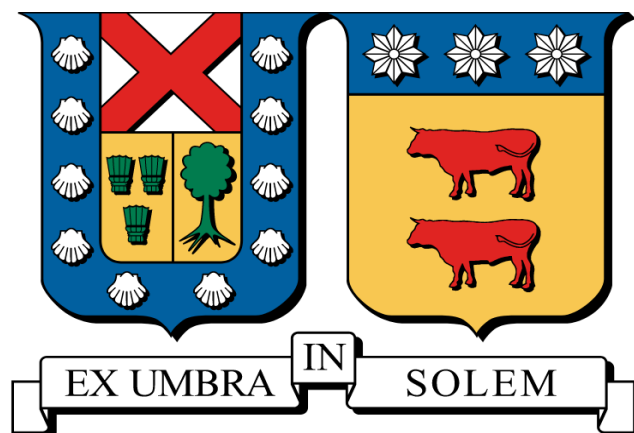


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
REACTOR ROTATORIO DE GASIFICACIÓN
DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS CON APOORTE
SOLAR”**

JONATHAN ANDRÉS SAN MARTÍN AVILÉS

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: PhD. RODRIGO BARRAZA V.

NOVIEMBRE - 2017

1. Resumen

En el marco del proyecto FONDAP “Solar Energy Research Center (SERCChile)”, el objetivo de este trabajo de título consiste en diseñar e implementar un gasificador rotatorio de combustibles sólidos utilizando vapor de agua como agente gasificador y energía solar como aporte energético para la reacción endotérmica de gasificación.

Durante el proceso de diseño de este trabajo, se diseña un reactor a partir de los conocimientos obtenidos del estado del arte de la gasificación solar de hidrocarburos, donde se analizan los diversos diseños de reactores gasificadores propuestos. El enfoque de este trabajo es evaluar y comprobar la hipótesis de que, al utilizar un medio poroso, se mejore la inercia térmica dentro del reactor y se pueda recuperar parte del calor que sale en los gases de síntesis generados lo que se traduciría en un aumento de la eficiencia del proceso de gasificación. El desarrollo de esta tecnología tiene como fin proyectar el uso de hidrocarburos sólidos de forma amigable con el medio ambiente y eficiente en su utilización.

En el desarrollo experimental de este trabajo, se implementa un reactor rotatorio que incorpora en su interior esferas de alúmina junto al carbón y agua necesarios para la gasificación, y que tiene como fuente de energía la radiación concentrada del sol mediante el uso de un disco parabólico. Una vez que los componentes del gasificador se encuentren debidamente ensamblados, se realizan pruebas de 50 [g] de carbón con la misma cantidad en volumen de esferas de alúmina y agregando 100 [g] de agua que al evaporarse actuará como agente gasificante.

El análisis de gases obtenidos entrega como resultado un 27% de H_2 , 4,7% de CO , 23% de CH_4 y 13.1% de CO_2 , además las mediciones de temperatura alcanzan 359 [°C] en la ventana de cuarzo y 156 [°C] como máxima promedio dentro del reactor. Esto demuestra que en el reactor implementado se alcanzan los niveles energéticos requeridos para un proceso de gasificación exitoso donde las reacciones químicas básicas y complejas de gasificación ocurren a lo largo de las pruebas experimentales.

2. Abstract

Under the FONDAP project "Solar Energy Research Center (SERCChile)", the objective of this title work is to design and implement a rotary reactor for the gasification of solid fuels using water vapor as a gasifying agent and solar energy as an energy input for the endothermic reaction of gasification.

For the development of this work, a reactor was designed from the knowledge obtained from the state of the art of the solar gasification of hydrocarbons, where different designs of proposed reactors were analyzed. The research that was developed aims to evaluate and test the hypothesis that, by using a porous medium, the thermal inertia inside the reactor is improved and some of the heat released in the generated synthesis gases can be recovered, which means an increase in the efficiency of the gasification process. The development of this technology aims to project the use of solid hydrocarbons in a friendly way for the environment and efficient in its use.

In the experimental development of this work, a rotary reactor is implemented that incorporates inside alumina spheres next to the coal and water necessary for gasification and whose energy source is the concentrated radiation of the sun through the use of a parabolic disk. Once the systems that make up the gasifier are properly manufactured, 50 [g] carbon tests are carried out with the same volume amount of alumina spheres and adding 100 [g] of water which, when evaporated, will act as a gasifying agent.

The analysis of gases obtained results in 27% of H_2 , 4,7% of CO, 23% of CH_4 y 13.1% of CO_2 , in addition temperature measurements reach 359 [° C] in the quartz window and 156 [° C] as the average maximum inside the reactor. This shows that in the implemented reactor the energy levels required for a successful gasification process are reached where the basic and complex gasification chemical reactions occur throughout the experimental tests.

3. Glosario

[m^2]: Metro cuadrado.

[°C]: Grados Celsius.

[Atm]: Atmósfera.

[g]: Gramos.

[K]: Kelvin.

[kJ]: Kilojoule.

[kW]: Kilowatt.

[m]: Metros.

[mL]: Mililitro.

”: Pulgadas.

Altacimutales: Coordenadas en dos planos, altura y acimut.

ASTM: Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales, contribuye con normas internacionales para materiales.

Azimut: Distancia medida desde el eje norte hacia el este.

Bslmm: Base seca libre de material mineral.

Btu/lb: Unidad de energía (Unidad termal británica) / Unidad de masa (libra) (1 Btu/lb= 2.326 kJ/kg)

Btu/scf: Unidad de energía (Unidad termal británica) / Unidad de volumen (pies cúbicos estandarizado) (1 Btu/scf=37.2589 kJ/ m^3)

Carbonización: Proceso geoquímico que transforma material orgánico (vegetación) en carbón después de millones de años.

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

Carbono fijo (Fixed Carbon): Carbono que queda después de la evaporación del material volátil.

Densidad absoluta: Densidad de un material excluyendo poros y vacíos internos.

Densidad abultada: Densidad de un material incluyendo poros y vacíos internos.

Densidad aparente: Densidad de un material incluyendo poros cerrados e inaccesibles.

Estequiométrico: Punto de equivalencia de una reacción química.

Humedad (Moisture): Agua que impregna un cuerpo o una superficie.

IGCC: Ciclo combinado con gasificación integrada.

Material volátil (Volatile Matter): Compuestos orgánicos que contienen carbono y que se evaporan fácilmente.

Mtep: Millones de tonelada equivalente de petróleo.

PVC: Policloruro de vinilo, derivado del plástico más versátil.

SNG: Gas Natural Sintético.

Solsticio: Días del año en el que el sol alcanza su punto más alto y más bajo en el cielo.

4. Índice

1.	Resumen	2
2.	Abstract	3
3.	Glosario	4
4.	Índice	6
4.1.	Índice de ilustraciones	9
4.2.	Índice de tablas	10
4.3.	Índice de ecuaciones	11
5.	Objetivos	13
5.1	Objetivo General	13
5.2	Objetivo Especifico.....	13
6.	Introducción.....	14
6.1	Motivación	14
7.	Marco Teórico	16
7.1	Gas de Síntesis	16
7.1.1	Formas de obtención.....	17
7.2	Carbón.....	18
7.2.1	Clasificación del carbón.....	18
7.3	Gasificación del carbón	21
7.3.1	Beneficios de la gasificación	22
7.3.2	Proceso químico.....	23
7.3.3	Relación de flujo de aire	24
7.3.4	Temperatura de entrada de los reactantes	25

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

7.3.5	Tipo de gasificadores	26
7.3.5.1	Gasificador de lecho compacto (Packed-bed Gasifier).....	26
7.3.5.2	Gasificador de lecho móvil (Moving-Bed Gasifier)	27
7.3.5.3	Gasificador de lecho fluidizado (Fluidized Bed Gasifier)	29
7.3.5.4	Gasificador de flujo arrastrado (Entrained Flow Gasifier)	30
7.3.6	Gases producto.....	31
7.3.6.1	Gas de Bajo Btu	31
7.3.6.2	Gas de Medio Btu	31
7.3.6.3	Gas de Alto Btu	32
7.3.7	Eficiencia	32
7.3.8	Costos.....	32
7.3.9	Utilización de energía solar	33
7.4	Energía Solar.....	34
7.4.1	Geometría Solar	35
7.4.2	Colectores Solares.....	37
7.4.2.1	Colectores estacionarios	38
7.4.2.1.1	Colector de placa plana.....	38
7.4.2.1.2	Colector parabólico compuesto	39
7.4.2.1.3	Colector de tubo al vacío	40
7.4.2.2	Colectores concentradores.....	41
7.4.2.2.1	Colectores tubular-parabólicos	42
7.4.2.2.2	Colector linear Fresnel.....	42
7.4.2.2.3	Colector de plato parabólico	43
7.4.2.2.4	Colector de campo de heliostatos	44

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

7.5	Medio Poroso.....	46
7.5.1	Tipos de medios porosos.....	48
8.	Tecnología Utilizada	51
8.1	Reactor	51
8.1.1	Sistema de gasificación.....	52
8.1.2	Sistema de acumulación de gases generados	55
8.1.3	Sistema de rotación del reactor	57
8.2	Concentración Solar.....	58
8.3	Sistemas de control y análisis de resultados	60
9.	Desarrollo Experimental.....	65
9.1.	Primera prueba.....	67
9.2.	Segunda prueba.....	67
9.3.	Tercera prueba	68
9.4.	Cuarta prueba.....	69
9.5.	Quinta Prueba	70
9.6.	Sexta Prueba	71
10.	Resultados Obtenidos	72
10.1.	Análisis de gases.....	72
10.1.1.	Primer Análisis.....	72
10.1.2.	Segundo Análisis.....	74
10.2.	Temperaturas	75
10.2.1.	Temperaturas de prueba N° 5.....	75
10.2.2.	Temperaturas de prueba N° 6.....	78
10.3.	Eficiencia	80

11.	Conclusiones	83
12.	Propuestas y Recomendaciones para Trabajos Futuros	85
13.	Referencias.....	87
14.	Anexos	89
14.1.	Anexo 1: Análisis elemental del carbón utilizado	89
14.2.	Anexo 2: Análisis cromatográfico	91
14.3.	Anexo 3: Registro de Temperaturas	92

4.1. Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Proyección de matriz energética mundial. (1)	14
Ilustración 2: Esquema de obtención y utilización del Syngas. (5).	17
Ilustración 3: Formas de producción de Syngas. (5).....	17
Ilustración 4: Grados del carbón (6).....	19
Ilustración 5: Gasificador de lecho compacto (9)	27
Ilustración 6: Gasificador de lecho móvil. (10)	28
Ilustración 7: Gasificador de lecho fluidizado. (10).....	29
Ilustración 8: Gasificador de flujo arrastrado. (10).....	30
Ilustración 9: Latitud y Longitud.	36
Ilustración 10: Trayectoria solar durante el año.....	37
Ilustración 11: Colector de placa plana (vista en despiece) (14).	39
Ilustración 12: Esquema colector parabólico compuesto (14).	40
Ilustración 13: Esquema colector de tubo al vacío (14).	41
Ilustración 14: Colector parabólico con receptor tubular (14).	42
Ilustración 15: Esquema reflector linear Fresnel (14).....	43
Ilustración 16: Colector de plato parabólico (14).	44
Ilustración 17: Colector de campo de heliostatos (14).....	45

Ilustración 18: Vista esquemática en corte de un material poroso. (15)	46
Ilustración 19: Esferas de óxido de aluminio de distintos diámetros.....	50
Ilustración 20: Espuma de carburo de silicio con distinta porosidad.....	50
Ilustración 21: Reactor fabricado.....	53
Ilustración 22: Ventana de cuarzo.....	54
Ilustración 23: Fibra cerámica.....	55
Ilustración 24: Componentes de junta rotatoria.....	56
Ilustración 25: Sistema de acumulación de gases con trampa de agua.....	56
Ilustración 26: Sistema de rotación.....	58
Ilustración 27: Disco parabólico con soporte del reactor.....	60
Ilustración 28: Termocupla tipo K.....	61
Ilustración 29: Adquisidor de datos Omega OMB-DAQ-54.....	62
Ilustración 30: Esquema de un cromatógrafo de gases. (16)	63
Ilustración 31: Cromatógrafo PerkinElmer Clarus 580.....	64
Ilustración 32: Reactor en operación.....	66
Ilustración 33: Cromatograma obtenido de la muestra de 0,2 mL de la quinta prueba.	73
Ilustración 34: Cromatograma obtenido de la muestra de 0,2 mL de la sexta prueba.	74
Ilustración 35: Gráfico de temperatura vs tiempo por termocupla en quinta prueba..	76
Ilustración 36: Gráfico temperatura promedio vs tiempo en quinta prueba.....	77
Ilustración 37: Gráfico de temperatura vs tiempo por termocupla en sexta prueba....	79
Ilustración 38: Gráfico temperatura promedio vs tiempo en sexta prueba.....	79

4.2. Índice de tablas

Tabla 1: Rangos del carbón por norma ASTM D388.....	20
Tabla 2: Análisis elemental por rangos del carbón norma ASTM D388.....	21
Tabla 3: Resumen características por tipo de colector.....	45
Tabla 4: Propiedades térmicas de medios porosos.....	49

Tabla 5: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,2 [mL] de muestra obtenida en cuarta prueba.	72
Tabla 6: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,2 [mL] de muestra obtenida en sexta prueba.	74
Tabla 7: Temperaturas máximas y promedio obtenidas en la operación del reactor en la quinta prueba.	76
Tabla 8: Temperaturas máximas y promedio obtenidas en la operación del reactor en la sexta prueba.	78
Tabla 9: Propiedades de los componentes del syngas generado en la cuarta prueba.	81
Tabla 10: Poder calorífico por componente y total en el gas analizado.	81
Tabla 11: Energía aportada a la gasificación.	82
Tabla 12: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,2 [mL] de la cuarta prueba.	91
Tabla 13: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,1 [mL] de la cuarta prueba.	91
Tabla 14: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,05 [mL] de la cuarta prueba.	91
Tabla 15: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,08 [mL] de la cuarta prueba.	91
Tabla 16: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,08 [mL] de la sexta prueba.	92
Tabla 17: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,08 [mL] de la sexta prueba.	92
Tabla 18: Registro de temperaturas quinta prueba.	92
Tabla 19: Registro de temperaturas y radiación sexta prueba.	95

4.3. Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Reacción química en la pirólisis.	23
Ecuación 2: Conversión básica endotérmica gasificación del carbón.	23

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

Ecuación 3: Conversión básica endotérmica gasificación del carbón.	23
Ecuación 4: Intercambio gas-agua. (5).....	24
Ecuación 5: Metanización. (5)	24
Ecuación 6: Gasificación con hidrógeno. (5).....	24

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Diseñar y construir un reactor rotatorio de gasificación solar para verificar su funcionamiento.

5.2 Objetivo Especifico

1. Diseñar e implementar un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos en mezcla con un medio poroso (esferas de alúmina).
2. Diseñar e implementar un sistema de radiación solar directa concentrada que considere el uso de un heliostato.
3. Acoplar el reactor rotatorio y el sistema de radiación solar, con los sistemas de control y medición de flujos, temperaturas y gases producidos.
4. Medir experimentalmente la composición de los gases producidos (H_2 y CO principalmente).
5. Evaluar la eficiencia del sistema solar-gasificador.

6. Introducción

6.1 Motivación

Día a día los países necesitan más energía eléctrica, por lo que más recursos son utilizados en generarla, sin embargo, se ha hecho imprescindible buscar fuentes de energías que den autonomía y mejor calidad de vida, es así como las energías renovables no convencionales (ERNC) han tomado un papel protagónico los últimos años al cumplir con los requisitos necesarios para su utilización dentro de los países más desarrollados. Sin embargo, aún no es posible depender 100% de las energías renovables por lo que la utilización de combustibles fósiles sigue siendo la base de la matriz energética mundial.

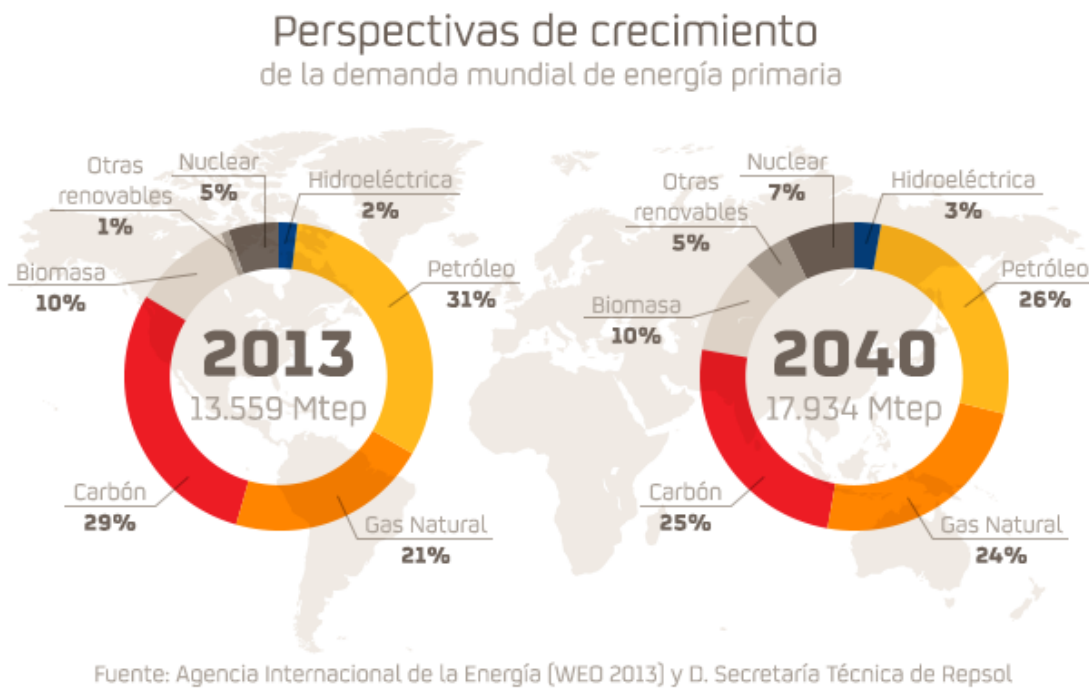


Ilustración 1: Proyección de matriz energética mundial. (1)

Bajo los combustibles fósiles es donde encontramos al carbón, un mineral utilizado de hace más de dos siglos y cuyas reservas se estiman que puedan abastecer la energía mundial por aproximadamente 150 años (2), el cual, por la tecnología existente hoy en día, se estima que al año 2040 su uso será de un 25% en la matriz energética mundial (1). Lamentablemente, el uso del carbón presenta una alta emisión de tanto gases de invernadero como de material particulado por lo que cada vez se prefieren más las ERNC que el carbón.

