador	1	Unidad encargada de bajar la temperatura de gas, fabricado en forma de serpentín de material de cobre	DIAMETRO DEL DUCTO: 3/8 “
6	Ciclón	1	Unidad encargada de separar polvo o partículas del gas formado en el reactor, fabricado de material de acero galvanizado.	ALTURA: 0.29 m DIAMETRO: 0.12 m
7	Filtro Scrubber	1	Unidad de lavado de gas incorpora in filtro depurador de H2S junto a carbón activado, con el objetivo de reducir las emisiones y limpiar el gas. Fabricado de estructura metálica en acero galvanizado.	ALTURA: 0.33 m DIAMETRO: 0.18 m DIAMETRO DEL FILTRO: 0.17 m ACCESORIOS: -Boquillas -Filtro -Cavidad para el carbón activado
8	Compresor	1	Máquina de fluido que su objetivo es aumentar la presión del gas de síntesis obtenido en el proceso.	MODELO: WD30100B CAPACIDAD DE ESTANQUE: 100 L PRESION: 125 lb CAUDAL: 260 L/min POTEN. DEL MOTOR: 3 HP RPM: 2800 VOLTAJE: 220 volt. FRECUENCIA: 50 Hz LARGO: 79 cm ALTO: 66 cm PESO: 88 Kg ACCESORIOS: Manómetros, Ruedas, Manilla tipo L.

7.1.2. Requerimiento de materia prima e insumos

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>DESCRIPCION</i>	<i>ESPECIFICACIONES TECNICAS</i>
1	Residuos Sólidos Urbanos	160 Kg/mes	Residuos Sólidos urbanos en general.	Los RSU deben estar triturados, según al tamaño definido, y que este cumplirá la función de combustible dentro del reactor.
2	Aire comprimido	60 kg/mes	Aire capturado del medio ambiente y comprimido.	El aire debe estar comprimido a 2.7 bar, para ser suministrado al arco eléctrico
3	NaOH	0,5 Kg/mes	Hidróxido de sodio 0.2 M para eliminar H ₂ S en el gas de síntesis	NaOH al 90% de pureza

7.1.3. Requerimiento de servicios de producción

<i>N</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>DESCRIPCION</i>	<i>ESPECIFICACIONES</i>
1	Energía Eléctrica	220 V	Energía Eléctrica proveniente de la red eléctrica para el arranque y puesta en marcha.	Energía Eléctrica bifásica.
2	Agua	100 L/mes	Agua de Red utilizada para la limpieza y lavado del gas de syntesys.	Agua previamente tratada

7.2. Costos de diseño y construcción del prototipo

En este punto se realizará el planteamiento económico necesario que acompaña al prototipo de tratamiento de residuos presentada hasta ahora. Es importante resaltar la capacidad del prototipo es para tratar 1 kg/h de residuos, funcionando durante 5 días a la semana, lo que produce una capacidad de 160 kg/mes.

7.2.1. Costos de diseño

El diseño del prototipo fue realizado mediante la asistencia de software libre, se diseñaron las siguientes unidades: Reactor de lecho fluidizado, tolva de materia prima

ciclón separador de partículas, filtro scrubber, compresor (chiller), condensador, válvulas y tuberías, finalmente se diseñó el ensamblaje y funcionamiento del prototipo.

Los costos de diseño están asociados al tiempo empleado para lograr que las unidades no tengan inconvenientes en la etapa de funcionamiento (puesta en marcha).

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>TIEMPO EMPLEADO</i>	<i>COSTO POR HORA</i>	<i>TOTAL</i>
1	Reactor LF	1	5 hr	5 bs	25 bs
2	Condensador	1	3 hr	5 bs	15 bs
3	Ciclón	1	4 hr	5 bs	20 bs
4	Filtro Scrubber	1	6 hr	5 bs	30 bs
5	Compresor	1	2 hr	5 bs	10 bs
6	Tolva	1	1 hr	5 bs	5 bs
7	Válvulas y tuberías	1	2 hr	5 bs	10 bs
8	Filtro cilíndrico con cavidad	1	3 hr	5 bs	15 bs
9	Ensamblaje	1	7 hr	5 bs	35 bs
10	funcionamiento	1	9 hr	5 bs	45 bs
TOTAL					Σ = 210 Bs

El costo total del diseño es equivalente a 210 bs, costo que se incluirá al costo total del prototipo.

7.2.2. Costos de construcción

Los costos de construcción están asociados los materiales utilizados para la construcción de cada unidad que fue diseñada.

<i>N</i> •	<i>ITEM</i>	<i>MATERIAL UTILIZADO PARA CONSTRUIR</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>PRECIO UNITARIO</i>	<i>TOTAL</i>
1	Reactor LF	Cilindros en desuso de refrigerantes, de 4 mm de espesor, y soldadura final bronce.	2	45 Bs	90 Bs
4	Compresor de gas sintético	Compresor reacondicionado de un refrigerador en desuso, acople de turbias y válvulas.	1	150 Bs	150 Bs
5	Condensador-evaporador	Tubo extraído del radiador de un motor de automóvil, acondicionado con tubos capilares de cobre de 4 mm de diámetro	1	10 Bs	10 Bs
6	Ciclón	Plancha de acero galvanizado de 0.50 m ² , con un espesor de 1,2mm, soldadura realizada estaño y bronce	1	40 Bs	40 Bs
7	Filtro Scrubber	Plancha de acero galvanizado de 0.50 m ² , con un espesor de 1,2mm, soldadura realizada estaño y bronce	1	40 Bs	40 Bs
8	Tolva	Lamina de acero en desuso de las imprentas de 0.7 mm de espesor, sellado con remaches. 0.40 m ² .	1	10 Bs	10 Bs
9	Válvulas y tuberías	Material recuperado del motor de un automóvil	4	5 Bs	20 Bs
10	Filtro cilíndrico con cavidad	Material recuperado de la admisión de aire de un automóvil	1	10 Bs	10 Bs
11	Estructura de ensamblaje	Fierro angular, con soldadura de arco	1	60 Bs	60 Bs
TOTAL					Σ = 430 Bs

7.3. Costos de puesta en marcha

Los costos para la puesta en marcha son aquellos que intervienen en todo el proceso de producción incluido las unidades construidas.

➤ *Unidades del prototipo*

Para el costo de las unidades se incluye el costo de construcción de cada uno, y los que se adquirieron en el mercado.

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>PRECIO UNITARIO</i>	<i>TOTAL</i>
1	Reactor Lecho fluidizado	1	90 Bs	90 Bs
2	Compresor de gas de síntesis	1	150	150 Bs
3	Antorcha de plasma	1	150 Bs	150 Bs
4	Arco eléctrico	1	550 Bs	550 Bs
5	Compresor de aire	1	350 Bs	350 Bs
6	Condensador-evaporador	1	10 Bs	10 Bs
7	Ciclón	1	40 Bs	40 Bs
8	Filtro Scrubber	1	40 Bs	40 Bs
9	Tolva	1	10 Bs	10 Bs
10	Sensor de medición CO MQ-7	1	20 Bs	20 Bs
11	Sensor MQ-2	1	25 Bs	25 Bs
12	Filtro cilíndrico con cavidad	1	17 Bs	10 Bs
13	Válvulas y tuberías	4	5 Bs	20 Bs
14	Manómetros	2	25Bs	50 Bs
15	Sistema de captura de gas	1	20 Bs	20 Bs
16	Estructura de ensamblaje	1	60 Bs	60 Bs
TOTAL				Σ = 1595 Bs

➤ *Materia prima e insumos*

Este ítem es calculado para 1 mes de operación ya que es considerado un activo circulante:

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>PRECIO UNITARIO</i>	<i>TOTAL</i>
1	Residuos Sólidos Urbanos	160 kg	0.20 ctvs.	32 Bs
2	NaOH	0.5 kg		18 Bs
3	Carbón activado	0.1 kg		5 Bs
TOTAL				Σ = 55 Bs

➤ ***Servicios de producción***

- Energía eléctrica utilizada por el compresor para el aire comprimido.

$$\text{Potencia} = 2 \text{ HP} = 1492 \text{ W} = 1.492 \text{ kW}$$

$$\text{Tiempo funcionamiento} = 8 \text{ hr/día} \times 20 \text{ días} = 160 \text{ hr}$$

$$1 \text{ kWh} = 0.71 \text{ Bs}$$

$$1.492 \text{ kW} * 160 \text{ hr} = 238.7 \text{ kWh}$$

$$238.7 \text{ kWh} * \frac{0.71 \text{ Bs}}{1 \text{ kWh}} = 169 \text{ Bs}$$

- Energía Eléctrica utiliza por el arco eléctrico para generar el plasma.

$$\text{Potencia} = 560 \text{ W} = 0.56 \text{ kW}$$

$$\text{Tiempo funcionamiento} = 8 \text{ hr/día} \times 20 \text{ días} = 160 \text{ hr}$$

$$1 \text{ kWh} = 0.71 \text{ Bs}$$

$$0.56 \text{ kW} * 160 \text{ hr.} = 89.6 \text{ kWh}$$

$$89.6 \text{ kWh} * \frac{0.71 \text{ Bs}}{1 \text{ kWh}} = 63.6 \text{ Bs}$$

- Energía eléctrica utilizada por el compresor de gas de síntesis.

$$\text{Potencia} = 1/2 \text{ HP} = 368 \text{ W} = 0.368 \text{ kW}$$

$$\text{Tiempo funcionamiento} = 8 \text{ hr/día} \times 20 \text{ días} = 160 \text{ hr}$$

$$1 \text{ kWh} = 0.71 \text{ Bs}$$

$$0.368 \text{ kW} * 160 \text{ hr} = 58.88 \text{ kWh}$$

$$58.88 \text{ kWh} * \frac{0.71 \text{ Bs}}{1 \text{ kWh}} = 41.80 \text{ Bs}$$

- Total energía eléctrica utilizada en 8 horas diarias y 20 días por los equipos del prototipo.

$$P_T = 387.18 \text{ kWh} = 274.89 \text{ Bs}$$

- Agua utilizada para el lavado del gas.

$$V = 5 \text{ litros} = 5 \text{ Bs}$$

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>PRECIO UNITARIO</i>	<i>TOTAL</i>
1	Energía eléctrica	387.18 kWh	0.71 Bs.	274.89 Bs
2	Agua	5 L	1 Bs	5 Bs
TOTAL				$\Sigma = 279.89 \text{ Bs}$

➤ *Gastos de diseño y estudio*

Medición de control de calidad del gas.

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>PRECIO UNITARIO</i>	<i>TOTAL</i>
1	Diseño	10		210
1	Control de calidad	4	35 Bs	140 Bs
TOTAL				$\Sigma = 350 \text{ Bs}$

➤ *Mano de obra*

La mano de obra se refiere al proyectista del prototipo.

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>PRECIO UNITARIO</i>	<i>TOTAL</i>
1	Proyectista	1	500	500 Bs
TOTAL				$\Sigma = 500 \text{ Bs}$

7.4. Costo total de del prototipo

El costo total del prototipo está determinado desde la etapa de diseño hasta la puesta en marcha.

<i>N°</i>	<i>ITEM</i>	<i>INVERSION</i>	<i>TOTAL</i>
1	Unidades del prototipo (costo total del prototipo)	1595 Bs	1595 Bs
2	Materia prima e insumos	55 Bs	55 Bs
3	Servicios de producción	279.89 Bs	279.89 Bs
4	Gastos de diseño y estudio	350 Bs	350 Bs
5	Mano de obra	500 Bs	500 Bs
TOTAL			Σ = 2779,89 Bs

El costo de hacer funcionar el prototipo alcanza a 2779 Bs.

7.5. Costo de producción del gas de síntesis

El costo de producción del gas de síntesis se determinará en base a lo que el prototipo pueda procesar, en este caso 1kg/h.

El siguiente cuadro muestra los activos: fijo, diferido, y circulante (determinado para 1 mes de operación) para poder determinar el costo de producción.

DETALLE	MONTO [Bs]	APORTE PROPIO
		0
ACTIVO FIJO		
Unidades del prototipo	1595	1595
ACTIVO DIFERIDO		
Gastos de diseño y estudio	350	250
ACTIVO CIRCULANTE		
Materia prima e insumos	55	55
Servicios de producción	279	279
Mano de obra	500	500
TOTAL	2779	2779

Una vez diferenciado todos los activos que intervienen en el proyecto, utilizaremos el activo circulante para determinar el costo de producción.

CV = costo variable

CF = Costo fijo

ITEM	CV	CF
Materia Prima	55 Bs	
Mano de Obra		500 Bs
Servicios de producción	279 Bs	
TOTAL	834 Bs	500 Bs

Los costos variables están determinados para 1 mes de operación, ahora determinaremos el costo unitario variable tomando como base el precio del gas natural en el mercado (0,50 bs) con ese parámetro se determina el costo variable unitario.