Es gracias a la necesidad de encontrar formas de producir energía de forma más limpia, de utilizar recursos que son más abundantes y de menor costo, que podemos encontrar la gasificación del carbón como una de las alternativas más atractivas, ya que se produce un gas llamado gas de síntesis, el cual es altamente energético y que al combustionar genera contaminaciones significativamente menores que la combustión del carbón. Un gasificador moderno, es capaz producir un gas de síntesis con un 75% del poder calorífico total del carbón gasificado, mientras que el 15% puede ser recuperado del calor sensible del gas de síntesis que se enfría antes de almacenar, y el restante 10% se queda en los restos minerales no combustibles del carbón y en las pérdidas de calor del proceso (3), esto sin contar el carbón combustionado para proveer el aporte energético necesario para la gasificación.

Ante la posibilidad de mejorar la eficiencia del proceso es donde surge la idea de implementar un medio poroso que significaría una mejora en las condiciones de operación de un gasificador actual, además al utilizar como aporte energético la energía solar, se obtendría una disminución de los costos y un aumento en la eficiencia del proceso. Es así como el presente informe pretende realizar un estado del arte de la tecnología e implementar un gasificador que demuestre la producción de gas de síntesis utilizando las mejoras antes mencionadas.

7. Marco Teórico

7.1 Gas de Síntesis

El Syngas o gas de síntesis (Synthesis gas), es un gas combustible compuesto por una combinación de hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono en proporciones variables, su nombre se debe a que es un gas sintético que se utiliza para la generación de otros productos químicos, sin embargo, se le puede conocer bajo distintos nombres según su procedencia o aplicación como lo es “gas de agua”, “gas de craqueo”, “gas para síntesis de metanol” o “oxo-gas” (4). Este gas puede ser obtenido de varias fuentes como el gas natural, carbón, biomasa y prácticamente cualquier materia prima compuesta de hidrocarburos. El syngas presenta generalmente una composición de 20-40% de hidrógeno (H_2), 35-40% de monóxido de carbono (CO), 25-35% de dióxido de carbono (CO_2), 0-15% de metano (CH_4) y 2-5% de nitrógeno (N_2).

Los usos principales del syngas son:

- Generación de energía eléctrica, mediante la combustión en motores de combustión interna, generación de vapor en calderas para turbinas de vapor y celdas o pilas de combustibles.
- Obtención de hidrógeno.
- Producción de gas natural sintético (SNG).
- Producción de metanol.
- Producción de amoníaco.
- Producción de combustibles de hidrocarburos sintéticos.

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

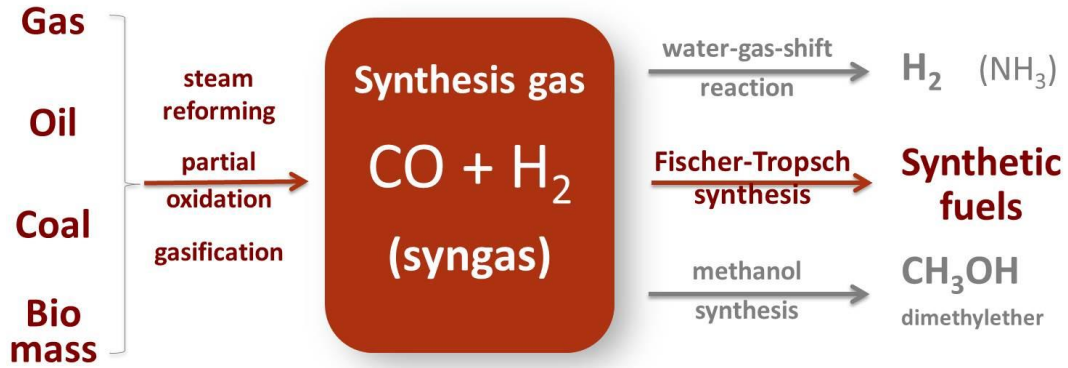


Ilustración 2: Esquema de obtención y utilización del Syngas. (5).

7.1.1 Formas de obtención

Para obtener el gas de síntesis es necesario proceso químico el cual es altamente endotérmico como lo son la reformación de vapor de agua, la gasificación de carbón, biomasa, etc. o la reformación de gas natural o hidrocarburos líquidos, como también de desechos de procesos industriales, oxidación parcial y oxidación catalítica parcial. Para lograr estas reacciones químicas son necesarios tres componentes principales que son el combustible a gasificar o reformar, el agente gasificante y la energía necesaria para la reacción endotérmica.

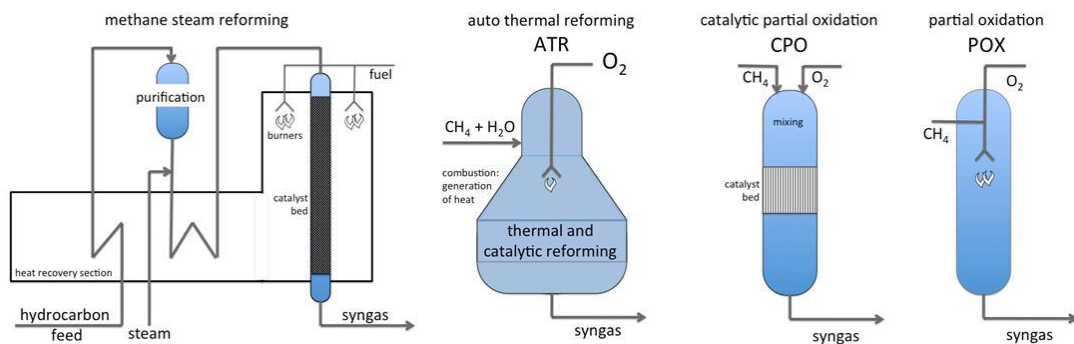


Ilustración 3: Formas de producción de Syngas. (5)

7.2 Carbón

El carbón es un combustible de composición química y físicamente heterogénea, que es una roca sedimentada de materiales orgánicos e inorgánicos. Orgánicamente, está compuesto de carbón, hidrógeno y oxígeno, con menores cantidades de sulfuro y nitrógeno, mientras que la parte inorgánica consiste en una diversidad de compuestos que forman la ceniza luego de su combustión. Las concentraciones de material inorgánico varían dependiendo de la calidad del carbón.

Este combustible sólido es encontrado en depósitos originados por la acumulación de vegetación que ha sufrido cambios físicos y químicos a través del tiempo. El carbón difiere en su composición alrededor del mundo debido a la variación de la vegetación que fue depositada, del grado de carbonización y de la cantidad de impurezas que lo componen.

7.2.1 Clasificación del carbón

Existen diversas clasificaciones del carbón que se han inventado desde hace más de 180 años, sin embargo, existe una clasificación que nos compete es llamado el grado del carbón, que es un indicador de maduración del carbón, es decir, de la extensión de carbonización que ha sufrido. Una de las características que más difiere entre un grado de carbón y otro es el porcentaje de carbono fijo como de material volátil que componen al carbón. Otra diferencia es el poder calorífico que tiene cada grado. En la Ilustración 1 se puede ver dos gráficos con los distintos grados el carbón que en el gráfico (a) está su poder calorífico y en el (b) su composición.

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

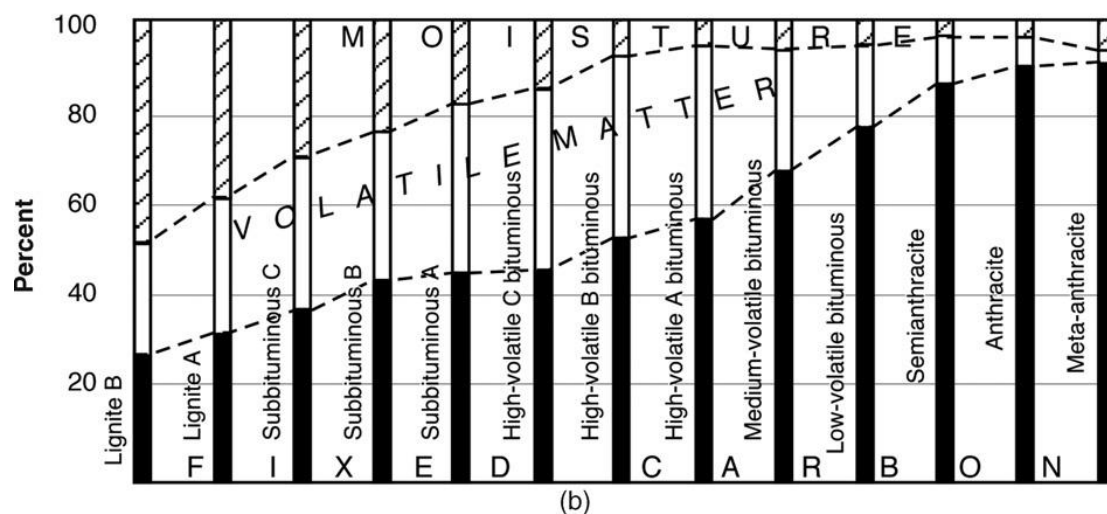
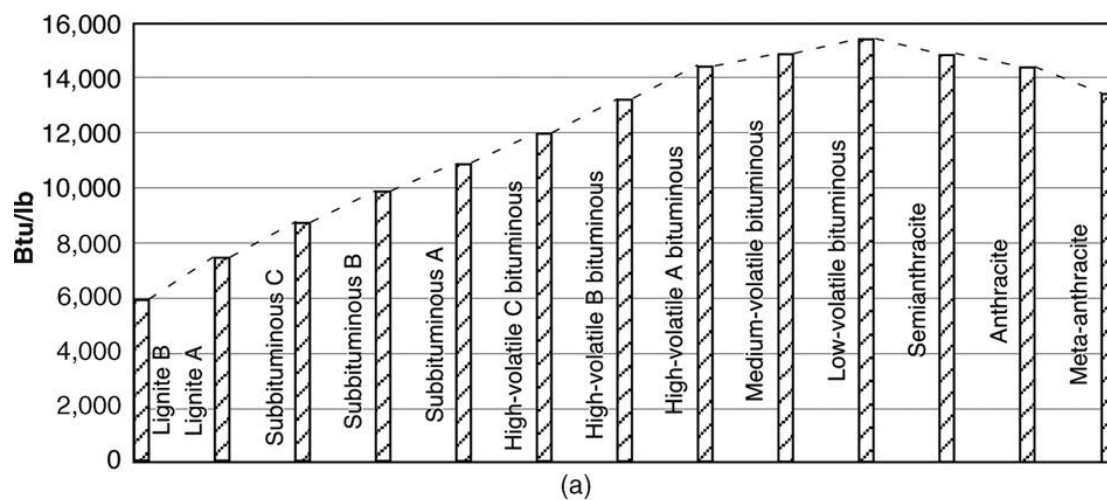


Ilustración 4: Grados del carbón (6).

Ya con la idea de la clasificación podemos introducir la norma utilizada comúnmente a nivel internacional para la comercialización del carbón, esta norma es la ASTM D388 que clasifica al carbón en cuatro clases principales: Lignitos, Sub bituminosos, Bituminosos y Antracíticos, cada uno con distintas cantidades de carbono fijo, material volátil y poder calorífico como se puede ver en la Tabla 1.

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

Tabla 1: Rangos del carbón por norma ASTM D388.

Clase	Límites de Carbono fijo / %m, bslmm		Límites de Materia Volátil / %m, bslmm		Límites de Poder Calorífico Btu/lb / %m, bhlmm		Carácter Aglomerante
	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	Igual o mayor que	Menor que	
Antracíticos							
Meta-antracita	98	----	----	2	----	----	No aglomerante
Antracita	92	98	2	8	----	----	
Semiantracita	86	92	8	14	----	----	
Bituminosos							
Bituminoso Bajo Volátil	78	86	14	22	----	----	Comúnmente aglomerante
Bituminoso medio volátil	69	78	22	31	-----	-----	
Bituminoso alto Volátil A	----	69	31	----	14000		
Bituminoso alto Volátil B	-----	-----	-----	-----	13000	14000	
Bituminoso alto Volátil C	-----	-----	-----	-----	11500	13000	
Subbituminosos							
Subbituminoso A	-----	-----	-----	-----	10500	11500	No aglomerante
Subbituminoso B	-----	-----	-----	-----	9500	10500	
Subbituminoso C	-----	-----	-----	-----	8300	9500	
Lignitos							
Lignito A	----	----	----	----	6300	8300	No aglomerante
Lignito B	----	----	----	----	----	6300	

Un análisis elemental de cada tipo se hace necesario para nuestro propósito por lo que podemos verla en la Tabla 2.

Tabla 2: Análisis elemental por rangos del carbón norma ASTM D388.

Clase	Materia Volátil / %m	Hidrogeno / %m	Carbono / %m	Oxigeno / %m	C/H	C+H/O
Antracíticos						
Meta-antracita	1,8	2,0	94,4	2,0	46,0	50,8
Antracita	5,2	2,9	91,0	2,3	33,6	42,4
Semiantracita	9,9	3,9	91,0	2,8	23,4	31,3
Bituminosos						
Bituminoso Bajo Volátil	19,1	4,7	89,9	2,6	19,2	37,5
Bituminoso medio Volátil	26,9	5,2	88,4	4,2	16,9	25,1
Bituminoso alto Volátil A	38,8	5,5	83,0	7,3	15,0	13,8
Bituminoso alto Volátil B	43,6	5,6	80,7	10,8	14,4	8,1
Bituminoso alto Volátil C	44,6	4,4	77,7	13,5	14,2	6,2
Subbituminosos						
Subbituminoso A	44,7	5,3	76,0	16,4	14,3	5,0
Subbituminoso B	42,7	5,2	76,1	16,6	14,7	5,0
Subbituminoso C	44,2	5,1	73,9	19,2	14,6	4,2
Lignitos						
Lignito A	46,7	4,9	71,2	21,9	14,5	3,6

7.3 Gasificación del carbón

Se le llama gasificación del carbón al proceso que transforma el carbón sólido en una mezcla de gases combustibles independientemente del proceso utilizado en los cuales el C, H, O, y también impurezas como S y N reaccionan con un medio gaseoso para formar los gases productos (CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 , entre otros). El proceso es típicamente función de la temperatura, presión, composición del medio gasificador y naturaleza del carbón utilizado. A pesar de que el producto principal de este proceso es el gas de síntesis (syngas) también se pueden generar combustibles gaseosos y otros productos químicos de gran valor como también materia prima petroquímica.

Para llevar a cabo este proceso es necesario calentar el carbón ya sea por la combustión de parte de este o por una fuente externa de calor, luego un medio gaseoso

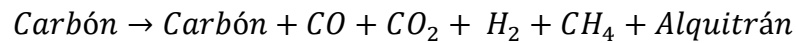
pasa a través del carbón calentado para producir las reacciones químicas debido al contacto molecular entre ambos medios. El medio gaseoso que se utiliza puede ser aire, oxígeno o vapor de agua, los cuales entregan distinta composición de los gases resultantes. Dentro de los productos obtenidos se encuentran gases que no son deseados ya sea por su calidad como combustible o debido a que son altamente contaminantes, es por eso que es necesario el acondicionamiento de los gases los cuales son realizados en conjunto con la aplicación final de los gases los cuales son utilizados principalmente para la generación de energía eléctrica, al igual que, la producción de syngas, la producción de hidrógeno o la síntesis de combustibles líquidos.

7.3.1 Beneficios de la gasificación

Hoy en día la economía mundial depende de mayoritariamente de líquidos y gases combustibles fósiles, los cuáles al ser utilizados producen una gran cantidad de contaminantes y que con el pasar de los años serán cada vez más escasos, por lo que es de vital importancia el encontrar alternativas a estos combustibles. Una alternativa es el carbón, que es un combustible sólido abundante alrededor del planeta, y que mediante el proceso de gasificación es posible producir combustibles líquidos y gaseosos tanto para el transporte como industrias térmicas y de producción de químicos. En la actualidad, el carbón es utilizado principalmente para la producción de energía eléctrica, sin embargo, la combustión de éste presenta una gran contaminación al medio ambiente, por lo que si se utiliza la gasificación como parte del proceso es posible obtener altas eficiencias al ser posible la integración de una turbina a gas en conjunto con la turbina a vapor, como también el cumplimiento de las más exigentes normas medio ambientales. Por lo que la gasificación es una alternativa más limpia, versátil y de buena eficiencia en la que se pueden gasificar carbones de los grados más bajos, por lo que es una tecnología que tiene una gran posibilidad de desarrollo aquí al futuro.