COSTOS VARIABLES POR UNIDAD PARA 1 Kg DE RSU	
Materia prima	0,034 bs
Servicios(luz, agua)	0,17 bs
Total CV por unidad	0,204 Bs

El Costo de procesar 1 kg de basura es 0,204 bs, lo que producirá 2.08 m³/h de gas de síntesis comprimido a 250 PSI

MASA DE RSU	COSTO UNITARIO	VOLUMEN DE GAS	COSTO TOTAL
1 kg	0,204 bs	900 cc	0,204 bs

7.6. Costo de producción para 1 m³ de gas de síntesis

MASA DE RSU	COSTO UNITARIO	VOLUMEN DE GAS	COSTO TOTAL
1 kg	0,204 bs	2.08 m ³	0,204 bs
10 kg	0,204 bs	20.8 m ³	2,04 bs
100 kg	0,204 bs	208 m ³	20.4 bs
160 kg	0,204 bs	332 m ³	32,64 bs
1000 kg = 1 tn	0,204 bs	2075 m ³	204 bs
1111 kg = 1.1 tn	0,204 bs	2305 m ³	226 bs

El costo para procesar 1 tonelada de residuos es equivalente 204 bs, en la actualidad las alcaldías de La Paz y El Alto disponen de 100.000.000 bs de presupuesto anual para el recojo y tratamiento de los RSU lo que corresponde a 391 bs por tonelada. Este dato demuestra que es viable el tratamiento de residuos sólidos mediante plasma.

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

- Se desarrolló un medio alternativo de reducción de residuos sólidos urbanos para que la basura generada no sea depositada en el relleno sanitario y que este sitio de disposición final no se colapse, para este fin se aplicó la tecnología de gasificación por plasma convirtiendo estos desechos en gas de síntesis.
- Se determinó el volumen de residuos sólidos que existe en el relleno sanitario utilizando como dato la generación diaria, que alcanza a 540 ton/día, y que en un año este llega a un promedio de 219.000 toneladas, de los cuales el 60 % son residuos orgánicos. De tal forma que sus propiedades de estos residuos al ser mayoritariamente orgánica la materia volátil y combustible alcanza a un promedio de 70% lo cual indica que estos residuos pueden convertirse en gas, también se determinó el contenido de C (47.68% p/p), H (6.18 %p/p), O (32.88%p/p), N(1.8 %p/p), S (0.28%p/p), donde el elemento mayoritario es el carbono lo cual es apto para procesar estos residuos de forma térmica.
- Se diseñó un prototipo modular de todo el sistema de gasificación por plasma mediante ecuaciones de diseño correspondientes a cada unidad con el fin de determinar las dimensiones, capacidad de procesamiento y con la ayuda del software AutoCAD Plant 3D se logró diseñar cada unidad en su totalidad. una vez diseñada cada unidad se procedió a construirlos en material de acero al carbono y galvanizado en base a los datos que se obtuvieron en la etapa de diseño, finalmente se procedió a ensamblar el prototipo que cuenta con 7 unidades de procesamiento.
- Se determinaron las condiciones de operación simulando 5 condiciones diferentes con el software Aspen Hysys v8.8 de donde se eligió la condición más adecuada tanto para el reactor y el sistema de alimentación.

Condiciones de alimentacion de materia prima y aire.

Variables de operacion			
Material Stream	Temperatura (°C)	Presion (KPa)	Fuljo de alimentacion (kg/h)
RSU	100	65.98	1
Aire	800	800	1.5438

Condiciones de operacion en el reactor

Condiciones de operacion			
	Temperatura (°C)	Potencia arco electrico (Kw)	Presion (KPa)
Reactor	2433	1 kw = 3600 kj/h	0.1222

Las condiciones de operación determinados se aplicaron para el funcionamiento del prototipo.

Por otro lado, se determinó el balance de materia y energía en la etapa de simulación, el balance másico se realizó por balance de materia con reacción química habiendo una ligera desviación de 0.001% con el balance de la simulación. Con estos datos se procedió a la puesta en marcha del prototipo que su capacidad diseñada es para 1kg/h, al momento del funcionamiento se logró procesar 1 kg en 40 minutos obteniendo 2.08 m³/h de gas, se midió la conversión del C a CO y de C a CH₄ con un sensor de gas combustible a cada instante dentro del reactor alcanzando a un 61.5 % de conversión,

El gas de síntesis obtenido cumple con los requisitos teóricos exigidos tanto en su limpieza como en su composición.

Comparación del gas de síntesis: teórica, simulación y experimental					
Componentes	Composición				
	Teórico (% Vol.)	Simulación (% Vol.)	Balance (%Vol.)	Experimental (% Vol.)	
Hidrogeno (H_2)	11	18.71	17.2	17.2	Determinado por balance
Monóxido de carbono (CO)	24	23.11	24.33	18.3	Determinado con sensor
Nitrógeno (N_2)	53	42.14	42.75	42.75	Determinado por balance
Metano (CH_4)	3	5.94	6.61	9.8	Determinado con sensor
Agua (H_2O)	0	0.17	0.06	0.10	Determinado con sensor
Dióxido de carbono (CO_2)	9	9.93	9.12	11.85	Determinado con sensor

El gas de síntesis obtenido se aproxima en un 88 % al valor teórico planteado.

- Los costos se determinaron en base a la capacidad del prototipo, en primer lugar, se detalló las características de cada unidad luego se logró calcular el costo de diseño y construcción, incluyendo al costo total del prototipo que alcanza a 2995 bs. De igual forma se calculó el costo de producción para 1 kg y 1 tonelada de residuos:

MASA DE RSU	COSTO UNITARIO	VOLUMEN DE GAS	COSTO TOTAL
1 kg	0,204 bs	2.08 m3	0,204 bs
1000 kg = 1 tn	0,204 bs	2080 m3	204 bs

El costo unitario para procesar 1 kg es equivalente a 0,204 bs produciendo 2.08 m3 de gas sintético, sin embargo, para procesar 1 tonelada de residuos el costo es equivalente a 204 bs, por otro lado, la alcaldía de El Alto paga 391 bs por tonelada de basura procesada en el relleno sanitario. Este dato indica que convertir la basura en gas es viable.

- La tecnología de gasificación por plasma es un proceso que con el paso de los años ha ido ganando terreno como una fuente importante para la sustitución de combustibles fósiles. Por lo tanto, se puede determinar que con base en los resultados obtenidos este proceso representa beneficios económicos y ecológicos que deben motivarnos para aportar nuestro mayor esfuerzo en el cuidado y preservación del planeta.

8.2. Recomendaciones

- Como fuente de alimentación para generar el plasma se utilizó aire, se recomienda utilizar otro tipo de gas como ser: oxígeno, neón, helio. Para lograr incrementar el grado de conversión dentro del reactor.
- Acoplar el sistema de gasificación por plasma a un motor de combustión interna o a una micro turbina de gas para poder generar energía eléctrica.
- Realizar un estudio económico para el montaje de una planta comercial de conversión de residuos sólidos por plasma para el municipio de El Alto.
- Llevar a cabo un estudio más completo para la escoria que se obtiene en este proceso como un subproducto. Esta escoria podría ser utilizada directamente como base para asfaltos, además cuentan una superficie porosa ideal para la clarificación de aguas residuales.

BIBLIOGRAFIA

1. Tron .F. Recogida de basura en mega ciudades. INVI [en línea]. 2010. [fecha de acceso acceso 12 de abril 2017]; N° 70 ISSN 0718-3588 URL disponible en: <http://www.revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/481/534>
2. Rondón Toro, et al, Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios, MANUALES DE LA CEPAL [en línea]. 2016. [fecha de acceso 10 noviembre 2017]; N° 02 ISSN 2518-3923 pag. 3-6. URL disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40407-guia-general-la-gestion-residuos-solidos-domiciliarios>
3. Martínez Arce et al , 2010
4. Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos. [en línea]. Morelos Mexico; Comisión eléctrica federal; 2012. [fecha de acceso 12 octubre 2017]. URL disponible en: <https://www.ineel.mx/docu/Guia-RSU.pdf>
5. Martínez Arce, 2014
6. Alfredo Rhim. Residuos sólidos situación en américa latina. RELAGRES [en línea]. 13 junio 2017. [fecha de acceso 8 noviembre 2018]; N°13. URL disponible en: <http://seminariorelagres2017.org/wp-content/uploads/2017/06/B1-2presentacion-Alfredo-RHIM-Seminario-RELAGRES17.pdf>
7. Hoornweg y Bhada-Tata 20128
8. OPS, 2005 y Martínez Arce et al, 2010
9. ONUHABITAT, 2012
10. OPS/OMS-AIDIS-BID, 2010
11. Elisenda Realp Campalnas. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia. MMAyA. [en línea].2011. [fecha de acceso 10 agosto 2017]; N°01 ISBN: 4-1-271-10 P.O. URL pág. 10 disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/INTRODUCCION.pdf>
12. Grau, Javier; et al. Situación de la gestión de residuos sólidos en américa latina y el caribe. BID [en línea] agosto 2015. [fecha de acceso 12 de agosto 2017]; N° 23 URL disponible en: https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7177/Situacion_de_la_gestion_de_residuos_solidos_en_America_Latina_y_el_Caribe.pdf?sequence=1
13. Rondón Toro, et al, Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios, MANUALES DE LA CEPAL [en línea]. 2016. [fecha de acceso 10 noviembre 2017]; N° 02 ISSN 2518-3923 pag. 26. URL disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40407-guia-general-la-gestion-residuos-solidos-domiciliarios>

14. Rondón Toro, et al, Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios, MANUALES DE LA CEPAL [en línea]. 2016. [fecha de acceso 10 noviembre 2017]; N° 02 ISSN 2518-3923 pag. 25. URL disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/40407-guia-general-la-gestion-residuos-solidos-domiciliarios>
15. Grau, Javier; et al. Situación de la gestión de residuos sólidos en américa latina y el caribe. BID [en línea] agosto 2015. [fecha de acceso 12 de agosto 2017]; N° 23 pag. 2 URL disponible en: [https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7177/Situacion de la gestion de residuos solidos en America Latina y el Caribe.pdf?sequence=1](https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/7177/Situacion%20de%20la%20gestion%20de%20residuos%20solidos%20en%20America%20Latina%20y%20el%20Caribe.pdf?sequence=1)
16. Elisenda Realp Campalnas. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia. MMAyA. [en línea].2011. [fecha de acceso 10 agosto 2017]; N°01 ISBN: 4-1-271-10 P.O. pág. 17 URL disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/INTRODUCCION.pdf>
17. Crecimiento demográfico. [en línea]. Bolivia; Instituto Nacional de estadísticas INE; 10 de julio 2018. [fecha de acceso 12 septiembre 2018]. URL disponible en: <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/tag/Poblaci%C3%B3n>
18. Generación de residuos sólidos. [en línea]. Bolivia; Instituto nacional de estadísticas INE; junio 2016. [fecha de acceso 12 abril 2017]. URL disponible en: <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/category/100-junio-2016>
19. Diagnóstico de gestión de residuos sólidos en Bolivia. [en línea]. Bolivia. Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos; 2015. [fecha de acceso 13 abril 2017]. URL disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/DATOS-GENERALES.pdf>
20. Vladimir Onny Gutiérrez Ledezma. Diagnóstico de la gestión de residuos en Bolivia. MMAyA. [en línea].2011. [fecha de acceso 19 septiembre 2017]; N° 01. URL disponible en: <https://www.kioscoverde.bo/wp-content/uploads/2016/11/Diagnostico-de-la-Gestion-de-Residuos-Solidos-3.pdf>
21. Generación de residuos sólidos. [en línea]. Bolivia; Instituto nacional de estadísticas INE; junio 2016. [fecha de acceso 12 abril 2017]. URL disponible en: <https://www.ine.gob.bo/index.php/notas-de-prensa-y-monitoreo/itemlist/category/100-junio-2016>
22. Ciclo del reciclaje. [en línea]. Santa Cruz – Bolivia. Cámara de industria comercio CAINCO; mayo 2016. [fecha de acceso 12 abril 2017]. URL disponible: <http://www.cainco.org.bo/index.php?r=web/Noticia&id=6&idN=564>
23. Foro del reciclaje. [en línea]. Santa Cruz – Bolivia. Cámara de industria comercio CAINCO; mayo 2016. [fecha de acceso 12 abril 2017]. URL disponible: <http://www.cainco.org.bo/index.php?r=web/Noticia&id=6&idN=163>
24. Vladimir Onny Gutiérrez Ledezma. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de La Paz. MMAyA. [en línea]. 2011. [fecha de acceso 24 septiembre 2017]; N° 04