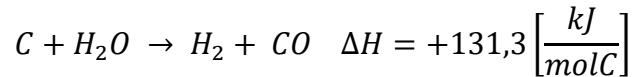
7.3.2 Proceso químico

El proceso de gasificación del carbón consiste en 2 fases, la pirolisis y la gasificación del carbón. La pirolisis consiste en la descomposición del carbón cuando es calentado en ausencia de aire y requiere de poca cantidad de calor que es solamente necesario para alcanzar la temperatura de pirolisis que es entre 400 [°C] y 900 [°C]. La reacción química de esta fase es la siguiente:

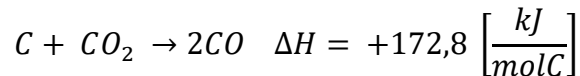


Ecuación 1: Reacción química en la pirólisis.

Una vez completada esta fase viene la gasificación del carbón que tiene mayor importancia y criticidad en el proceso, por lo que controla la eficiencia del gasificador. En esta fase se requiere de mayor tiempo y de mayor calor debido a que las reacciones que ocurren son endotérmicas utilizando ya sea vapor de agua o CO_2 en las que se obtienen las siguientes reacciones químicas:



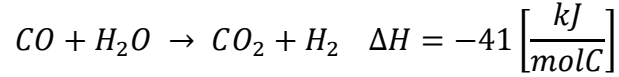
Ecuación 2: Conversión básica endotérmica gasificación del carbón.



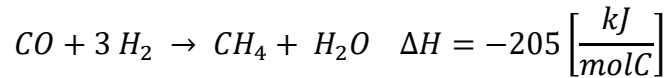
Ecuación 3: Conversión básica endotérmica gasificación del carbón.

Para la obtención de una velocidad razonable de reacción es necesario que ocurran a temperaturas entre 1000 [K] y 1200 [K]. Para la gasificación con vapor de agua la reacción (Ecuación 2) ocurre mayoritariamente a temperaturas mayores a 1000 [K] mientras que la reacción (Ecuación 3) a temperaturas menores a 1000 [K]. (7)

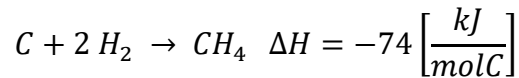
Existen también otras reacciones químicas que pueden ocurrir en un proceso de gasificación de las cuales son importantes destacar las siguientes:



Ecuación 4: Intercambio gas-agua. (8)



Ecuación 5: Metanización. (8)



Ecuación 6: Gasificación con hidrógeno. (8)

Generalmente para favorecer la producción de metano se necesitan altas presiones (>70 [atm]) y relativamente bajas temperaturas (760-930 [°C]), mientras que para favorecer la producción de syngas se necesitan bajas presiones y altas temperaturas, mediante el uso de vapor de agua como medio gasificador o CO_2 .

7.3.3 Relación de flujo de aire

Uno de los parámetros de operación más importantes es la relación de flujos de aire, que tiene un efecto significativo en el nivel de reformación de los compuestos, en el nivel de temperatura en el reactor y en la estabilidad de la reacción. Para lograr la gasificación es necesario que el oxígeno suministrado sea inferior al estequiométrico siendo una forma de cuantificar la cantidad de aire inyectada con respecto a la cantidad de combustible a gasificar es mediante precisamente la relación de flujo de aire (ϕ).

Esta relación es el inverso de la relación de aire estequiométrico (λ) que es la relación del volumen de aire suministrado con el volumen de aire estequiométrico.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} = \frac{\dot{V}_{a,e}}{\dot{V}_{a,real}}$$

Ecuación 4: Relación de flujo de aire.

A medida que ϕ aumenta el rango de operación estable disminuye, como también la liberación de energía al disminuir la combustión del combustible a gasificar (no necesario en el gasificador solar) lo que produce un incremento en la formación de hidrógeno y monóxido de oxígeno. Sin embargo, si ϕ aumenta demasiado resulta en la formación de hollín lo que disminuye la producción de syngas. El ϕ crítico donde la eficiencia del proceso disminuye depende mayoritariamente de la estructura y complejidad del combustible utilizado, como también de la temperatura de precalentamiento, estructura del medio poroso y sus propiedades térmicas. Si el medio poroso utilizado tiene buena conducción térmica y alta radiación, la temperatura de precalentamiento se verá aumentada lo que conlleva a una mejora en la producción de hidrógeno. Por lo que, tomando resultados de investigaciones realizadas, se puede obtener una mejor obtención de hidrógeno en la gasificación con relaciones de flujos de aire entre 2-3, que es una buena aproximación como base para la realización de las pruebas futuras.

7.3.4 Temperatura de entrada de los reactantes

La temperatura de entrada tanto del medio gasificador como del combustible a gasificar afecta directamente la temperatura de reacción y por lo tanto la cinética de las reacciones. Al haber una mayor velocidad de las reacciones, el equilibrio en la

gasificación del combustible es alcanzado más rápido lo que disminuye la formación de gases indeseados en el proceso como lo es la formación del hollín.

7.3.5 Tipo de gasificadores

Los gasificadores de carbón se clasifican en cuatro categorías principales, según la forma en que entran y/o salen los flujos de estos, las que son: Gasificador de lecho compacto, Gasificador de lecho móvil, Gasificador de lecho fluidizado y Gasificador de flujo arrastrado.

7.3.5.1 Gasificador de lecho compacto (Packed-bed Gasifier)

Este tipo de gasificador tiene como característica principal, el que el combustible a gasificar se encuentra estacionario en el lecho, este puede estar o no estar acompañado de algún catalizador que favorezca la reacción química. El objetivo de tener un lecho compacto es el favorecer el contacto del combustible con el agente gasificante, ya que este ingresa por un lado y pasa a través del combustible por lo que por el otro lado salen los gases productos.

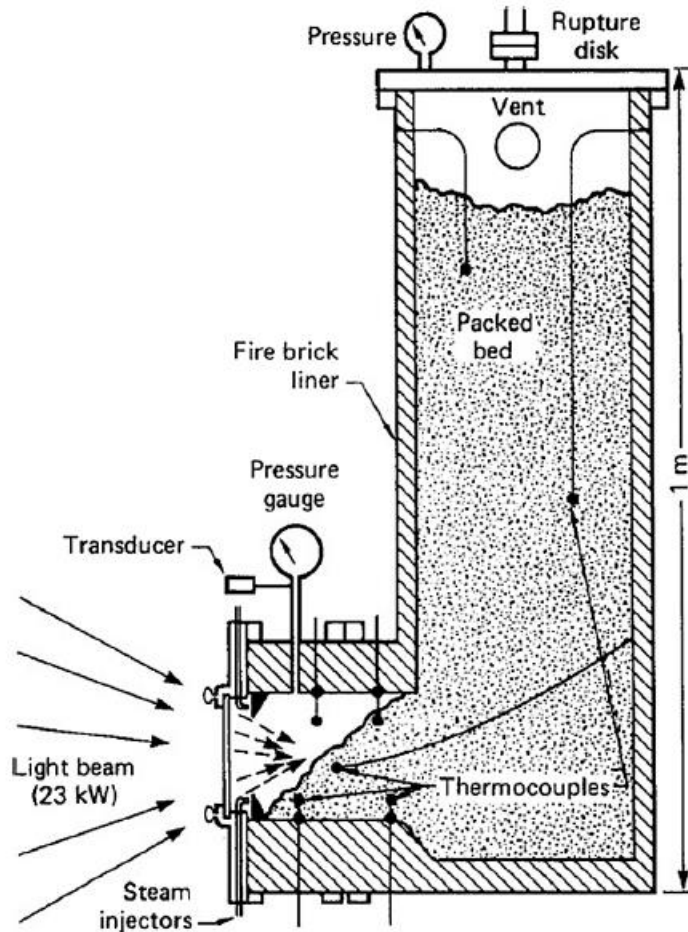


Ilustración 5: Gasificador de lecho compacto (9)

7.3.5.2 Gasificador de lecho móvil (Moving-Bed Gasifier)

También llamado Gasificador de lecho fijo, es el primer tipo de gasificador que es utilizado actualmente. Lurgi fue el primero en desarrollar un reactor de este tipo en el año 1927. Se caracteriza principalmente por tener un lecho de reacción donde el carbón desciende lentamente debido a la gravedad, y el cual es gasificado por un flujo de gas (oxígeno, aire o vapor) desde la parte inferior y los gases producto se sacan de la parte superior. En este reactor, la temperatura es mayor en la parte inferior y menor en la parte superior donde se produce la desvolatilización del carbón. El tiempo de residencia

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

del carbón es alto para favorecer el contacto entre los reactantes. La remoción de ceniza se realiza por la parte inferior del reactor. Una característica importante del gasificador Lurgi de fondo seco es el bajo consumo de oxígeno, pero una alta demanda de vapor. En este tipo de gasificador es necesaria la utilización de carbón entre 6 a 50 [mm] de diámetro de partícula. Con el uso de carbones que tienden a apelmazarse se debe incorporar un agitador con el fin de evitar que estos se peguen a la superficie del lecho.

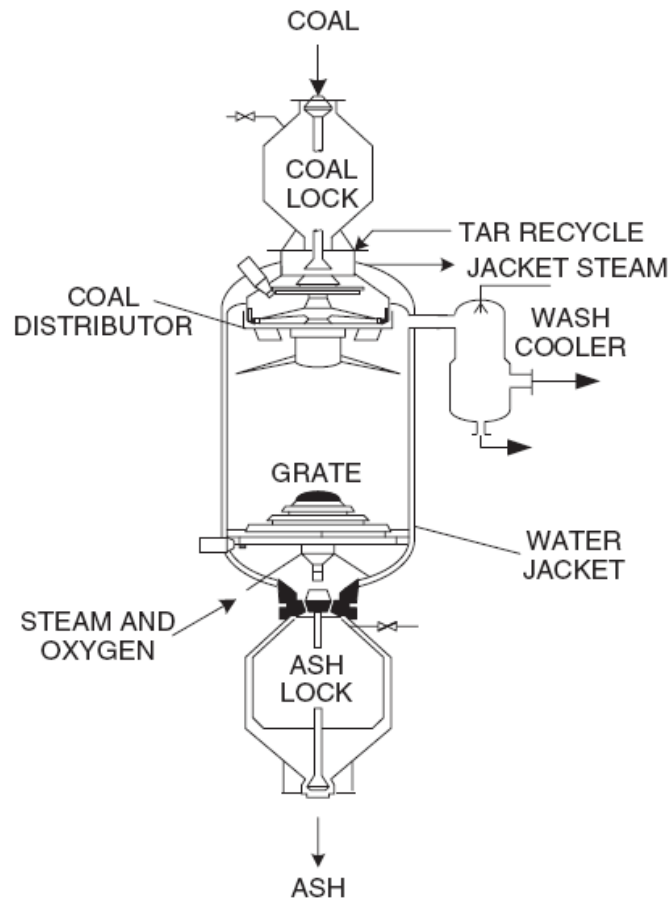


Ilustración 6: Gasificador de lecho móvil. (10)

7.3.5.3 Gasificador de lecho fluidizado (Fluidized Bed Gasifier)

Este tipo de gasificador ofrece una excelente transferencia de calor y masa debido a la intensa mezcla que se produce en el interior. Es necesaria la utilización de carbón pulverizado el cual asciende debido al flujo del medio gasificador, lo que favorece el contacto con las partículas y así promover la reacción química. Por otra parte, las partículas tienen una gran variación de residencia en el lecho, por lo que partículas que aún no han reaccionado son removidas junto a las cenizas las cuales son removidas constantemente del reactor las cuales debido a la gran temperatura de operación pueden salir como aglomerados. El mejor gasificador de este tipo ofrece una conversión del carbón de un 97%, mientras que los otros tipos de gasificadores ofrecen conversiones de un 99%.

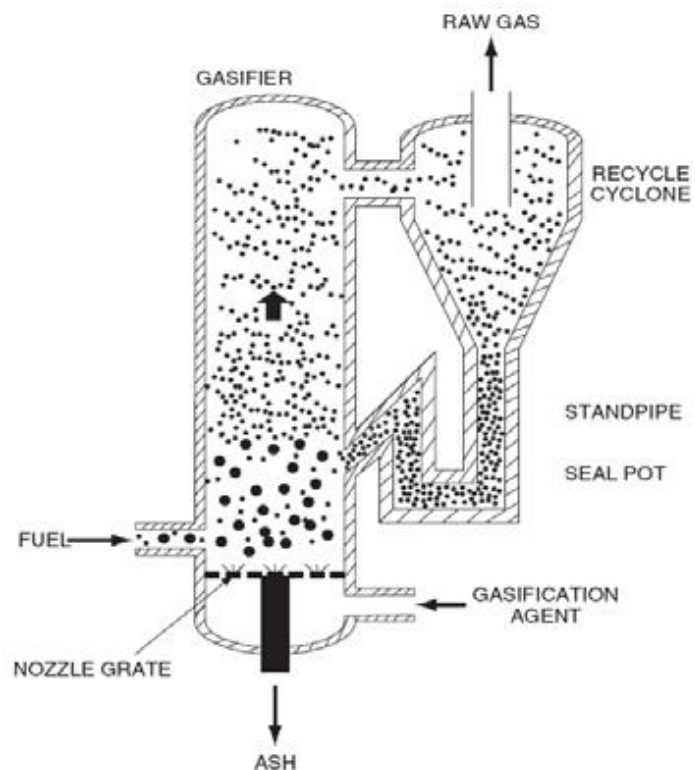


Ilustración 7: Gasificador de lecho fluidizado. (10)

7.3.5.4 Gasificador de flujo arrastrado (Entrained Flow Gasifier)

La ventaja de este tipo de gasificador es la habilidad de poder utilizar cualquier tipo de carbón y producir gas limpio sin alquitrán. Adicionalmente, la ceniza producida es inerte. Estas ventajas se ven penalizadas por un esfuerzo mayor en la preparación del carbón (pulverización del carbón) y un alto consumo de oxígeno, especialmente en el caso de carbones con alta humedad y alto porcentaje de cenizas, al igual que en la utilización de lodos carbón-agua. Por lo general este tipo de gasificador funciona a presiones entre 20 a 70 [bar] como también a altas temperaturas, más de 1400 [°C]. Debido a que opera a altas temperaturas necesita poco tiempo de residencia del carbón para una correcta conversión, por lo que la velocidad de las partículas y del medio gasificador es alta. Esta tecnología es la utilizada en la mayor cantidad de planta de ciclo combinado con gasificación de gas integrado (IGCC).

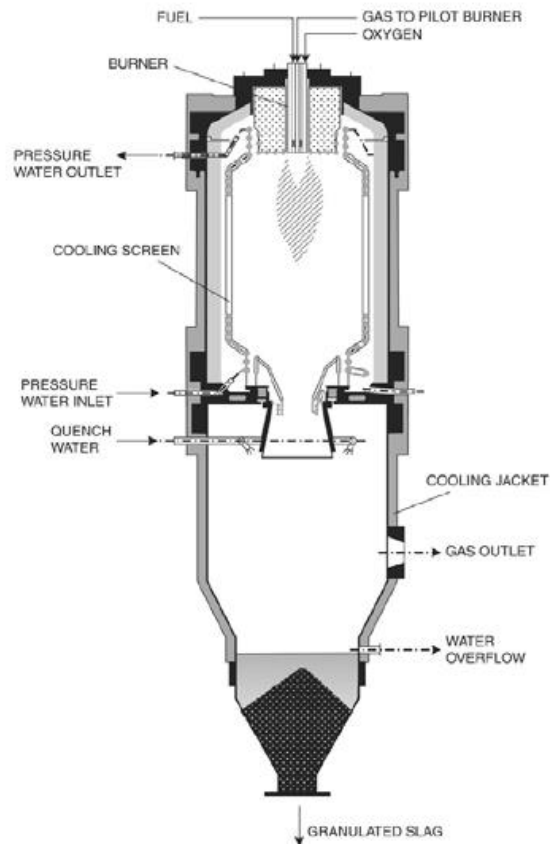


Ilustración 8: Gasificador de flujo arrastrado. (10)

7.3.6 Gases producto

El syngas producido en la gasificación del carbón se puede clasificar según su poder calorífico por lo que podemos clasificarlo en tres tipos, Gas de Bajo Btu, Gas de Medio Btu. Gas de Alto Btu. (11)

7.3.6.1 Gas de Bajo Btu

Consiste en una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, trazas de metano y gases nitrosos, este tiene un poder calorífico típico ente 150 a 300 [Btu/scf]. Para la producción de este gas se utiliza típicamente aire como agente gasificador, lo que resulta en que el gas contenga altas concentraciones de constituyentes indeseables como el nitrógeno o compuestos que contengan nitrógeno lo que se traduce en el bajo poder calorífico. La presencia de componentes indeseables limita la aplicación para la síntesis de químicos. El componente más indeseado es el hidróxido de sulfuro (H_2S), que es resultante del contenido de sulfuro del carbón utilizado y el cual debe ser eliminado mediante procesos de limpieza del gas.

7.3.6.2 Gas de Medio Btu

Este gas consiste en una mezcla de metano, monóxido de carbono, hidrógeno entre otros gases, y tiene un poder calorífico entre 300 a 700 [Btu/scf]. Para producir este gas es necesario usar oxígeno puro como gasificador que es lo que produce el aumento del Btu. Este gas se utiliza principalmente para la síntesis de metanol, hidrocarburos superiores y una gran variedad de otros químicos. También puede ser utilizado como combustible para turbinas o para generar vapor. En este gas la relación de hidrógeno-oxígeno varía entre 3:1 a 2:3.

7.3.6.3 Gas de Alto Btu

En este gas predomina la presencia de metano (>95%) con un poder calorífico de aproximadamente 1000 [Btu/scf], es por esto que también se le llama gas natural sintético (SNG). Este gas usualmente es producido por una reacción catalizadora del monóxido de carbono y el hidrógeno, a lo que se le llama reacción de metanización, para este proceso se introduce el syngas con una relación de hidrógeno-monóxido de carbono de 3:1 idealmente y también vapor de agua para disminuir el ensuciamiento por carbono, lo que altera la efectividad catalizadora. Para la metanización se utilizan metales con efecto catalítico, como lo es el níquel, hierro entre otros.