URL disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/DIAGNOSTICO-DEPARTAMENTAL-LA-PAZ.pdf>

25. Gladys Limachi Mamani. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en el departamento de Beni. MMAyA. [en línea]. 2011. [fecha de acceso 22 enero 2018; N° 06 pág. 20. URL disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/DIAGNOSTICO-DEPARTAMENTAL-BENI.pdf>
26. Elisenda Realp Campalnas. Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos en Bolivia. MMAyA. [en línea]. 2011. [fecha de acceso 10 agosto 2017]; N°01 ISBN: 4-1-271-10 P.O. URL pág. 20-29 disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/07/INTRODUCCION.pdf>
27. Residuos sólidos en ciudades capitales y El Alto. [en línea]. Bolivia; Instituto nacional de estadísticas INE; junio 2017. [fecha de acceso 22 enero 2018]. URL disponible en: <https://www.ine.gob.bo/index.php/principales-indicadores/item/560-residuos-solidos-en-ciudades-capitales-y-el-alto-llego-a-mas-de-un-millon-de-toneladas>
28. Gestión de residuos sólidos en la ciudad de El Alto. [en línea]. El Alto-Bolivia. EMALTE; 2016. [Fecha de acceso 6 febrero 2017] URL disponible en: [www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPOEMALT%20\(Eduardo%20Garay\).pdf](http://www.sgab-bolivia.org/Simposio/pdf/.../EXPOEMALT%20(Eduardo%20Garay).pdf)
29. El Alto tiene 12 recicladoras legales y al menos otras 100 son clandestinas. [en línea]. El Alto; Diario LA RAZON; 14 de julio de 2014. [fecha de acceso 30 mayo 2018]. URL disponible en: http://la-razon.com/index.php?url=/ciudades/Alto-recicladoras-legales-clandestinas_0_2087791252.html
30. RECICLAJE DE RESIDUOS SÓLIDOS CRECE LENTAMENTE EN BOLIVIA. [en línea]. La Paz; diario EL CAMBIO; 24/06/2018. [fecha de acceso 20 agosto 2018]. URL disponible en : <http://www.cambio.bo/?q=node/47407>
31. RELLENO SANITARIO DE VILLA INGENIO ESTÁ POR COLAPSAR. [en línea]. El Alto; Diario EL CAMBIO; 27/03/2017 . [fecha de acceso 12 de abril 2018]. URL disponible en: <http://cambio.bo/?q=node/23859>
32. IDENTIFICAN 5 PROBLEMAS EN RELLENO SANITARIO EL INGENIO. [en línea]. El Alto. diario EL CAMBIO; 20/07/2017. [fecha de acceso 22 marzo 2017]. URL disponible en: <http://www.cambio.bo/?q=node/29218>
33. Colapsa el relleno sanitario de El Alto y contamina a Villa Ingenio. [en línea]. La Paz-Bolivia. Diario Página siete; 13 de abril de 2016. [fecha de acceso 22 octubre 2017]. URL disponible en: <https://www.paginasiete.bo/sociedad/2016/4/13/colapsa-relleno-sanitario-alto-contamina-villa-ingenio-93061.html>
34. Colapsa el relleno sanitario de El Alto . [en línea]. La Paz-Bolivia. Diario Página siete; 13 de abril de 2016. [fecha de acceso 22 octubre 2017]. URL disponible en: <https://www.paginasiete.bo/sociedad/2016/4/13/colapsa-relleno-sanitario-alto-contamina-villa-ingenio-93061.html>

35. Botadero de Villa Ingenio continúa colapsado, denuncian falta de control y supervisión. [en línea]. La Paz-Bolivia; diario La Razón; diciembre 4, 2014. [fecha de acceso 22 septiembre 2017]. URL disponible en: <http://www.radiopachamama.com/salud/botadero-de-villa-ingenio-continua-colapsado-denuncian-falta-de-control-y-supervision/>
36. Campins Eritja, M. (1994).
37. Comuna Autónoma de Madrid - CAM (1987a).
38. López Bonillo, D. (1994):
39. Arrieta, Ronald, 2008.
40. Zanello, C.M. S.A. 2012.
41. Tignanelli, Horacio Ed. Amazonas, Medellín, 2010
42. Briefing documento n the pirolisis and gasification of MWS.
43. . Moustakasa, Kendricks México, 2015.
44. Fernández, J. La Basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. Boletín del Instituto de Investigaciones. [en línea]. Enero – Marzo 2011.[fecha de acceso 5 agosto 2017]. N°496. URL disponible en: <https://www.ineel.mx/boletin012011/inves.pdf>
45. Ismael Sanchez. Proyecto para la conversión de residuos en energía, [Tesis de Grado en línea], Universidad de Montevideo, Diciembre 2011.[fecha de acceso 22 agosto 2017]. URL disponible en: <http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT%202014/1896711942.pdf>
46. DIFERENCIA ENTRE INCINERACIÓN, GASIFICACIÓN Y PIROLISIS. [en línea]. Chile. PLATAFORMA TECNOLÓGICA; 3 septiembre 2015.[fecha de acceso 22 octubre 2017]. URL disponible en: <https://tecnologiaschile.com/2013/09/03/diferencia-entre-incineracion-gasificacion-y-pirolisis/>
47. Andrés Pascual, Begoña Ruiz. Situación potencial de generación de biogás “Estudio 2011-2020”.Madrid. IDAE; 2011 pag. 10 [fecha de acceso 3 de octubre 2018] Url disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf
48. El sector del biogas agroindustrial en España.[en línea].Madrid 16 de septiembre 2016.Dirección general de recursos agrícolas y ganaderos.2016.[acceso 4 de octubre 2018] url disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/DOCBIOGASVersion21-09-2010_tcm30-110139.pdf
49. Andrés Pascual, Begoña Ruiz. Situación potencial de generación de biogás “Estudio 2011-2020”.Madrid. IDAE; 2011 pag. 24-25 [fecha de acceso 3 de octubre 2018] Url disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf
50. Andrés Pascual, Begoña Ruiz. Situación potencial de generación de biogás “Estudio 2011-2020”.Madrid. IDAE; 2011 pag. 34 [fecha de acceso 3 de octubre 2018] Url disponible en: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf
51. Hernan Romero. Manual de biogas. MINENERGIA[en línea] FAO-2011. ISBN 978-95-306892-0 [acceso 12 septiembre 2018] N°00153. URL disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