7.3.7 Eficiencia

Dependiendo del tipo de gasificador utilizado y del tipo de gas a producir, la eficiencia en la conversión puede variar en un rango de 70-75%. Esta eficiencia se espera que aumente con el avance desarrollado en los últimos años pudiendo llegar a 80-85%.

7.3.8 Costos

Los costos dependen mayoritariamente del costo del combustible a utilizar, al igual que el tipo de tecnología utilizada y si las manufacturas de ciertos equipos se realizan de manera local. Una forma de reducir los costos es mediante la utilización en plantas de gasificación integrada de ciclo combinado (IGCC), ya que se eliminarían varias etapas de acondicionamiento y limpieza de los gases producto que suben los costos de operación.

7.3.9 Utilización de energía solar

Debido a que la mayoría de los procesos químicos de la gasificación del carbón son endotérmicos, es necesaria la adición de grandes cantidades de calor para lograrlo. La mayoría de los procesos actuales queman una porción del carbón para la generación del calor requerido lo que hace necesario una mayor cantidad de carbón, lo que aumenta costos y baja la eficiencia del proceso, además de aumentar los niveles de dióxido de carbono en el gas. Es por eso que, en la búsqueda de una fuente externa de calor, la energía solar aparece como la mejor alternativa a utilizar, ya que presenta diversas ventajas en comparación con la combustión de carbón u otros combustibles. Algunas de estas ventajas son:

- Almacenamiento de energía solar en forma química.
- Transporte de energía solar desde regiones de alta radiación solar a otras regiones con menor radiación.
- Uso del producto para la producción de combustibles líquidos o para químicos.
- Conservación de recursos no renovables.
- Disminución de la polución ambiental.
- Eliminación de generadores de oxígeno de alto costo.
- Reducción de importaciones de gas y petróleo.

Se ha demostrado que aproximadamente el 70% de la energía solar es almacenada químicamente en los gases producto (aproximadamente 300 [Btu/scf]), por lo que el gas obtenido tiene mayor poder calorífico que el carbón inicial. Debido a que no es necesaria la combustión del carbón es posible reducir en un 10% el consumo de este, además de los costos de las unidades de gasificación al procesarse menor cantidad de carbón. (12)

7.4 Energía Solar

La energía es considerada el primer agente de generación de riqueza y un factor significativo en el desarrollo económico. Es así como la definición más aceptada de desarrollo sostenible es: “Desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de futuras generación de satisfacer sus propias necesidades”. Pero hoy en día la fuente de energía que más se utiliza en el mundo son los derivados del petróleo y el gas natural, los cuales debido a las tasas de consumo actuales estos dejarían de suplir la demanda en 40 y 60 años, respectivamente. En el caso el carbón la situación es más favorable, con reservas que podrían ser utilizadas por al menos los siguientes 250 años. Otro de los problemas que se presentan es la degradación medio ambiental que provocan estos recursos los cuales son tres reconocidos internacionalmente, estos son la lluvia ácida, el agotamiento de la capa de ozono y el cambio climático global. Es por eso que es necesario encontrar formas de generación energética que si garanticen un desarrollo sostenible.

Una de las fuentes más abundantes de energía limpia y renovable es la solar, la cual proviene de nuestra estrella más cercana, el Sol. Este es un cuerpo celeste de diámetro $1,39 \times 10^9$ [m], constituido por materia caliente gaseosa con una temperatura de 5762 [K] y que se encuentra a una distancia de $1,5 \times 10^{11}$ [m] de la Tierra. La radiación emitida por esta estrella es de $3,8 \times 10^{20}$ [MW], de la cual sólo $1,7 \times 10^{14}$ [kW] llega a la superficie terrestre. Sin embargo, si se pudiese utilizar la radiación total que recibimos por sólo 30 [min], se podría suplir la necesidad energética de un año de todo el mundo.

Hoy en día se conoce que el Sol es el responsable de originar todas las formas de energía conocidas, desde el petróleo, gas natural y madera que han sido producidas por procesos de fotosíntesis inicialmente luego seguido por procesos químicos complejos debido a presión y temperatura, hasta el viento y cambios en las mareas que son causadas por las variaciones de temperaturas debido al Sol en diversas regiones del planeta.

Es así, como en la actualidad la energía solar es considerada una de las alternativas más viables para dejar los combustibles fósiles de lado, debido a que es abundante, limpia, de nula polución ambiental y renovable, por lo que deberían ser siempre empleadas con el objetivo de crear un futuro sostenible.

Existen diversas formas de aprovechar la energía que nos entrega el sol, una de ellas es la fotovoltaica, donde una serie de celdas fotovoltaicas son empaquetadas en módulos que al ser iluminadas producen un determinado voltaje y corriente, y que si se conectan con más módulos producen mayor voltaje y corriente para poder ser utilizadas como energía eléctrica. La eficiencia que presentan estas celdas alcanza hoy en día sólo un 30% y debido a sus altos costo nos son utilizadas masivamente. Sin embargo, existe otro tipo de forma para aprovechar la energía solar, esta es mediante el uso de colectores solares los cuales concentran la energía sola recibida en un punto en específico para así calentar ya sea agua u otros recursos con el objetivo de ya sea generar agua potable o de producir energía mecánica para luego generar energía eléctrica.

7.4.1 Geometría Solar

Para poder recibir la energía proveniente del sol es indispensable saber dónde se encuentra el sol en el cielo con respecto al lugar donde se quiere recibir la energía, por lo que para ubicarnos en el planeta Tierra debemos utilizar coordenadas geográficas donde “la latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado del planeta medidas con respecto al centro de la Tierra” (13) la cual se mide de 0° en el Ecuador y 90° en los polos, positivo para el norte y negativo para el sur. Por otro lado, tenemos que “la longitud es la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y un meridiano considerado como base, medida a lo largo del paralelo en el que se encuentra dicho punto” (13) en el que consideramos el meridiano de Greenwich como base 0° y que va hasta 180° positivo hacia el este y negativo hacia el oeste.

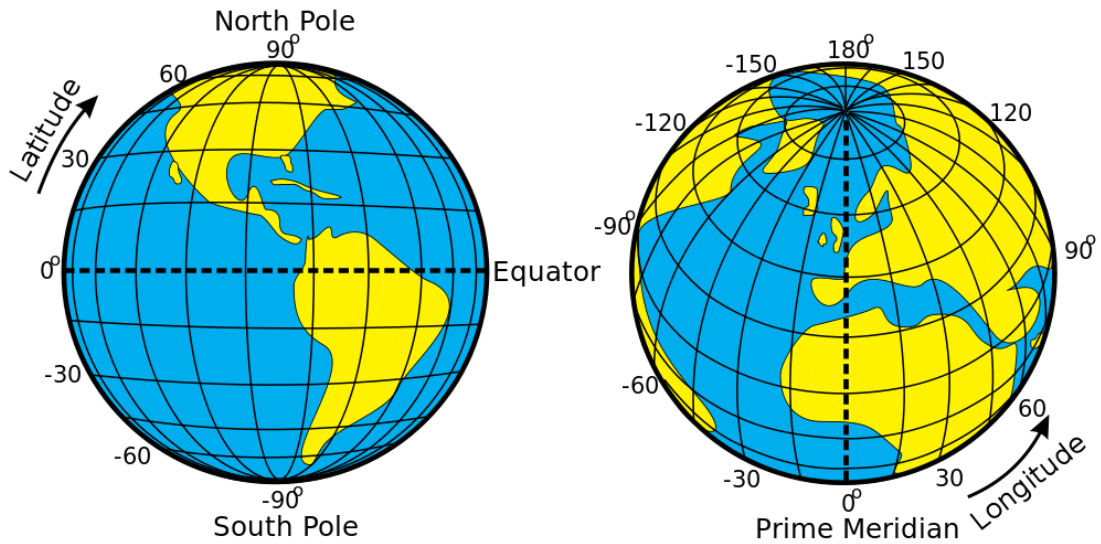


Ilustración 9: Latitud y Longitud.

Luego debemos entender el movimiento de la tierra con respecto al sol como también la rotación sobre su propio eje, por lo que una rotación de la Tierra se denomina día solar y equivale exactamente a 23 horas 56 minutos y 4,0989 segundos. A la vez, la Tierra da una vuelta al sol en 365 días 5 horas 48 minutos y 45,19 segundos y se mueve en el denominado plano de la elíptica con el cual el eje de rotación de la Tierra tiene forma un ángulo de $23,45^\circ$, formando la declinación solar que es la desviación angular de los rayos solares con respecto al eje ecuatorial y varía a lo largo del año llegando a $23,45^\circ$ en el solsticio de invierno (solsticio de verano para el hemisferio norte) y $-23,45^\circ$ en el solsticio de verano. La declinación es 0° en dos momentos del año que son los equinoccios de otoño y primavera. Es la declinación la que da origen a las estaciones del año y la que cambia la duración de los días durante el año.

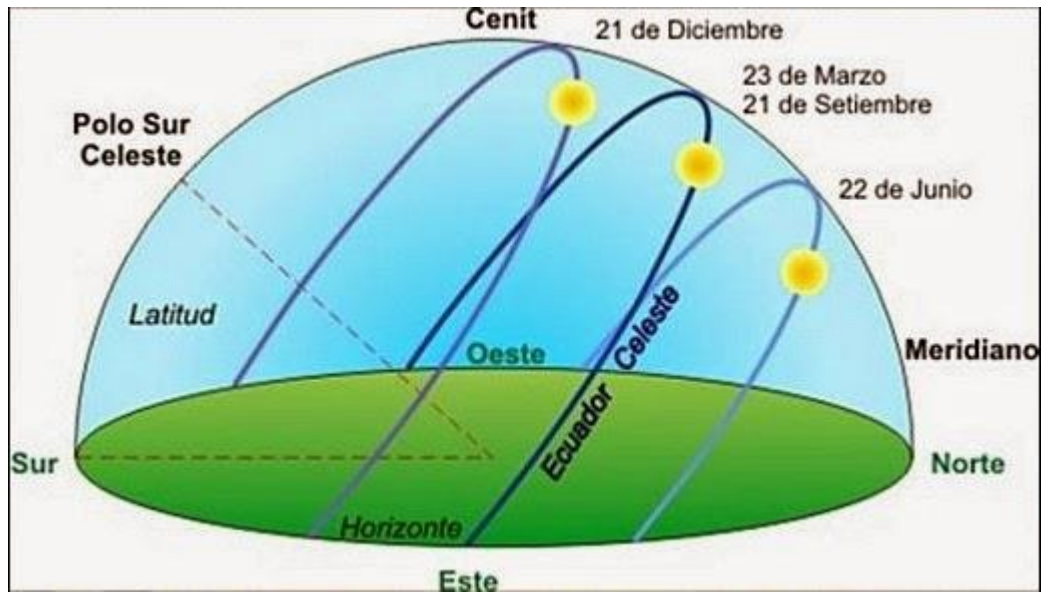


Ilustración 10: Trayectoria solar durante el año.

Ahora, para poder ubicar el sol durante el día desde un lugar de la superficie terrestre utilizamos la altitud solar que es el ángulo entre el rayo solar y un plano horizontal a la superficie terrestre y que va de 0° a 90° , y el acimut solar que es el ángulo entre los rayos del sol en el plano horizontal, con un punto de referencia que en el hemisferio sur es el norte y van desde -180° a 0° en la mañana y de 0° a 180° en la tarde, por lo que el mediodía en hora solar corresponde a 0° .

7.4.2 Colectores Solares

Los colectores solares son intercambiadores de calor los cuales absorben la radiación solar, la transforman en calor y luego la transfieren a un fluido (usualmente aire, agua o aceite), el cual puede ser almacenado en un tanque para ser utilizado en otro momento.

Básicamente existen dos tipos de colectores solares: no-concentradores o estacionarios y concentradores. Los primeros tienen una misma área de intercepción como de absorción de la radiación solar, mientras que los concentradores tienen

superficies cóncavas reflectantes las cuales interceptan la radiación y la focalizan en un área menor, con el objetivo de incrementar el flujo radiativo por unidad de área.

7.4.2.1 Colectores estacionarios

Existen tres tipos de colectores estacionarios:

7.4.2.1.1 Colector de placa plana

Los colectores de placa plana consisten en una cubierta transparente por donde pasan los rayos solares para luego ser absorbidos por una superficie negra de alta absorción, la cual luego de absorber la energía la transfiere al fluido a calentar que pasa por tubos que se encuentran unidos a la superficie absorbente de radiación. La cubierta de la placa absorbente debe estar bien aislada para reducir las pérdidas por conducción, mientras la cubierta transparente evita las pérdidas por convección. Por lo general se utilizan en una posición fija, con inclinación dependiendo de la latitud en que se encuentra.

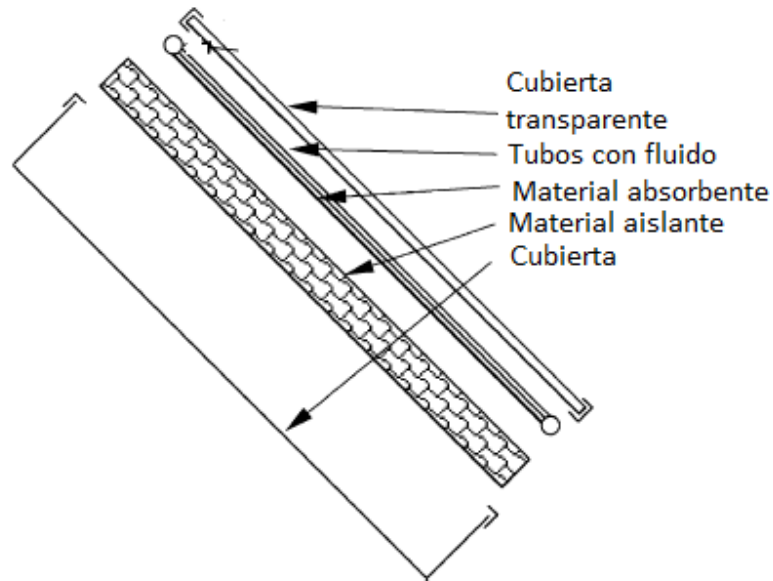


Ilustración 11: Colector de placa plana (vista en despiece) (14).

7.4.2.1.2 Colector parabólico compuesto

Colectores parabólicos compuestos, son colectores capaces de absorber toda la radiación recibida dentro de los límites de apertura. Está compuesto de dos secciones de parábola los cuales redirigen cualquier radiación entrante a la superficie absorbente localizada en el fondo del colector, que puede ser cilíndrico o plano. Su ventaja es que son capaces de absorber la radiación en una gran variedad de ángulos de incidencia.

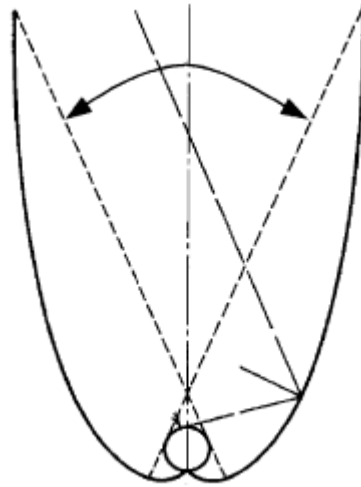


Ilustración 12: Esquema colector parabólico compuesto (14).

7.4.2.1.3 Colector de tubo al vacío

Este colector consiste en un tubo de calor tubo de calor donde se encuentra un fluido de cambio de fase líquido-gas, el cual se encuentra unido a una aleta de cobre negra que llena el tubo absorbente el cual a la vez se encuentra al interior de un tubo al vacío el cual tiene como función reducir las pérdidas por convección y conducción. En la parte superior se encuentra una punta de metal que se encuentra inserta en la tubería sellada con el líquido a calentar. Por lo tanto, el líquido dentro del tubo de calor se evapora gracias a la radiación recibida y luego a aleta superior transfiere el calor al líquido a calentar con lo que el líquido se condensa para luego continuar el ciclo. Su ventaja es q es capaz de absorber radiación incidente desde varios ángulos, tiene una buena eficiencia y puede operar a altas temperaturas.

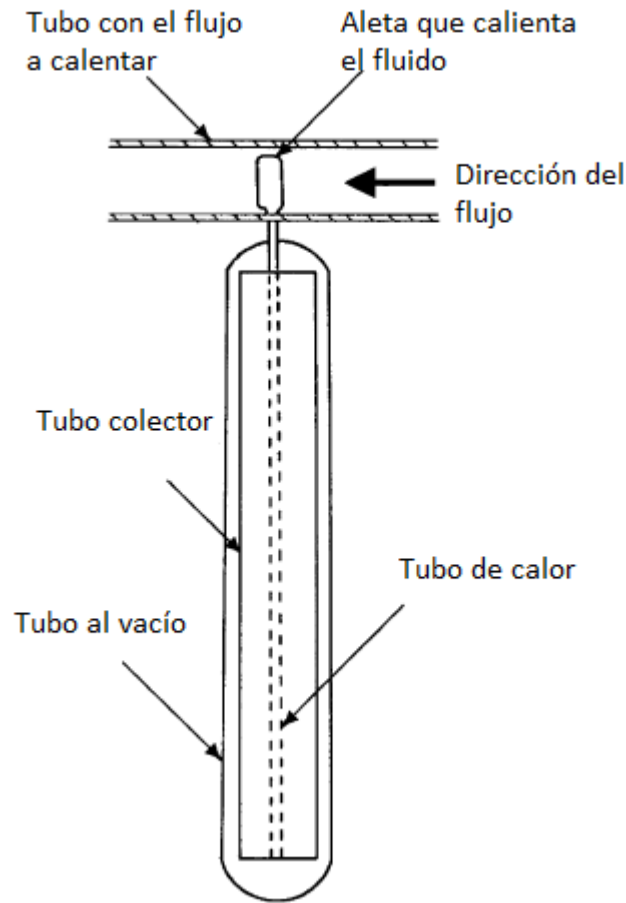


Ilustración 13: Esquema colector de tubo al vacío (14).

7.4.2.2 Colectores concentradores

Estos colectores tienen como característica principal que concentran la radiación interceptada en un área menor por lo que pueden alcanzar mayores temperaturas que los colectores estacionarios. Además, tienen mejor eficiencia al sufrir menos pérdidas debido a que el área donde se concentra la radiación es menor, como también tienen una estructura más simple que un colector de placa plana. Sin embargo, también presentan ciertas desventajas como dificultad para operar con radiación difusa, y la necesidad de tener un mecanismo de seguimiento del sol para que pueda recibir de

manera correcta la radiación solar. Al igual que los colectores estacionarios existen diversos tipos de colectores concentradores.

7.4.2.2.1 Colectores tubular-parabólicos

Este tipo de colector está formado por una placa reflectante doblada en forma parabólica la cual concentra los rayos incidentes en la zona focal donde se coloca un tubo negro cubierto por un tubo transparente para disminuir las pérdidas por convección. Para obtener la radiación solar es necesario que el colector siga al sol ya sea con orientación este-oeste y seguimiento de norte a sur o con orientación norte-sur con seguimiento de este a oeste. Se considera este tipo de colector como la tecnología termo-solar más avanzada por existir una considerable experiencia con los sistemas y porque sólo necesita industrias pequeñas para su producción.

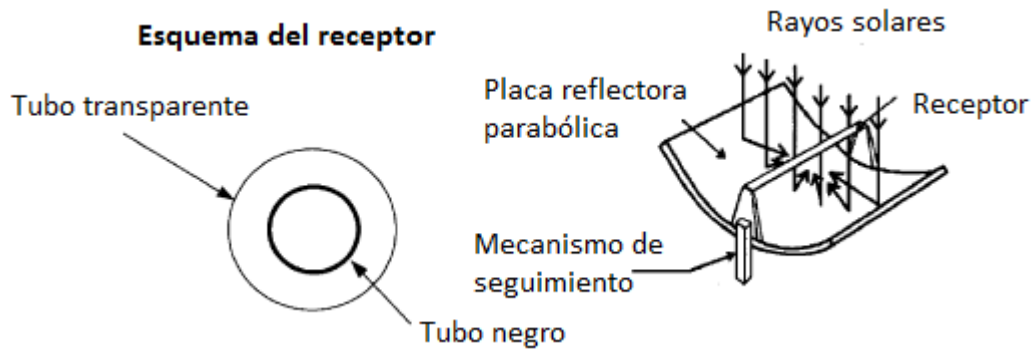


Ilustración 14: Colector parabólico con receptor tubular (14).

7.4.2.2.2 Colector linear Fresnel

Este tipo de colector se basa en una serie de tiras lineales de espejos que concentran la luz en un receptor fijo montado en una torre líneal. El campo de

reflectores se puede imaginar como un reflector parabólico compuesto de una gran cantidad de espejos que concentran la radiación en el extremo de la torre receptora. Los espejos no tienen que ser de forma parabólica y la torre receptora puede ser de gran magnitud y no es necesario que se mueva. La gran ventaja de este sistema es que los reflectores pueden ser curvos o planos lo que los hace más baratos que los reflectores parabólicos. Adicionalmente, los reflectores pueden ser instalados cerca del suelo lo que minimiza los requerimientos estructurales.

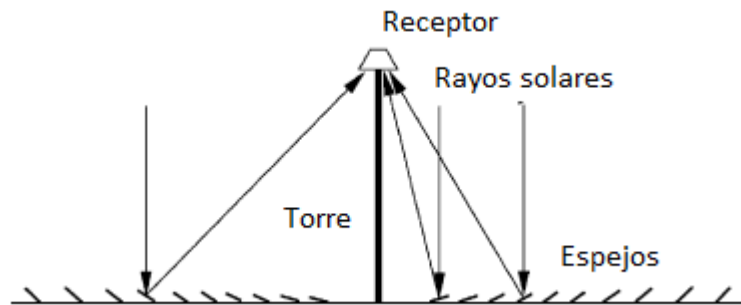


Ilustración 15: Esquema reflector lineal Fresnel (14).

7.4.2.2.3 Colector de plato parabólico

Un colector de plato parabólico es un reflector de forma parabólica que concentra la radiación en el punto focal, y que es capaz de seguir al sol tanto en el eje horizontal como vertical. Para que este tipo de colector funcione correctamente debe seguir plenamente al sol, por lo que existen mecanismos en la base del colector para cumplir este objetivo. Este tipo de sistemas pueden alcanzar temperaturas de hasta 1500°C en su punto focal donde el receptor convierte la radiación en energía térmica para calentar un fluido.

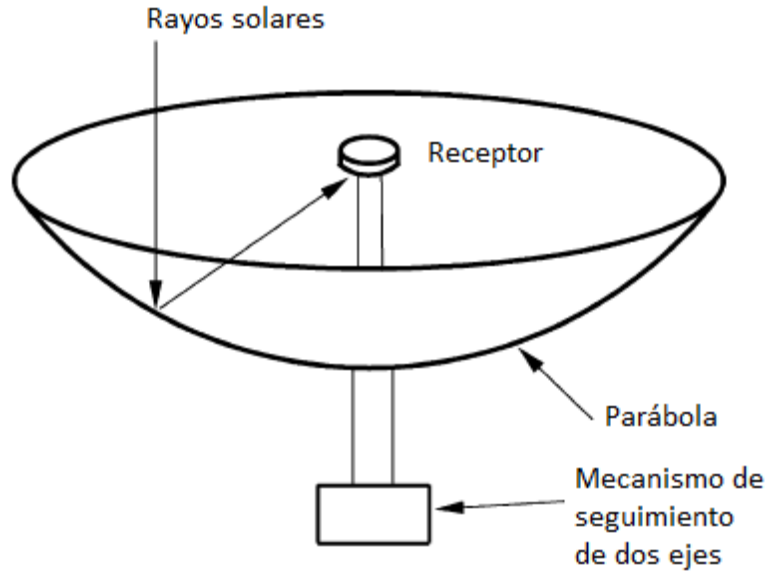


Ilustración 16: Colector de plato parabólico (14).

7.4.2.2.4 Colector de campo de heliostatos

Este tipo de colectores se compone de una multiplicidad de espejos planos o heliostatos con montajes altacimutales los cuales reflejan la radiación solar en un punto en común, se les llama campo de heliostatos. Cada heliostato tiene como superficie reflectora entre 50-150 [m^2] y rodean por completo la torre receptora. Sus ventajas son que pueden concentrar la radiación solar eficientemente, son de grandes proporciones así que se benefician de economías de escala, pueden generar hasta 10 [MW], alcanzan temperaturas de más de 1500 [$^{\circ}C$].

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

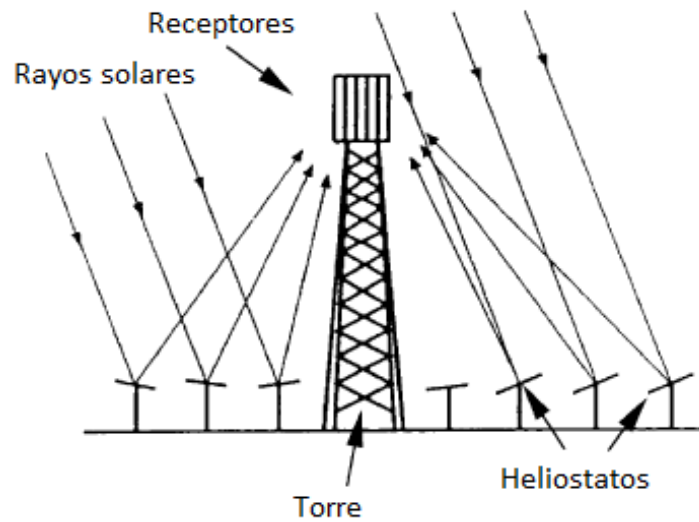


Ilustración 17: Colector de campo de heliostatos (14).

Tabla 3: Resumen características por tipo de colector.

Tipo de colector	Tipo de receptor	Proporción de concentración	Rango de temperatura [°C]
C. de placa plana	Plano	1	30-80
C. de tubo al vacío	Plano	1	50-200
C. parabólico compuesto	Tubular	1-5	60-240
C. linear Fresnel	Tubular	10-40	60-250
C. tubular-parabólico	Tubular	15-45	60-300
C. plato parabólico	Puntual	100-1000	100-500
C. de campo de heliostatos	Puntual	100-1500	150-2000

7.5 Medio Poroso

La mayoría de los materiales son hasta cierto punto porosos, lo que quiere decir que contienen cavidades o canales que pueden albergar un fluido externo dentro del material. Se sabe que las propiedades físicas de un material como la densidad, conductividad térmica y dureza dependen de la estructura de los poros y de la porosidad lo que es de gran relevancia para los diseños de materiales industriales como catalizadores, absorbentes industriales, membranas y cerámicas. Además, la porosidad es también un factor influyente en la reactividad química de los sólidos y de la interacción física con líquidos y gases.

Para dar una definición exacta de que es un medio poroso es necesario saber en el contexto que se está trabajando, sin embargo, podemos describir y clasificar los poros que se presentan en un material.

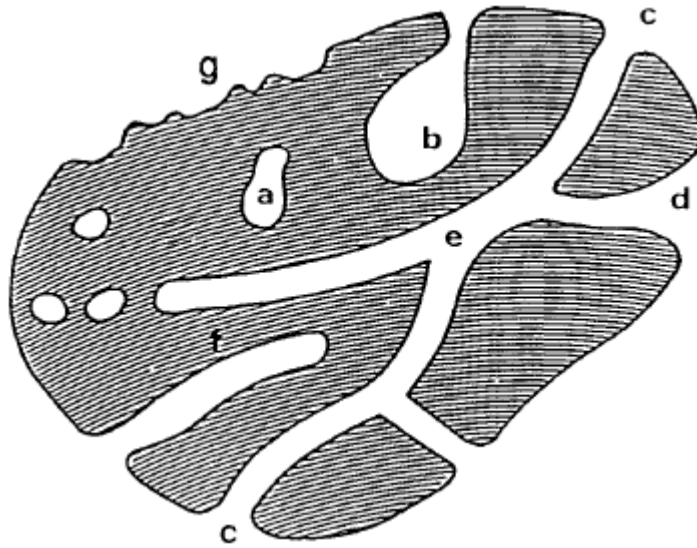


Ilustración 18: Vista esquemática en corte de un material poroso. (15)

En la ilustración 5 podemos ver que la región (a) es un poro que está totalmente aislado del resto, estos son llamados *poros cerrados*, los cuales influyen en la densidad aparente, dureza mecánica y conductividad térmica. Luego, los poros que se comunican con la parte externa del material (b), (c), (d), (e) y (f) se llaman poros abiertos y finalmente está la aspereza de la superficie (g), que son irregularidades más profundas que anchas.

A algunos materiales porosos se les denomina consolidados, que son relativamente rígidos, con cuerpos que sus dimensiones exceden la de sus poros en varias órdenes de magnitud, también se les denomina aglomerados. Y otros son los no consolidados, que no son rígidos sino más bien un conjunto de partículas individuales, también denominados agregados.

En la actualidad los medios porosos se encuentran en pleno desarrollo con investigaciones enfocadas principalmente a su aplicación en la combustión de hidrocarburos, ya que favorecen a una mayor tasa de combustión, incremento del rango de poder dinámico, disminución de contaminantes y la extensión de los límites de inflamabilidad, debido a dos características principales, que son:

- La altamente desarrollada superficie interna del medio poroso que resulta en una mayor eficiencia de transferencia de calor entre el combustible y el sólido inerte.
- La dispersión del reactante a través del medio poroso incrementa la difusión efectiva y la transferencia de calor entre las fases.

Existen dos tipos de sistemas en los que se usa medio poroso para la combustión, uno es el estacionario, donde la zona de combustión es estabilizada en un elemento finito de la matriz de medio poroso y es utilizado principalmente para quemadores radiantes y calentadores de combustión en superficie debido a la alta emisividad del sólido. Otro tipo de sistema es el transiente donde una zona de reacción inestable se propaga libremente como una onda de combustión debido a flujos de energía, lo que tiene como consecuencia un precalentamiento de los reactantes debido

a los productos ya quemados que elevan la temperatura de la combustión más allá de la temperatura adiabática teórica. Este sistema también es llamado combustión por filtración. Esta forma de tener temperaturas mayores a las adiabáticas se conoce también como exceso de entalpía o combustión “super-adiabática”.

Otras ventajas conocidas de un medio poroso son:

- Alta capacidad térmica.
- Alta estabilidad térmica.
- Alta estabilidad mecánica.
- Variabilidad en estructura, densidad y geometría.

7.5.1 Tipos de medios porosos

Para formar un medio poroso existen tres compuestos principales que son usados estos son el óxido de aluminio (Al_2O_3), el carburo de silicio (SiC), y el dióxido de circonio (ZrO_2). Otros compuestos que existen también son la cordierita (13,7% MgO , 34,9% Al_2O_3 y 51,4% SiO_2), nitruro de silicio (Si_3N_4) y mullita ($Al_6Si_2O_{13}$). Mientras el óxido de aluminio y el dióxido de circonio tienen una buena resistencia a altas temperaturas, el carburo de silicio tiene buena resistencia al golpe térmico, dureza mecánica y buen transporte conductivo de calor. Corderita tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y alta resistencia al golpe térmico. Existen otras aleaciones metálicas a base de níquel que también sirven para algunas aplicaciones de medios porosos, sin embargo, presentan menor resistencia térmica.

Tabla 4: Propiedades térmicas de medios porosos.

Propiedades	Unidades	Al_2O_3	SiC	ZrO_2
Temperatura máxima utilizada en el aire	°C	1900	1600	1800
Coeficiente de expansión térmica α , (20-1000 °C)	10^{-6} 1/K	8	4-5	10-13
Conductividad térmica a 20°C	W/mK	20-30	80-150	2-5
Conductividad térmica a 1000°C	W/mK	5-6	20-50	2-4
Resistencia a estrés térmico (choque duro), R	K	100	230	230
Resistencia a estrés térmico (choque térmico suave), $R \cdot \lambda$	10^{-3} W/m	3	23	1
Capacidad térmica específica	J/gK	0,9-1	0,7-0,8	0,5-9,6
Emisividad a 2000 K	-	0,28	0,9	0,31

Además de los distintos materiales que se pueden usar para la formación de medios porosos, existen distintas formas en que se pueden formar dependiendo el uso y la necesidad del cliente. Es por esto que existen desde esferas de distinto diámetro, hasta espumas con distintas formas y distinta porosidad.

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.



Ilustración 19: Esferas de óxido de aluminio de distintos diámetros.

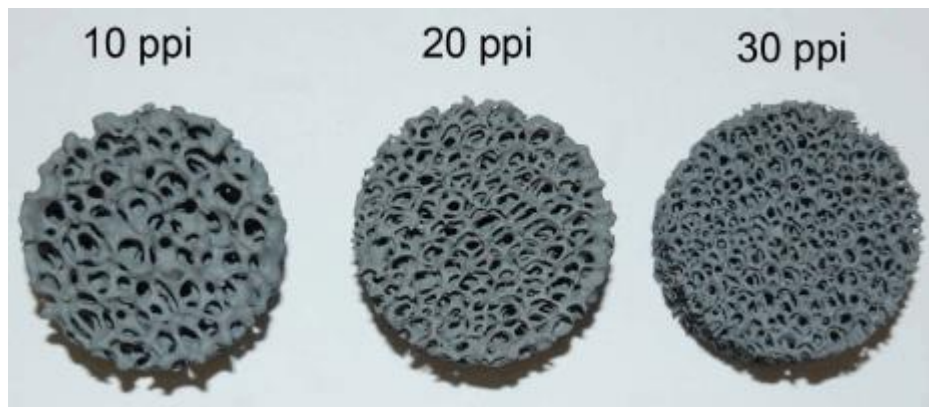


Ilustración 20: Espuma de carburo de silicio con distinta porosidad.

8. Tecnología Utilizada

Para poder realizar la gasificación del carbón, es necesario definir un diseño de un reactor donde ocurren las reacciones químicas de gasificación, al igual que la forma de concentración solar para el aporte energético de las reacciones endotérmicas. Para los diseños es imprescindible tener en cuenta el combustible, y el agente gasificante utilizado, que son:

Combustible: Carbón Bituminoso proveniente de Mina Carrejón, Departamento de la Guajira, Colombia.

Composición química: Carbono: 64,98%, Hidrógeno: 4,5%, Nitrógeno: 1,33%, Oxígeno: 8,21%.

Agente gasificante: Vapor de Agua (Se introduce de forma líquida como agua potable al reactor).

Medio poroso: Se utilizan esferas de alúmina (Al_2O_3) de 6 [mm] de diámetro.

Relación estequiométrica: Utilizando la fórmula básica de gasificación de carbono con vapor de agua, ($C + H_2O \rightarrow H_2 + CO \quad \Delta H = +131,3 \left[\frac{kJ}{molC} \right]$) podemos ver que la cantidad de moles de Carbono es igual a la cantidad de moles de agua por lo que utilizando las masas molares ($C=12$ [g/mol], $H_2O=18$ [g/mol]) y además considerando el porcentaje de Carbono contenido en el carbón obtenemos que en 50 [g] de carbón hay 32,49 [g] de C, lo que equivale a 2,7075 [moles] y la misma cantidad de moles de agua equivalen a 48,735 [g] de agua. La energía necesaria para lograr esta reacción química es de 355,49 [kW].