52. Pedro Díaz. La Bioenergía en América Latina y el Caribe. RLC-ONU. [en línea]. FAO-2013. ISBN 978-92-5-307734-2 (edición impresa). pag. 16 [acceso 15 septiembre 2018] N°00154. URL disponible en: <http://www.fao.org/3/a-as112s.pdf>
53. Pedro Díaz. La Bioenergía en América Latina y el Caribe. RLC-ONU. [en línea]. FAO-2013. ISBN 978-92-5-307734-2 (edición impresa). pag. 22 [acceso 15 septiembre 2018] N°00154. URL disponible en: <http://www.fao.org/3/a-as112s.pdf>
54. Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía. [en línea] EEUU; Westinghouse Plasma Corporation; 2013 [acceso 14 agosto 2018] URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy-Evolved_Brochure_Sp.pdf
55. BBC Mundo [en línea] Noruega-Oslo; BBC News; Publicado 25 septiembre 2013, [acceso 4 octubre 2018] URL disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/09/130923_ciencia_noruega_basura_energia_ng
56. BBC Mundo [en línea] Noruega-Oslo; BBC News; Publicado 2 noviembre 2013, [acceso 4 octubre 2018] URL disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/09/130923_ciencia_noruega_basura_energia_ng
57. ABC vivir [en línea] Suecia; Agencia ABC; Publicado 12 diciembre 2016, [acceso 4 octubre 2018] URL disponible en: https://www.google.com/amp/s/www.abc.es/natural/vivirenverde/abc-suecia-queda-sin-basura-y-importa-para-mantener-plantas-reciclaje-201612121132_noticia_amp.html
58. ABC vivir [en línea] Suecia; Agencia ABC; Publicado 1 diciembre 2016, [acceso 4 octubre 2018] URL disponible en: <https://misionesonline.net/2017/01/28/en-suecia-aplicaran-en-2017-una-ley-de-reduccion-de-impuestos-para-combatir-la-obsolencia-programada/>
59. Göran Skoglund . WTE Öresundskraft [en línea]. Suecia. Incineración de residuos sólidos urbanos; 2013. [fecha de acceso 23 octubre 2017] URL disponible en: <https://misionesonline.net/2017/01/28/en-suecia-aplicaran-en-2017-una-ley-de-reduccion-de-impuestos-para-combatir-la-obsolencia-programada/>
60. ABC vivir [en línea] Suecia; Agencia ABC; Publicado 23 diciembre 2016, [acceso 4 octubre 2018] URL disponible en: https://www.google.com/amp/s/www.abc.es/natural/vivirenverde/abc-suecia-queda-sin-basura-y-importa-para-mantener-plantas-reciclaje-201612121132_noticia_amp.html
61. Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea]. Japón. ALTER NRG; publicado junio 2016 [acceso 4 octubre 2018] pag. 23 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy_Brochure
62. Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea]. Japón. ALTER NRG; publicado junio 2016 [acceso 4 octubre 2018] pag. 26 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy_Brochure

63. Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 [acceso 14 agosto 2018] pag. 10 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy-Evolved_Brochure_Sp.pdf
64. Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 [acceso 14 agosto 2018] pag 11-15 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy-Evolved_Brochure_Sp.pdf
65. Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 [acceso 14 agosto 2018] pag 16-17 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy-Evolved_Brochure_Sp.pdf
66. Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon. ALTER NRG; publicado junio 2016 [acceso 4 octubre 2018] pag 26 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy_Brochure.
67. Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon. ALTER NRG; publicado junio 2016 [acceso 4 octubre 2018] pag 28 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy_Brochure.
68. Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon Wuhan Kaidi . ALTER NRG; publicado junio 2016 [acceso 4 octubre 2018] pag 27 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy_Brochure.
69. Alter NRG Plasma Gasification Solution. [en línea].Japon Wuhan Kaidi . ALTER NRG; publicado junio 2016 [acceso 4 octubre 2018] pag 30 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy_Brochure.
70. Cesar B. Quirós, Wastelectric convertirá basura en energía [en línea], Costa Rica-San José, El Financiero, publicado 27 abril, 2014 [acceso 4 octubre 2018]. URL disponible en: <https://www.elfinancierocr.com/negocios/firma-estadounidense-wastelectric-invertira-390-milones-en-costa-rica-para-covertir-desechos-solidos-en-electricidad/7PDS5CROZVEGLI57B66WN6LBQE/story/>
71. Juan Diego Posada Posada. Basura en Medellín la opción energética [en línea]. Antioquia-Colombia, El Colombiano, publicado 21 de octubre 2017 [acceso 4 octubre 2018] URL disponible en: <https://www.google.com/amp/m.elcolombiano.com/basura-en-medellin-la-opcion-energetica>.
72. Jesús Sesma. Vamos a transformar la basura en energía [en línea]. Ciudad de México, Excelsior, publicado 12 abril 2018. [acceso 4 octubre 2018] URL disponible en: <https://m.excelsior.com.mx/opinion/opinion-del-expeto-nacional/vamos-a-transformar-la-basura-en-energia/es>.
73. Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 [acceso 14 agosto 2018] pag 20 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy-Evolved_Brochure_Sp.pdf

74. Gasificación por plasma de Westinghouse. Evolución en energía.[en línea] EEUU; Westinghouse plasma Corporation; 2013 [acceso 14 agosto 2018] pag 30-32 URL disponible en: http://www.alternrg.com/wp-content/uploads/2015/04/WPC_Energy-Evolved_Brochure_Sp.pdf
75. Gestión de Residuos Sólidos. [en línea]. El Alto: EMALTE; 2017. [fecha de acceso 12 enero 2018]. URL disponible en: <https://www.paginasiete.bo/sociedad/2016/4/13/colapsa-relleno-sanitario-alto-contamina-villa-ingenio-93061.html>
76. S. Ignacio M, R. Garnica S. PROGRAMA INSTITUTEUCIONAL DE GESTION DE RESIDUOS SOLIDOS Y BIOSEGURIDAD. La Paz-Bolivia: revisado por SWISSCONTACT; 2014.
77. Ximena Ayo. GESTION DE RESIDUOS SOLIDOS EN LA CIUDAD DE EL ALTO. La Paz-Bolivia: expo EMALTE 2014.
78. Gutiérrez A. Los residuos sólidos urbanos. La Paz-Bolivia. Dirección de Medio Ambiente G.A.M.E.A. 2017
79. Análisis Físico Químico. Registro de COLINA SRL y EMALTE administradoras del Relleno sanitario. El Alto; 2015.
80. Análisis físico químico. Compendio. El Alto: Registros de la dirección de control ambiental y residuos. 2015.
81. Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 41. URL disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/file/>
82. Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 43-44. URL disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/file/>
83. Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos. [en línea]. Argentina: Greenpace; 2011. [fecha de acceso 22 octubre 2017]. URL disponible en: <https://www.greenpeace.org/argentina/Global/>
84. Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 48. URL disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/file/>
85. Gasificación por plasma. [en línea]. Republica Checa; S.W.H.group. 2016. [fecha de acceso 12 octubre 2017]. URL disponible en: <https://www.swhgroup.eu/sp-plazmove-zplynovani.html>

86. GASIFIER TECHNOLOGY. [en línea]. Barcelona España: EQTEC;2014.[fecha de acceso 22 octubre 2017]. Pág. 2 URL disponible en: <http://www.eqtec.es/en/business-areas/waste-gasification/eqtec-gasifier-technology>
87. GASIFIER TECHNOLOGY. [en línea]. Barcelona España: EQTEC;2014.[fecha de acceso 22 octubre 2017]. pág. 6. URL disponible en: <http://www.eqtec.es/en/business-areas/waste-gasification/eqtec-gasifier-technology>
88. Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 83-84. URL disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/file/>
89. Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 89 y 95. URL disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/file/>
90. Monje Cillero Beatriz. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. [Proyecto de grado (en línea)]. España: ICAI-Universidad Pontificia Comillas; 2013. Pág. 102. URL disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://finanzascarbono.org/comunidad/mod/file/>
91. Tecnología de gasificación por plasma. [en línea]. Quito-Ecuador: UNIDECO; 2013. [fecha de acceso 9 octubre 2017]. URL disponible: www.unideco.com
92. Bordas y Elías, 2011; IDAE, 2007.
93. Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. [tesis licenciatura]. Medellín-Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía; 2015. Pág. 27. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/2248/1/1128281147.2016.pdf>
94. Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. [tesis licenciatura]. Medellín-Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía; 2015. Pág. 29. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/2248/1/1128281147.2016.pdf>
95. Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. [tesis licenciatura]. Medellín-Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía; 2015. Pág. 31. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/2248/1/1128281147.2016.pdf>

96. M.Iborra, J.Tejero, F.Cunill. Reactores multifasicos. ERQ. [en línea]. 2013. [fecha de acceso 22 octubre 2017]; N° 12 URL disponible en: <https://www.coursehero.com/file/20631753/APUNTES-RM-5/>
97. Juan A. Conesa Ferrer; Diseño de Reactores Heterogéneos. ERQ. [en línea]. 2011. [fecha de acceso 22 octubre 2017]; N°06 Universidad de Alicante SBBN 283, pag. 4-5, disponible en: www.iqcelaya.itc.m.pdf
98. Leven Spiel. Ingeniería de las reacciones químicas. México: Limusa Wiley 3ed; 2004. Pág. 448.
99. Leven Spiel. Ingeniería de las reacciones químicas. México: Limusa Wiley 3ed; 2004. Pág. 451.
100. Leven Spiel. Ingeniería de las reacciones químicas. México: Limusa Wiley 3ed; 2004. Pág. 449.
101. Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. [tesis licenciatura]. Medellín-Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía; 2015. Pag. 66. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/2248/1/1128281147.2016.pdf>
102. Macias Naranjo R. Escalado de reactores de gasificación en lecho fluidizado. [tesis licenciatura]. Medellín-Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Procesos y Energía; 2015. Pag. 66. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/2248/1/1128281147.2016.pdf>
103. C.J. Geankopolis. Procesos de Transporte y operaciones Unitarias. Editorial Continental. Tercera edición. México 1998. Pag. 927.
104. McCabe Smith
105. C.J. Geankopolis. Procesos de Transporte y operaciones Unitarias. Editorial Continental. Tercera edición. México 1998. Pag. 930.
106. Warren L. McCabe. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ta Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. pag.1054-1055
107. Warren L. McCabe. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ta Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. pag.1076
108. Warren L. McCabe. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 7ta Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. pag.1079
109. Ricardo Lucas A. Diseño y modelado virtual de un colector de partículas tipo Scrubber. [tesis de grado]. Guayaquil-Ecuador: Escuela superior politécnica del litoral, 2012.
110. Hypertherm Powermax 105. Plasma arc cutting systems. Service Manual 807580. Revision 1. Hypertherm, Inc., Hanover USA.
111. Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q. y Armijo-de Vega, C. (2009). La tecnología de plasma y residuos sólidos. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-2, pp. 51-56, ISSN: 1665-529X.

ANEXOS

Anexo 1: Costo para una planta comercial de gasificación por plasma llave en mano

Este punto se refiere al costo para una planta comercial de tratamiento de residuos sólidos mediante gasificación por plasma.

Para determinar este costo se contactó a la empresa ALTER NRG que una de sus filiales se encuentra en Colombia mediante correo electrónico.

Se enviaron datos como:

Nombre del proyecto	Conversión de residuos sólidos urbanos mediante la tecnología de plasma
Cantidad de residuos sólidos disponibles o generados	500 ton/día
Precio de venta de la electricidad	45-70 U\$/ MWh
Contenido de energía en materia prima	3960 Btu/lb
Materia prima a procesar por año	150.000 ton/año
Tarifa de electricidad en puerta	0.75 bs/Kwh
Se cuenta con gas natural in situ en caso de emergencia?	si
¿Cuál es el uso posterior planificado del gas de síntesis (Syngas)?	Energía de ciclo combinado
Tipo de residuos a procesar	Residuos sólidos urbanos
Costo de la materia prima	8 U\$/ton
Localización del proyecto	Ciudad de El Alto, Zona Villa Ingenio La Paz Bolivia
A cuantos msnm se construirá el proyecto	3600 msnm
Fuente de financiamiento	Fondos disponibles del municipio

Esa información base fue enviada a a empresa para solicitar una cotización para la construcción y puesta en marcha de una planta de conversión de residuos sólidos

urbanos para generar en este caso energía eléctrica y como un producto intermedio gas de síntesis.