8.1 Reactor

El reactor diseñado debe cumplir tres funciones principales, que son la generación del gas de síntesis mediante la exposición del combustible a un agente gasificante y a

una fuente de energía, recirculación del calor en el interior del reactor para favorecer la gasificación, y la acumulación del gas de síntesis generado. Para cumplir estas funciones requeridas al reactor se le diseñan tres sistemas principales, lo que son:

- Sistema de gasificación del carbón: Este otorga las condiciones ideales para la gasificación.
- Sistema de rotación del reactor: Para favorecer la recirculación del calor al interior del reactor.
- Sistema de acumulación de gases generados: Acumular el gas de síntesis y permitir el llenado de las bolsas de muestras para su análisis.

8.1.1 Sistema de gasificación

Este sistema está conformado por las siguientes partes:

- Lecho compacto: el cual es un termo de acero inoxidable para líquidos donde se depositan el combustible, el agente gasificante y el medio poroso a utilizar. Este otorga resistencia a la corrosión, además de ayudar a mantener el calor dentro del reactor. Para el cierre hermético se fabrica una tapa de acero inoxidable la cual encaja en la apertura del termo, y en la que va pegada la ventana que permite el ingreso de los rayos solares. Con el fin de proteger el reactor del foco que puede moverse de la ventana y quemar partes del reactor y/o base de giro, es que se le coloca a la tapa un disco de zincalum, que es una lámina de acero cubierta por una aleación de aluminio y zinc para protegerla de la corrosión.



Ilustración 21: Reactor fabricado.

- Ventana transmisora de radiación: esta ventana deja pasar la radiación concentrada al interior del reactor, está hecha de vidrio de cuarzo el cual tiene una alta resistencia térmica (puede operar hasta aproximadamente 1300 [°C]), bajo coeficiente de dilatación térmica ($0,55 \times 10^{-6}$ [cm/cm°C]) y alta transmisividad óptica, esta va pegada a la tapa utilizando silicona alta temperatura, la que evita la filtración hacia el exterior y por macilla refractaria que le da mayor firmeza y protege la silicona al poder resistir temperaturas más altas que esta.



Ilustración 22: Ventana de cuarzo.

- Aislación térmica: el reactor se encuentra aislado térmicamente por una capa de fibra cerámica de aproximadamente 15 [mm] de espesor, la cual tiene una alta resistencia de temperatura de aproximadamente 1300 [°C] y una baja conductividad térmica de alrededor de 0,2 [W/mK] a 800 [°C]. El aislante se envuelve en el reactor y luego se pega una capa de cinta de tela para mantenerla adherida y para protegerla de las piezas que están en contacto con su superficie.



Ilustración 23: Fibra cerámica.

8.1.2 Sistema de acumulación de gases generados

Este sistema parte desde el mismo reactor, donde un niple de hilo exterior de 3/8" con terminal de espiga de 3/8" se encuentra enroscado al reactor, luego la espiga está inserta en un rodamiento de 8 mm que a la vez se encuentra inserto en un niple de 7/8" de hilo interior con terminal de espiga de 1/2" en la que va conectada una manguera de jardín de 1/2". La utilización de estos niples y rodamiento es con el fin de fabricar una junta rotatoria la cual permita el giro del reactor, pero que mantenga fija la manguera para evitar que se enrolle sobre sí misma.

La manguera luego llega a un recipiente de 10 litros que se encuentra sumergido en un recipiente con agua de 50 litros de forma invertida para retener los gases debido a la trampa de agua. Esta trampa de agua además de servir para evitar el escape de los gases también sirve para atrapar la humedad que "contamina" el syngas que queremos producir.

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

Para la obtención de los gases acumulados se utiliza una válvula de paso que en su extremo tiene un niple de 1/4" con terminal de espiga de 1/4" a la cual se le conecta una manguera la cual permite conectar bolsas de muestras en las que se contiene el gas para luego poder analizarlo en un cromatógrafo.



Ilustración 24: Componentes de junta rotatoria.



Ilustración 25: Sistema de acumulación de gases con trampa de agua.

8.1.3 Sistema de rotación del reactor

La idea de hacer rotar el reactor es para favorecer la recirculación del calor dentro de este mediante el uso de un medio poroso (esferas de alúmina) las cuales toman el calor del gas que va saliendo para luego traerlo al interior del lecho y así aumentar la gasificación del carbón. Para hacer rotar el reactor, se utiliza una base compuesta por 2 hilos metálicos de rosca de 8 [mm] apernados a un perfil metálico cuadrado y en los cuales van 4 rodamientos de 8 [mm] que soportan y permiten el giro del reactor con mayor facilidad, además se utilizan alambre de 2,11 [mm] de diámetro para crear un cierre que mantenga el reactor apoyado correctamente sobre los 4 rodamientos y que eviten que el reactor se desplace de forma lateral debido al giro.

Además, se utiliza el alambre para crear una estructura en la cual va montada una rueda con un mecanismo de reducción de revoluciones propulsado por un motor eléctrico de 6 volts los cuales fueron reciclados de un juguete a control inoperativo, que junto con una correa de transmisión de elaboración propia se le da el giro al reactor.

Todo el sistema de rotación va soldado en la parte del perfil metálico central a una plancha metálica que a la vez va soldada a un soporte del disco parabólico.

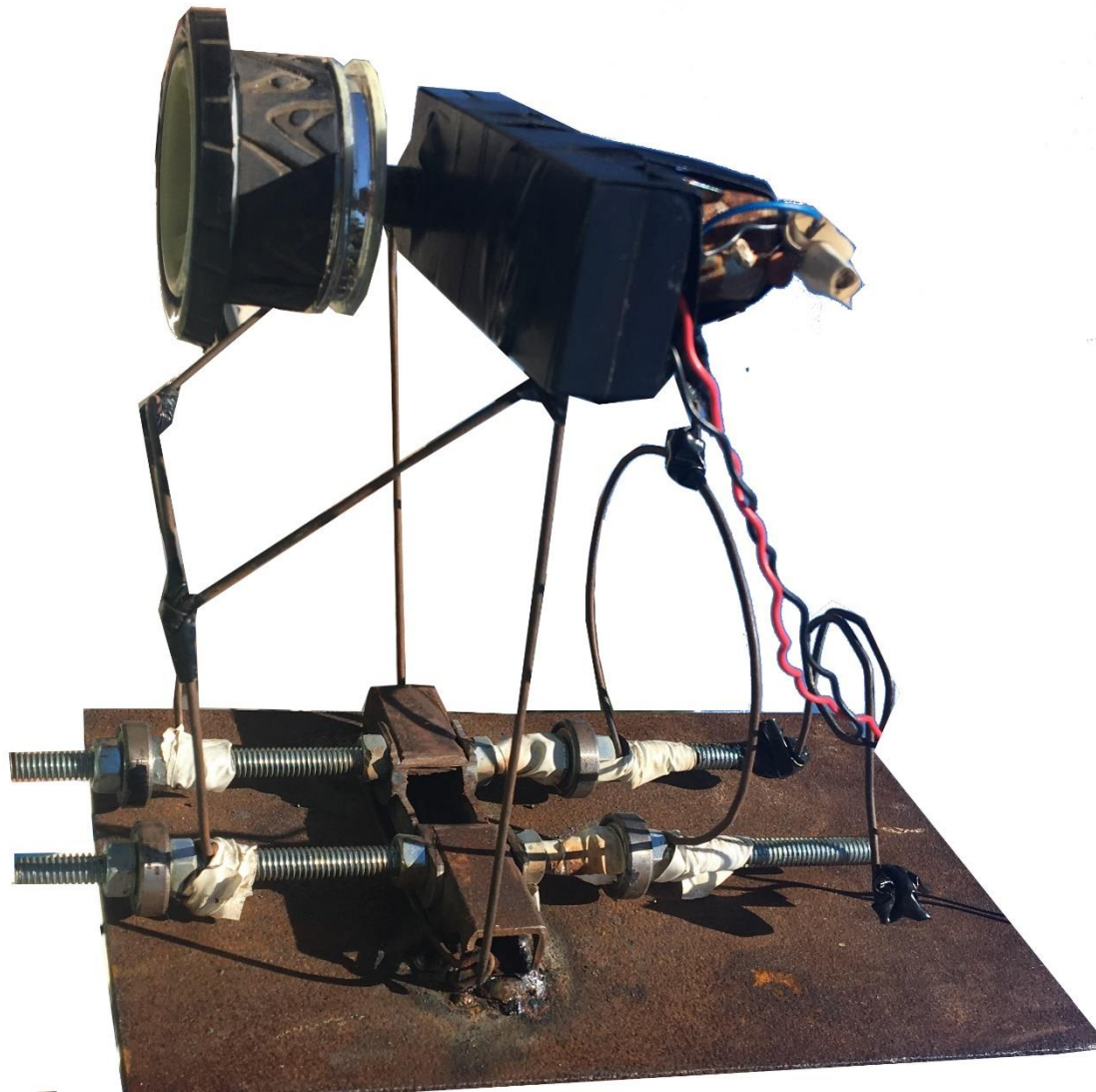


Ilustración 26: Sistema de rotación.

8.2 Concentración Solar

Para poder concentrar la energía proveniente del sol en el interior del reactor, se utiliza un disco parabólico de alta temperatura C. A. Parsons de 900 [mm] de diámetro el cual tiene el foco a 350 [mm] medido desde el centro del disco. Las dimensiones del disco parabólico permiten que tenga una potencia nominal de concentración de

aproximadamente 636 [W], la cual permitirá la ocurrencia de las reacciones endotérmicas en nuestro reactor.

Sin embargo, como se ha visto en el marco teórico el disco concentra sólo la radiación directa del sol y para que se pueda concentrar en el foco es necesario que el disco esté apuntando directamente al sol en todo momento, por lo que se tiene una base para el disco la cual cuenta con un rodamiento en su eje vertical el que permite el giro con el fin de seguir el movimiento azimutal del sol, a la vez se tiene un hilo metálico de rosca el cual va conectado a la parte superior del disco y que pasa a través de una placa metálica perforada la que junto a una tuerca enroscada en el hilo metálico permite variar la inclinación del disco con el fin de que coincida con la altitud solar en todo momento.

Con el fin de tener el reactor en el punto foco del disco, es que se crea un soporte con forma de “L” la cual va apernada a la parte inferior del disco y se monta en el extremo la base del sistema de giro del reactor calculando apropiadamente que la ventana del reactor quede exactamente en el foco, es decir, en el centro del disco y a la distancia de 350 [mm] de este mismo.



Ilustración 27: Disco parabólico con soporte del reactor.

8.3 Sistemas de control y análisis de resultados

Al reactor se le implementa un sistema de control de temperatura, con el fin de llevar un registro de las temperaturas máximas y promedio que se alcanzan en el interior del reactor ya que para las reacciones químicas de gasificación no solo es

necesario el aporte energético sino también alcanzar temperaturas elevadas las cuales favorecen estas reacciones y que nos permitirían poder realizar optimizaciones en iteraciones futuras de gasificadores solares con implementación de medio poroso.

Para poder medir temperaturas en el interior se utilizan termocuplas de tipo K, las cuales tienen un rango de temperaturas de medición de 0 [°C] a 800 [°C] con un diámetro de 6 [mm] y tienen hilo roscado para poder fijar al reactor. Se ubican tres termocuplas en el reactor, la primera va inmediatamente después de la ventana de cuarzo, la segunda a 5 [cm] de la ventana y la tercera a 20 [cm] de esta. Con esta disposición se pretende realizar un perfil de temperaturas a lo largo del reactor que nos dé una idea más clara de cómo se distribuye el aporte energético que entra por la ventana y así obtener una temperatura promedio a la que se produce el proceso de gasificación. Con el fin de adquirir y registrar las temperaturas que se miden con las termocuplas es que se utiliza un adquisidor de datos de marca Omega, modelo OMB-DAQ-54 que tiene 5 puertos de conexión de instrumentos de medición, además de conexión USB para el traspaso de los datos adquiridos a un computador. En el computador se instala el software entregado por el fabricante del adquisidor llamado Personal DaqView, el cual se configura para el registro de las temperaturas medidas por las termocuplas cada 2 segundos y así poder generar una curva de temperaturas a través del tiempo de operación del reactor.



Ilustración 28: Termocupla tipo K.



Ilustración 29: Adquisidor de datos Omega OMB-DAQ-54.

Para saber la cantidad aproximada de energía que entra al reactor, se utiliza un piranómetro Kipp & Zonen con el cual se mide la radiación solar directa y así establecer las condiciones energéticas de operación del reactor. Para poder registrar la radiación, el piranómetro cuenta con una superficie receptora la cual produce un voltaje de acuerdo a la radiación incidente, este voltaje es medido con un voltímetro el que luego con la constante $9,5 \times 10^{-6} \text{ [V/Wm}^{-2}\text{]}$ que es entregada por el fabricante del piranómetro, se convierte en watt por metro cuadrado.

Ya teniendo los gases generados acumulados en el colector de gases, debemos traspasarlos a algún contenedor que permita transportar estos de forma segura y que no permita la contaminación con gases externos, para lo cual se utilizan bolsas contenedoras de muestras SKC Flexfoil, las cuales cumplen con los requerimientos de sellado y transporte seguro. Para poder analizar los gases que transportamos se utiliza un cromatógrafo de gases que se encuentra disponible en el laboratorio de termodinámica de la casa central de la universidad, el cual es de marca PerkinElmer Clarus 580 y que nos permite calcular la cantidad porcentual de H_2 , N_2 , O_2 , CO , CH_4 y CO_2 .

Esta tecnología de análisis de gases consiste en la separación de especies químicas utilizando un método físico donde una fase móvil, que en nuestro caso se utiliza tanto helio como nitrógeno, transporta los gases a analizar a través de una fase estacionaria

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

o columna cromatográfica (inmiscible con la fase móvil) la cual atrae los distintos componentes químicos separándolos unos de otros. Al final de la columna llegan los componentes separados en distintos intervalos de tiempo y donde un detector mide una característica física o química y registra el tiempo de llegada. Estos datos pasan luego al registrador donde se forma un gráfico que toma como nombre cromatograma el cual puede ser analizado para calcular la cantidad porcentual de cada componente.

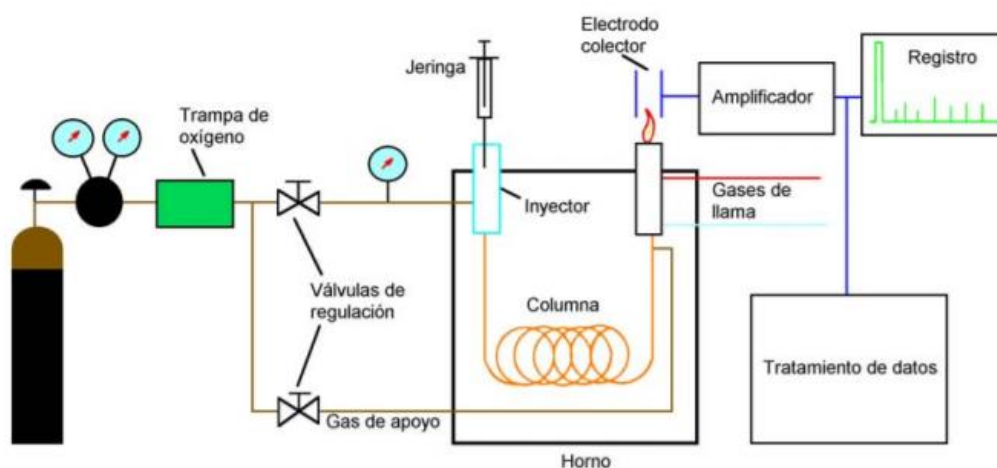


Ilustración 30: Esquema de un cromatógrafo de gases. (16)

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.



Ilustración 31: Cromatógrafo PerkinElmer Clarus 580.

9. Desarrollo Experimental

Ya con todos los sistemas y piezas que componen este experimento fabricadas y montadas, además de las modificaciones realizadas al disco parabólico, es posible proceder a las pruebas de funcionamiento del conjunto para lo cual se empieza por pesar las cantidades de carbón, agua y medio poroso a introducir en el reactor. Se fija una cantidad de 50 [g] de carbón a gasificar, y una cantidad igual en volumen de medio poroso que variará dependiendo la cantidad ingresada. En el caso del agua se ingresan 100 [g] con el fin de saturar de vapor el reactor para así evitar una posible combustión al interior del reactor. Luego de tener el reactor lleno con los reactantes mencionados se procede a poner la tapa al reactor utilizando macilla refractaria como sello y adhesivo. Esta macilla provee una alta resistencia a la temperatura de hasta 1500 [°C] y un pegado correcto con el fin de evitar el desprendimiento de la tapa.

Una vez listo el reactor para operar, se procede a preparar el sistema de acumulación de gases por lo que se le echa agua al contenedor grande hasta un nivel que tape por completo el acumulador que va en su interior y sumergido en el agua, esto con el fin de evacuar todo el aire que pueda quedar contenido y que contaminen los gases generados. Un extremo de la manguera se fija al interior del acumulador para que pueda recibir el flujo que salga del reactor.

El siguiente paso consiste en apuntar el disco directamente al sol para que concentre la radiación en el punto foco, eso se realiza de forma manual dejando la sombra que se proyecta de la base del sistema de rotación en el centro del disco, para lo cual hay que ajustar la inclinación y la dirección a la que apunta nuestro concentrador. Todo esto se realiza con el disco tapado por una manta la cual evita q concentremos el sol en partes del soporte y/o base de giro que puedan dañarlas y dejarlas inoperantes.