La respuesta recibida fue la siguiente:

Capacidad de procesamiento de la planta	500 ton/día
Venta de energía	70 US \$/ MWh
Tarifa de propina	160 US \$/ MWh
Generación bruta de energía a partir de las 500 ton	17 MW brutos
Generación neta para venta directa al mercado (red eléctrica)	13 MW netos
Costo de instalación, puesta en marcha, capacitación del personal operativo, gastos de estudio, licencias (llave en mano).	US\$ 130-135 millones
Tiempo estimado del retorno de la inversión	4-5 años

Según los datos ofrecidos para la empresa ALTER NRG el proyecto es viable y rentable, por lo que ellos están en la capacidad de instalar y poner en marcha la planta a un costo de 135 millones de dólares.

Por otro lado recogimos datos del costo de disposición final de los residuos sólidos urbanos en el municipio de El Alto.

ITEM	PRESUPUESTO 2015
SERVICIO DE ASEO URBANO EL ALTO	69.055.048,00 Bs
CIERRE DEL RELLENO SANITARIO	3.120.000,00 Bs
TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS	22.033.723,00 Bs
ELABORACION DEL MANIFIESTO AMBIENTAL Y OBTENCION DE LA LICENCIA AMBIENTAL PARA EL RELLENO SANITARIO	75.000,00 Bs
TOTAL	94.283.771,00 Bs

PRESUPUESTO PARA RIESGOS (REVALSES,ETC)	25.423.827,87 Bs
TOTAL PRESUPUESTO EN [Bs]	119.707.598,87 Bs
TOTAL PRESUPUESTO EN [US\$]	17.101.085,40 US\$

El costo total correspondiente a todo el ciclo del tratamiento de los residuos sólidos en la gestión 2015 alcanzo a 17 millones de dólares, lo que tiende a aumentar cada año, con este dato la inversión en una planta procesadora de residuos sólidos es más viable todavía, el municipio no solo gastara en el tratamiento de los residuos sino también percibiría ingresos.

Anexo 2: Sensor de monóxido de carbono MQ-7

El sensor **MQ-7** es un sensor para la detección de monóxido de carbono (CO) para medir la concentración de este gas en el aire. El MQ-7 puede medir concentraciones de gas monóxido entre 20 a 2000 partes por millón (ppm). El sensor MQ-7 posee una alta sensibilidad y rápido tiempo de respuesta. Las conexiones que requiere el sensor son muy básicas solo requiere alimentación de 5V.

El código para determinar CO en ppm es la siguiente:

```

sketch_SENSOR_CO
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  int adc_MQ = analogRead(A0); //Lemos la salida analógica del MQ
  float voltaje = adc_MQ * (5.0 / 1023.0); //Convertimos la lectura en un valor de voltaje
  float Rs=1000*((5-voltaje)/voltaje); //Calculamos Rs con un RL de 1k
  double CO =0.4091*pow(Rs/5463, -1.497); // calculamos la concentración de monoxido de carbono con la ecuación obtenida.
  //-----Enviamos los valores por el puerto serial-----
  Serial.print("adc:");
  Serial.print(adc_MQ);
  Serial.print(" voltaje:");
  Serial.print(voltaje);
  Serial.print(" Rs:");
  Serial.print(Rs);
  Serial.print(" CO:");
  Serial.print(CO);
  Serial.println("ppm");
  delay(100);
}

```

Anexo 3: Sensor de gas MQ-2

El MQ2 es un sensor de gas inflamable y humo que detecta las concentraciones de gas combustible en el aire y emite su lectura como un voltaje analógico. El sensor puede medir concentraciones de gas inflamable de 300 a 10.000 ppm. El sensor de gas MQ-2 es sensible al GLP, i-butano, propano, metano, alcohol, hidrógeno y humo.



Anexo 4: fotos tomadas de los componentes del prototipo



La presión que alcanza el compresor es de 250 PSI, el gas de síntesis será almacenado a esa presión en el tanque.



Armado del filtro de lecho empacado, que en su interior contiene, carbón activado, algodón, y papel filtro bañado en hidróxido de sodio.



Armado del sistema de eliminador de partículas (ciclón separador) y el sistema de arco de plasma en el interior del reactor.



Prototipo en la etapa de ensamblaje y en la etapa de funcionamiento



Sistema de arco de plasma y su conformación dentro del reactor

Anexo 4: Análisis de composición del gas de síntesis



Construyendo un planeta más sustentable



PRAXAIR BOLIVIA., a solicitud verbal de interesado.

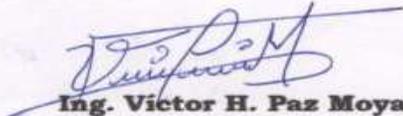
CERTIFICA:

Que los análisis tomados in-situ de los gases de combustión procedentes de un reactor de gasificación por plasma son los siguientes:

Componentes	Composición % vol.
H_2	14.6 %
CH_4	9.8 %
H_2O	0.10 %
CO_2	11.85 %

El análisis de calidad del gas fue lecturado con el analizador de gases de combustión **TESTO 300 M-I/XL-I.**

La Paz, Enero 13 de 2019



Ing. Víctor H. Paz Moya



Construyendo un planeta más sustentable

CONTROL DE CALIDAD PRAXAIR

cc.Archivo

Dirección: Ex tranca, zona Río Seco, Av Luis Espinal #10, El Alto
Teléfono: Tel.: (591-2) 286-0170
Fax: Fax: (591-2) 286-0257

Anexo 5: Análisis de presencia de contaminantes en el gas de síntesis



Construyendo un planeta más sustentable



PRAXAIR BOLIVIA., a solicitud verbal de interesado.

CERTIFICA:

Que los análisis realizados en el laboratorio de calidad con certificación ISO 9001 de la planta, una vez recepcionada la muestra de gas de combustión procedentes de un reactor de gasificación por plasma son los siguientes:

Gas	Valor determinado
SO ₂	0 ug/m ³
H ₂ S	138 ug/m ³
CH ₄ Cl ₂	0,8 mg/m ³
Hg	0 ug/m ³
Partículas suspendidas totales (PST)	92 ug/m ³
HCHO (COV)	110 ug/m ³
NO _x	1,2 ug/m ³

El análisis de presencia de contaminantes fue realizado mediante técnica analítica instrumental, bajo las normativas existentes.

La Paz, febrero 20 de 2019



Ing. Victor H. Paz Moya
CONTROL DE CALIDAD PRAXAIR



Construyendo un planeta más sustentable

cc.Archivo

Dirección: Ex tranca, zona Rio Seco, Av Luis Espinal #10, El Alto
Teléfono: Tel.: (591-2) 286-0170
Fax: Fax: (591-2) 286-0257