Finalmente, se monta el reactor en la base de giro cerciorándonos que quede correctamente fijo en sentido axial para evitar que este caiga encima del disco, pero permitiendo el giro de este. Además, se conecta la manguera al niple y se asegura con una abrazadera para evitar la fuga de los gases. Con todo debidamente montado y

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

conectado se procede a destapar el disco parabólico y a encender el transformador que alimentar el motor eléctrico que da el giro al reactor.



Ilustración 32: Reactor en operación.

9.1. Primera prueba

Esta prueba se realiza el miércoles 20 de septiembre de 2017 a las 11:35 horas, siendo un día soleado con una temperatura ambiental de 16 [°C]. Se ingresan al reactor 270,35 [g] de esferas de alúmina aparte de las cantidades fijas de carbón y agua. La duración de la prueba es de 7 [min] aproximadamente y se detiene debido a filtración de agua y gases por la ventana del reactor. Además, se presenta una pequeña combustión por los alrededores de la ventana.

De esta prueba se obtiene como aprendizaje los siguientes puntos:

- Ingresar esferas de alúmina y carbón, luego sellar tapa y una vez montado ingresar el agua a través del niple trasero.
- Sellar tapa y ventana con silicona alta temperatura ya que la macilla refractaria se ablanda y deshace con el agua y temperatura.
- Poner en la tapa una placa metálica que tape el reactor y el sistema de giro para evitar daños por foco fuera de posición ideal.

9.2. Segunda prueba

Implementando mejoras de acuerdo a lo aprendido en la primera prueba, se realiza una segunda prueba el día jueves 12 de octubre de 2017 a las 12:10 horas, donde se presenta un día soleado con temperatura ambiental aproximada de 17 [°C]. En esta ocasión se utiliza una cantidad de 40 [g] de carbón, 80 [g] de agua y 120 [g] de esferas de alúmina, esto con el fin de disminuir el peso en el interior del reactor y evaluar si el pegado y sellado de la ventana con la silicona alta temperatura aguanta el peso y condiciones de operación del reactor.

Al montar el reactor se presenta una pequeña fuga de agua, lo que significa un mal sellado de la tapa, que al operar disminuye para al final desaparecer el goteo que existía. El acumulador de gases presenta fuga, que al revisar se observa que el plástico

alrededor de la válvula cedió, rompiéndose y quedando inutilizable. La prueba dura aproximadamente 12 minutos la que se detiene debido a que la generación de gases se detiene, esto es observable por las burbujas que se aprecian en el contenedor de agua. Se nota también que la junta rotatoria fabricada se encuentra agripada debido a los gases y temperaturas a la que se ve expuesta.

Ya con el reactor desmontado, se procede a desmontar la tapa y a vaciar el reactor, durante estas tareas se rompe accidentalmente la ventana de cuarzo, la cual al revisar presenta zonas donde se encuentra irregular la superficie por lo que se presume que la operación carcomió partes de la ventana.

Se toma como aprendizaje:

- El sellado con silicona resiste la operación y el peso que se contiene en el interior del reactor.
- Fabricar un acumulador de gases con materiales de mejor calidad y de mayor espesor para así evitar fugas y asegurar un mejor montaje de la válvula.
- Realizar la limpieza de la ventana de cuarzo con mayor cuidado y fijarse en posibles deterioros de la ventana en las próximas pruebas.

9.3. Tercera prueba

Se realiza esta prueba el día viernes 20 de octubre de 2017 a las 12:30 horas, donde se tiene un día soleado con una temperatura ambiental de aproximadamente 21 [°C]. Se vuelve a ingresar al reactor 50 [g] de carbón, 100 [g] de agua y en esta oportunidad 218,7 [g] de esferas de alúmina. Se trae un nuevo acumulador de gases el cual es elaborado con un tubo de PVC de 110 [mm] y con una tapa de PVC a la cual se le aperna la válvula de recolección de gases. Debido a que la junta rotatoria ya no se encuentra operativa se realiza giro manual del reactor y en vaivén con el fin de no enrollar la manguera.

Se inicia la operación sin problemas, sin embargo, luego de 5 [min] se comienza a fugar agua por los alrededores de la ventana de cuarzo, la cual comienza a aumentar y se aprecian gases saliendo. Se da por terminada la prueba luego de 8 [min] ya que se aprecia una llama en la ventana la cual se procede a extinguir rápidamente.

Al revisar el acumulador de gases este se encuentra vacío, por lo que al probar si la manguera se encontraba bien montada se nota que la mayor cantidad de agua en el contenedor provoca que la presión necesaria para que los gases generados puedan salir al contenedor sea mayor, lo que se traduce en una mayor presión al interior del reactor, encontrándose así la causa de las fugas. Al desmontar ventana de cuarzo se encuentra pequeña fisura que parte de una zona que presenta un deterioro en su superficie que podría haber sido la causa de la fisura mencionada.

Se toma como experiencia:

- Tener el acumulador de gases levantado a media altura con el fin de disminuir la presión necesaria para la salida de los gases.
- Tapar alrededores de la ventana de cuarzo con placas metálicas para evitar deterioro del sellado de la ventana.

9.4. Cuarta prueba

Se lleva a cabo esta prueba el día miércoles 25 de octubre de 2017 a las 12:45 horas, siendo un día soleado con una temperatura ambiental de 18 [°C]. Se utilizan las cantidades de carbón y agua fijadas anteriormente con 171,3 [g] de esferas de alúmina.

Iniciando la operación, no se observan fugas y se procura de mantener el acumulador de gases a media altura, el cual después de 2 minutos de operación se comienza a llenar de gases productos debido al burbujeo que se escucha al interior. La operación dura 18 [min] cuando ya no se observa burbujeo al interior del reactor ni salida de gases por la manguera por lo que se da por terminada la prueba.

Se conecta al acumulador de gases una bolsa de muestra la cual es llenada por completo, además se alcanza a llenar parcialmente una segunda bolsa de muestra, las cuales, se guardan cuidadosamente con el fin de realizar un análisis de gases en el cromatógrafo de la universidad. Debido a que la operación resulta sin complicaciones no se toman aprendizajes que puedan mejorar las pruebas futuras.

9.5. Quinta Prueba

Se lleva a cabo esta prueba el día jueves 9 de noviembre de 2017 a las 12:45 horas, siendo un día soleado con una temperatura ambiental de 22 [°C]. Se utilizan las cantidades de carbón y agua fijadas anteriormente con 214,3 [g] de esferas de alúmina.

Iniciando la operación, se inicia el registro de mediciones de temperatura, el cual toma mediciones cada 5 segundos, además de mediciones de radiación solar obteniéndose una radiación promedio de 1011 [W/m²] a lo largo de la prueba. El reactor comienza rápidamente a presentar fuga por la ventana por lo que se pierde la mayoría del agua ingresada al reactor lo que acorta la duración de la prueba a sólo 9 minutos. En la fuga observada, también se escaparon los gases producidos por lo que no hubo un mayor flujo hacia la parte trasera del reactor provocando que no se acumularan gases.

Se toma como aprendizaje:

- Realizar cambio completo de ventana de cuarzo, es decir, no reparar el sellado y pegado de la ventana sino remover por completo la silicona utilizada anteriormente para pegar y sellar nuevamente la ventana de cuarzo.

9.6. Sexta Prueba

El día jueves 16 de noviembre de 2017 se realiza una nueva prueba experimental, iniciándose la operación a las 12:15 donde se cuenta con un día completamente despejado con una temperatura ambiental de 22 [°C]. Al igual que las pruebas anteriores, se utilizan las mismas cantidades de carbón y agua, mientras que se ingresan 167.6 [g] de esferas de alúmina. La prueba se realiza con adquisición de datos de temperatura y radiación cada 5 segundos obteniéndose en esta oportunidad una radiación promedio de 1041 [W/m²].

Con el reactor en plena operación no se observa algún tipo de fugas, ya sea por la ventana o por termocuplas instaladas. La duración de la prueba es de 12 minutos, a los cuales no se observa presencia de burbujeo en la ventana, por lo que se asume que se evapora toda el agua ingresada al reactor, además rápidamente se comienza a propagar humo y una pequeña llama en los alrededores de la ventana la cual es rápidamente extinguida con el uso de agua.

Una vez detenida la operación al tapar el disco parabólico, se procede al llenado de una bolsa de muestras la cual es llenada con éxito para su posterior análisis cromatográfico. Debido a que la operación, adquisición de datos y medidas de seguridad funcionan óptimamente no se toman aprendizajes de operación en esta prueba.

10. Resultados Obtenidos

10.1. Análisis de gases

10.1.1. Primer Análisis

Se lleva la muestra de gases obtenida el día 25 de octubre al laboratorio de termodinámica para un correspondiente análisis cromatográfico el día 26 de octubre, donde se realizan cinco análisis de gases utilizando helio como fase móvil en dos de ellos y nitrógeno en tres de ellos. Al comparar los resultados se observa que las variaciones porcentuales son mínimas por lo que tomamos un análisis obtenido utilizando helio como resultado final del análisis cromatográfico, el que entrega los valores porcentuales encontrados en la tabla N° 5 con su correspondiente cromatograma en la ilustración N° 30.

Tabla 5: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,2 [mL] de muestra obtenida en cuarta prueba.

Gas fase móvil	Componente	t [min]	A [μVs]	%vol.
He	H_2	2,563	12,788.60	27.0%
	CO	8,3	96,652.78	4.7%
	CH_4	9,225	461,259.38	23%
	CO_2	22,348	206,721.14	13.1%

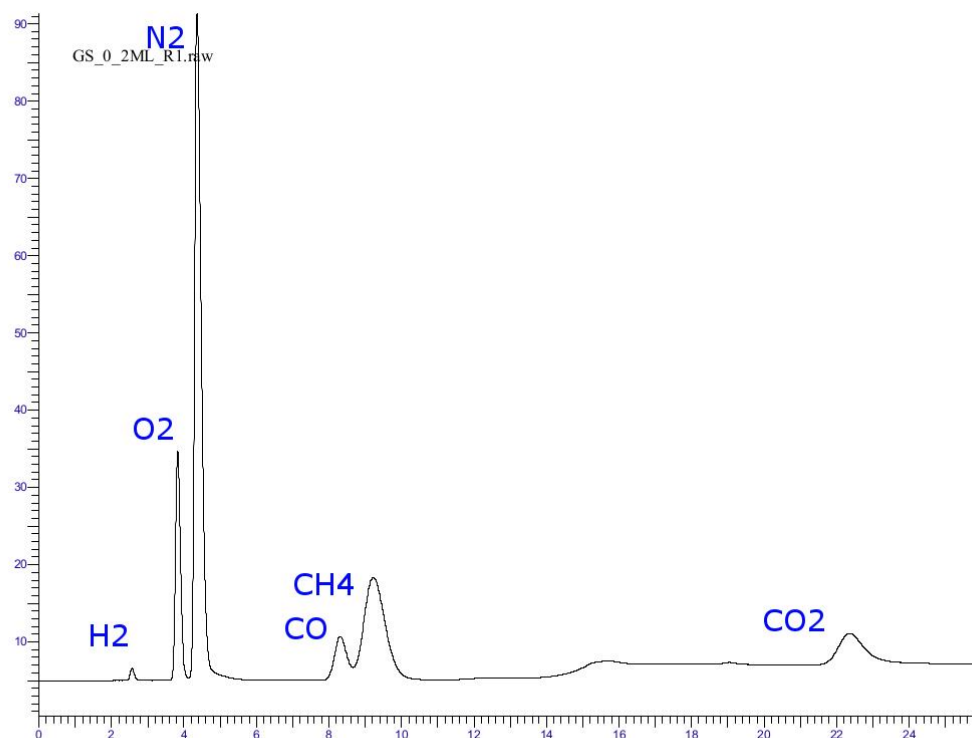


Ilustración 33: Cromatograma obtenido de la muestra de 0,2 mL de la quinta prueba.

Analizando los resultados obtenidos podemos afirmar que ocurren reacciones básicas de gasificación del carbón al interior del reactor, debido a la presencia de H_2 y CO en el análisis cromatográfico. Sin embargo, es también importante destacar el alto porcentaje obtenido de CH_4 , que indica que existe reacciones de mayor complejidad al interior del reactor como lo es la metanización y gasificación con hidrógeno probando así que la concentración solar alcanza un aporte energético suficiente para una gasificación exitosa del carbón.

10.1.2. Segundo Análisis

Se realiza un análisis cromatográfico el día 17 de noviembre a los gases obtenidos en la sexta prueba experimental, dónde se realizan dos análisis utilizando nitrógeno como fase móvil y uno con helio como fase móvil. Se observa que las variaciones porcentuales entre análisis son pequeñas por lo que se toma el análisis con helio como el resultado de los gases analizados.

Tabla 6: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,2 [mL] de muestra obtenida en sexta prueba.

Gas fase móvil	0.2	t [min]	A [μVs]	%vol.
He	H_2	2,684	8,736.41	18.3%
	CO	8,505	34,597.43	1.6%
	CH_4	9,202	256,966.12	12.8%
	CO_2	22,733	132,151.02	11.2%

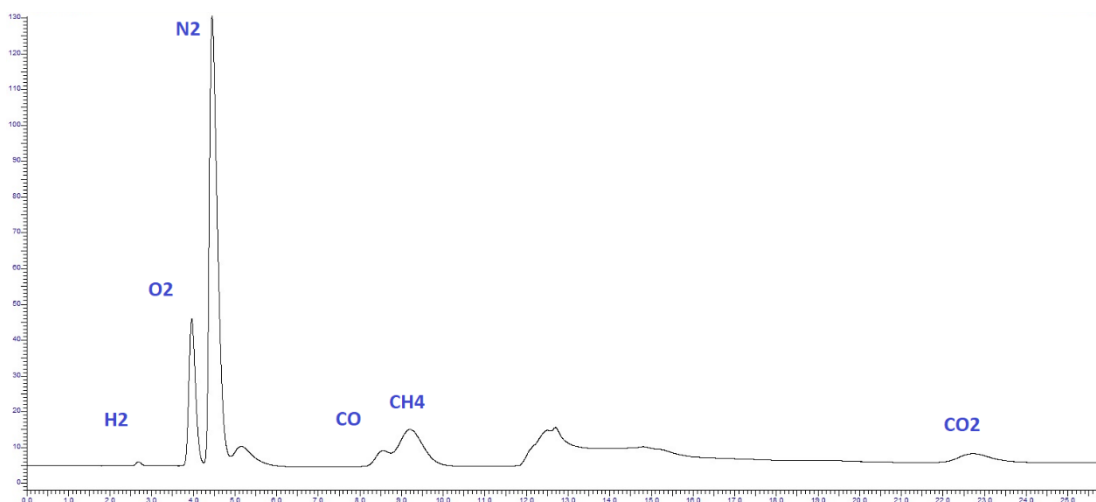


Ilustración 34: Cromatograma obtenido de la muestra de 0,2 mL de la sexta prueba.

Con los datos obtenidos podemos apreciar que se obtiene nuevamente un porcentaje significativo de hidrógeno lo que nos indica que ocurren las reacciones químicas básicas de gasificación como las reacciones de metanización y gasificación con hidrógeno debido a la presencia de metano. Se confirma lo obtenido en el análisis de la primera muestra obtenida en la cuarta prueba.

Sin embargo, al realizar una comparación de los porcentajes obtenidos en esta ocasión con la anterior, podemos apreciar que los porcentajes de componentes analizados son menores, esto puede haber ocurrido debido a que se generó menor cantidad de gases ya que sólo se alcanzó a llenar una bolsa de muestras mientras que la vez anterior se realizó el llenado de dos bolsas de muestras. Con esto es correcto decir que la última muestra contiene un mayor porcentaje de aire el cual inevitablemente contamina nuestras muestras por su presencia en el reactor como a lo largo de la manguera lo que diluye en cierta proporción los gases de síntesis. Otro factor influyente es la temperatura alcanzada en el área próxima a la ventana de cuarzo ya que de esta dependemos la cantidad y calidad del gas de síntesis generado, lamentablemente para la prueba anterior donde se tomaron muestras no hubo una medición de temperaturas al no tener disponible las termocuplas para su implementación por lo que se nos hace imposible realizar una comparación de estos parámetros entre pruebas.

10.2. Temperaturas

10.2.1. Temperaturas de prueba N° 5

Utilizando las termocuplas acopladas al reactor, el adquisidor de datos y un computador, el día jueves 9 de noviembre de 2017 se obtiene un registro de temperaturas a las cuales después de calcular valores promedios para facilitar la lectura de los datos se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 7: Temperaturas máximas y promedio obtenidas en la operación del reactor en la quinta prueba.

Condición	Temp. 1 [°C]	Temp. 2 [°C]	Temp. 3 [°C]	Temp. Promedio [°C]
Máxima alcanzada	359,68	86,47	28,73	156,46
Promedio obtenido	114,60	57,34	27,17	66,37

Además, con los datos se generan gráficos con el fin de ver de mejor manera el comportamiento de las temperaturas obtenidas a lo largo de la duración de la prueba, donde T_1 corresponde a la termocupla ubicada próxima a la ventana de cuarzo, mientras T_2 corresponde a la termocupla ubicada a 5 [cm] de la ventana y finalmente T_3 la termocupla ubicada a 20 [cm] de la ventana.

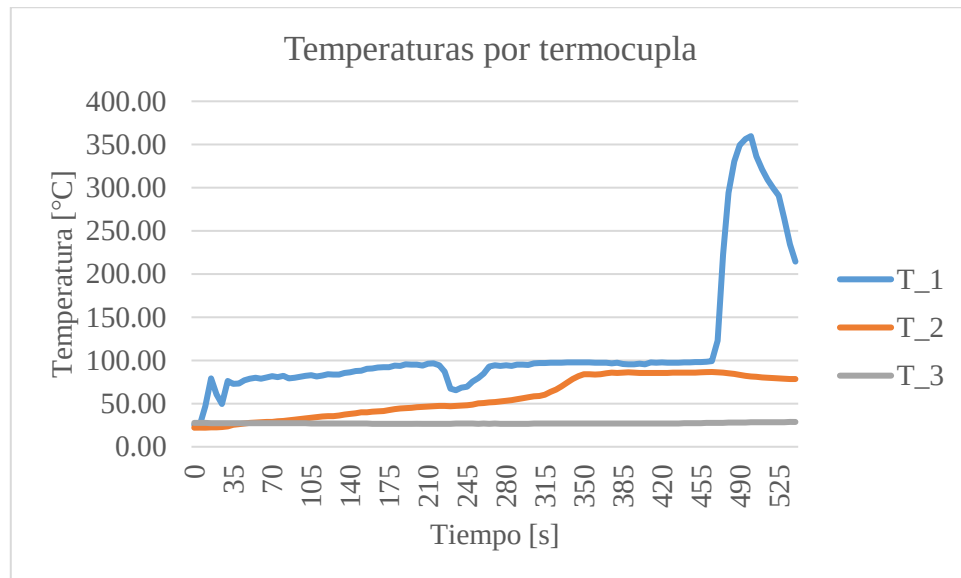


Ilustración 35: Gráfico de temperatura vs tiempo por termocupla en quinta prueba.

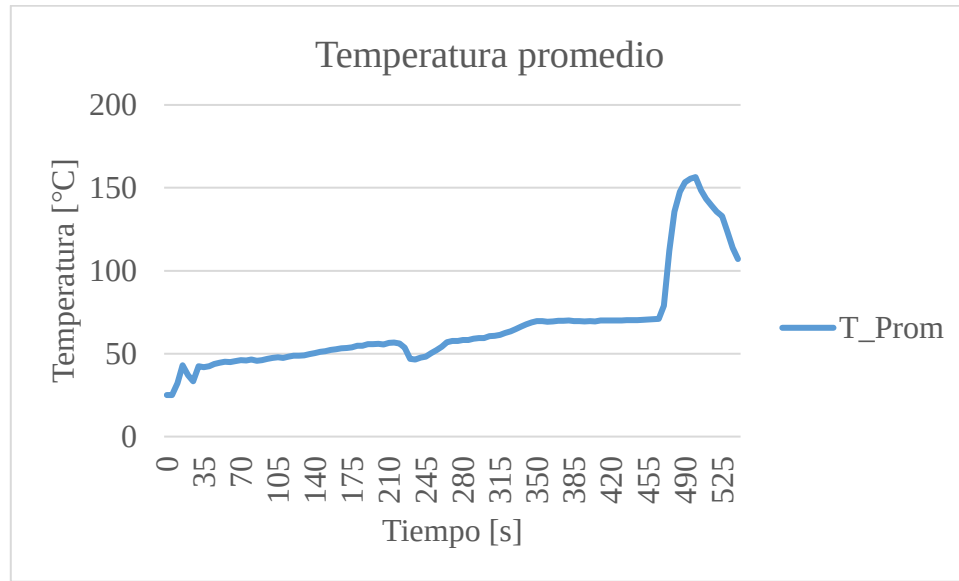


Ilustración 36: Gráfico temperatura promedio vs tiempo en quinta prueba.

Analizando la tabla y gráficos de temperatura obtenidos se puede observar que se alcanzan temperaturas elevadas cercanas a la ventana de cuarzo teniendo un máximo de 359 [°C], sin embargo, en el resto de las termocuplas la temperatura alcanzada no varía mucho a lo largo de la prueba, esto se produce principalmente a la fuga presentada durante la operación del reactor que provocó que el flujo de calor saliera del reactor por la ventana en vez de circular por el reactor hasta llegar al acumulador de gases. El aumento rápido de temperatura en la termocupla se produjo debido a que fue en ese momento en el que se terminó de perder el agua que se había ingresado al reactor por lo que el flujo de calor hacía el exterior disminuyó de manera considerable lo que produjo que se observara el máximo de temperatura antes mencionado.

En este caso es correcto tomar como dato relevante el máximo de temperatura obtenido en la termocupla 1, el que nos indica que en las cercanías de la ventana de cuarzo sí se alcanzan temperaturas elevadas que sean capaces de generar un proceso de gasificación, y que sería posible alcanzar temperaturas más elevadas si se logra una operación correcta del reactor. Además, debido a que la ubicación de la primera

termocupla no es en el punto foco es correcto asumir que la temperatura en este debe superar a la temperatura máxima registrada.

10.2.2. Temperaturas de prueba N° 6

Al igual que en la quinta prueba, se obtienen datos de temperaturas a los cuales se les realizan cálculos de promedios para generar la siguiente tabla:

Tabla 8: Temperaturas máximas y promedio obtenidas en la operación del reactor en la sexta prueba.

Condición	Temp. 1 [°C]	Temp. 2 [°C]	Temp. 3 [°C]	Temp. Promedio [°C]
Máxima alcanzada	227,56	95,87	92,49	133,78
Promedio obtenido	103,21	88,02	77,08	89,44

Además, se generan gráficos de temperaturas comparativos por termocupla y promedio en el interior del reactor.

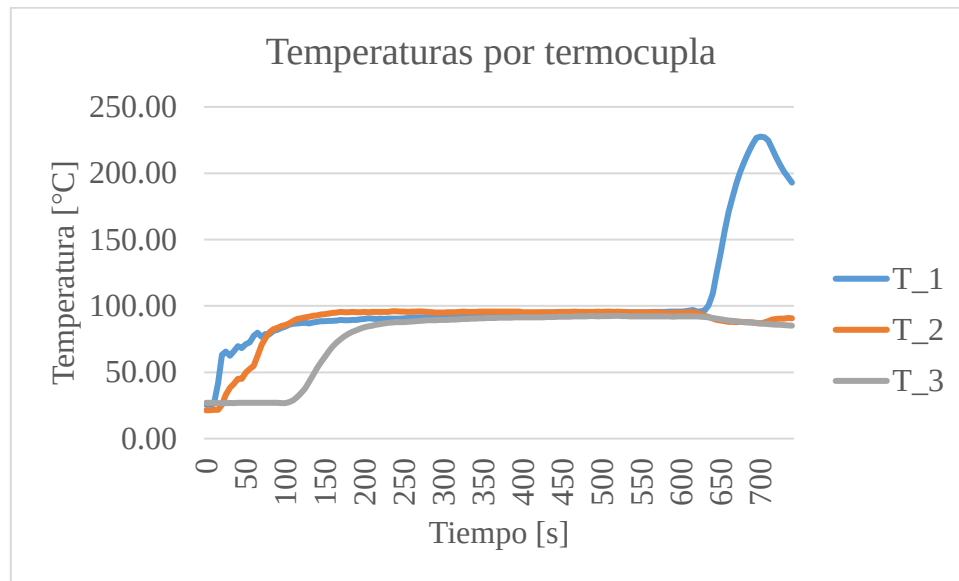


Ilustración 37: Gráfico de temperatura vs tiempo por termocupla en sexta prueba.

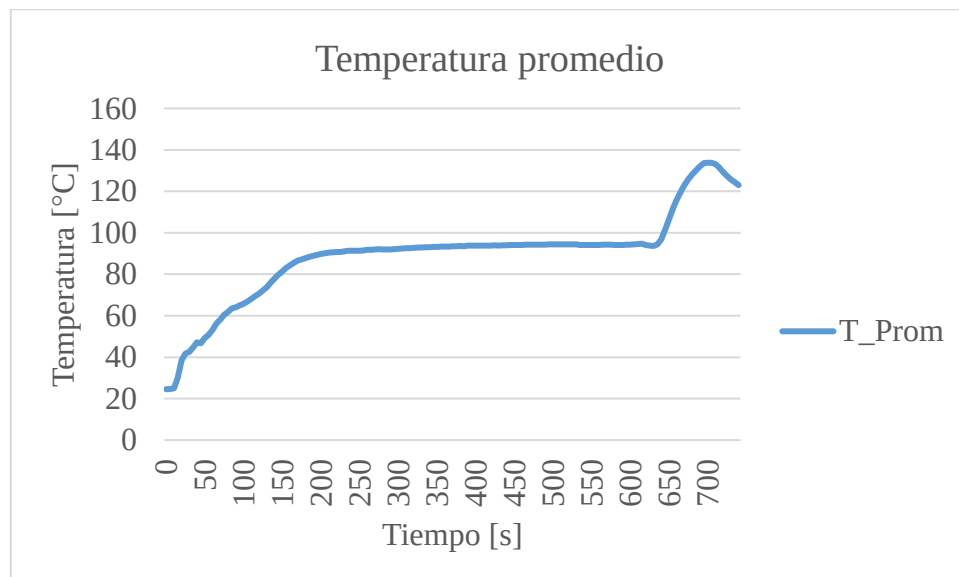


Ilustración 38: Gráfico temperatura promedio vs tiempo en sexta prueba.

Como se puede observar en la tabla 8 y en la ilustración 37, la temperatura de la tercera termocupla sí aumenta, esto es por el hecho que el funcionamiento del reactor es de manera correcta por lo que los gases generados sí pasan por la tercera termocupla lo que se traduce en el aumento de temperatura en esta, además provoca que la temperatura promedio en el reactor aumente a lo largo de la prueba en comparación con la quinta prueba.

El hecho de que la diferencia de temperatura promedio entre la primera termocupla y la tercera termocupla es de alrededor de 26 [°C] nos indica que existe un alto flujo de calor desde la zona de gasificación hacia el resto del reactor, tanto por convección debido a los gases producidos como conducción del agua, carbón y esferas de alúminas presentes en el interior del reactor. También, es importante notar que la temperatura promedio de la primera termocupla rodea los 100 [°C] y que sí hubo generación de hidrógeno en los gases analizados de la prueba, lo que lleva a concluir que esta termocupla no registra la temperatura a la cual se produce la gasificación del carbón ya que a la temperatura que se registra en la termocupla no se debería producir hidrógeno lo que si ocurre en la prueba realizada.

10.3. Eficiencia

Con el fin de obtener un valor de eficiencia de la prueba desarrollada es que necesitamos calcular el poder calorífico de los gases obtenidos, para esto se toma para el análisis la primera muestra de gases que fue analizada en el cromatógrafo en la cual encontramos los porcentajes en volumen de cada uno de los componentes. Sin embargo, no se realizó una cuantificación en volumen de las cantidades de oxígeno (O_2) ni nitrógeno (N_2), por lo cual estimamos que el volumen no analizado corresponde a estos gases en la misma proporción que se encuentran en el aire. Otro valor importante que se necesita a la hora de evaluar la eficiencia es la cantidad en masa que se gasificó de carbón por lo que se masa el remanente que queda de este combustible luego de una

prueba, obteniéndose que para la prueba que se está analizando se gasificó aproximadamente 0,011[kg] de carbón. También es requerido el uso de ciertas propiedades de los distintos componentes analizados lo cuales podemos ver en la Tabla 9.

Tabla 9: Propiedades de los componentes del syngas generado en la cuarta prueba.

Componente	%vol.	Poder Calorífico Superior (PCS) [MJ/kg]	Masa en un Nm3 del componente [kg]
H_2	27,0%	141,86	0,0900
CO	4,7%	10,10	0,2500
CH_4	23%	55,50	0,7600
CO_2	13,1%	-	1,9772
N_2	25,3%	-	1,4291
O_2	6,9%	-	1,2506

Con los valores obtenidos y las propiedades recopiladas de los componentes es que podemos realizar los cálculos para obtener el poder calorífico que aportan según su cantidad presente en la muestra de gas analizada.

Tabla 10: Poder calorífico por componente y total en el gas analizado.

Componente	Masa del %vol. en 1 Nm ³ [kg]	%masa en 1 Nm ³	Masa en 0,011 [kg]	Energía [J]
H_2	0,0243	2,6479%	0,000291	41319,04
CO	0,01175	1,2804%	0,000141	1422,47
CH_4	0,1748	19,0473%	0,002095	116283,6
CO_2	0,259013	28,2236%	-	-
N_2	0,361562	39,3980%	-	-
O_2	0,086291	9,4028%	-	-
Total	-	0,917717	-	159025,1

Para poder comparar el poder calorífico obtenido en la muestra es que necesitamos la energía aportada para generar ese gas, por lo que necesitamos los valores tanto del carbón gasificado como del aporte solar. Para este último es que se estima que la radiación es de $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, sin embargo, es importante precisar que este valor corresponde a la radiación directa y difusa por lo que se estima que la difusa es de un 20% (17), por lo que el valor de intensidad de radiación concentrada es de $800 \text{ [W/m}^2\text{]}$.

Tabla 11: Energía aportada a la gasificación.

Aporte energético	Poder Calorífico / Rad. Concentrada	Masa / Tiempo	Energía Aportada [J]
Carbón	25,6 [MJ/kg]	0,011 [kg]	281600
Sol	480 [W]	18 [Minutos]	864000
Total	-	-	800000

Ya con los valores totales calculados es que se comparan los valores de energía aportada a la gasificación y el poder calorífico de los gases producidos obteniéndose una eficiencia del proceso de un 19,9%.

Es importante tener en cuenta que los gases se encuentran inevitablemente contaminados por aire remanente en el reactor y manguera al inicio de la operación lo que cambiaría los valores de concentraciones y por lo tanto la eficiencia calculada.

11. Conclusiones

Considerando el marco del proyecto FONDAP “Solar Energy Research Center (SERCChile)”, donde el presente trabajo busca diseñar e implementar un gasificador solar rotatorio y que acorde al desarrollo del proyecto tanto en su parte teórica como experimental, además de los análisis de los resultados obtenidos se pueden presentar las siguientes conclusiones:

- Se logra implementar y operar de manera exitosa un gasificador de carbón solar tipo batch con la utilización de vapor de agua como agente gasificante y esferas de alúmina como medio poroso en su interior.
- La obtención de un alto porcentaje de H_2 y CH_4 en el análisis de gases, además del máximo de temperatura registrado, indica que la radiación solar directa concentrada en un punto alcanza los niveles de energía y temperatura requeridos para las reacciones químicas de gasificación.
- La temperatura de la primera termocupla muestra que esta no registra la temperatura del foco ni de la zona de gasificación del carbón ya que los valores registrados distan de las temperaturas a las cuales se produce la generación de hidrógeno el cual es identificado como producto en los gases generados.
- El alto flujo de calor desde la zona de gasificación hacia el resto del interior del reactor muestra que no sólo es importante aislar el reactor hacia el ambiente sino también de aislar la zona de gasificación de las zonas en las cuales no se produce gasificación por la baja temperatura que alcanzan.
- Si bien la gasificación requiere al agua en estado gaseoso, no es estrictamente necesario que se ingrese al reactor en el estado mencionado, ya que el calor aportado por la concentración solar es suficiente para generar la evaporación del agua además de producir la reacción química de gasificación.
- De acuerdo con los estados en que quedaron las ventanas de cuarzo, se puede decir que en la ventana se alcanzan temperaturas mayores a la temperatura de fusión del cuarzo que es de 1300 [°C], sin embargo, no se puede descartar que el cuarzo

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

utilizado no sea de buena calidad lo que disminuiría el punto de fusión de este material.

- Se encuentran esferas de alúmina partidas por la mitad, además de tener material carbonoso adherido a sus paredes, esto es un indicativo de que se alcanzan temperaturas mayores a 1000 [°C] que provocan que el carbón, sin la presencia de oxígeno para combustionar, se adhiera a las esferas y es posible que la diferencia de temperatura entre la parte de la esfera que recibe radiación y la que se encuentra tapada por carbón u otras esferas, provoque la ruptura de estas.
- Es importante realizar ajustes pertinentes con el fin de que el aporte energético por el sol sea el total de la energía concentrada ya que parte de esta no siempre incidía en la ventana de cuarzo, además de encontrar la forma de vaciar por completo el reactor y manguera de aire con el fin de no contaminar las muestras de los gases generados para obtener mejores análisis de gases como eficiencia del proceso.

12. Propuestas y Recomendaciones para Trabajos Futuros

Con el fin de que exista una mejora en futuras iteraciones de un gasificador rotatorio de carbón con aporte solar, es que se proponen las siguientes recomendaciones y propuestas de mejoras:

- Para tener una lectura real de la temperatura a la que se logra la gasificación se requiere que la termocupla tenga un posicionamiento más central y cercano a la ventana o al área donde llega la radiación concentrada del sol. Se recomienda por lo demás utilizar una termocupla que resista temperaturas mayores a 1000 [°C].
- Es de vital importancia encontrar la forma de aislar de mejor manera la zona de gasificación con el fin de tener un proceso más eficiente. Para esto, es necesario disminuir principalmente la conducción y convección del calor, siendo alternativas que el agua para gasificar sólo se encuentre en la zona de gasificación como también que los gases generados fluyan a través del reactor de manera más lenta con el fin de que la mayor parte del calor que porten queden en las zonas más cercanas a la zona de gasificación.
- Se recomienda como mejora utilizar una superficie emisora entre la ventana de cuarzo y el lecho compacto, o bien tener un posicionamiento del reactor, que evite que el carbón esté en contacto con el cuarzo para así disminuir el deterioro y el reemplazo de la ventana cada vez que se gasifique una carga de combustible sólido.
- Es de gran importancia el lograr un diseño de reactor que sea hermético y de fácil mantención como también que permita el vaciado y llenado de manera rápida y sencilla.
- Una ventana de mayores dimensiones y que tenga un sellado menos expuesto al calor recibido, disminuiría las mantenciones necesarias después de cada prueba.
- Ya que la junta rotatoria fabricada dejó de girar después de la primera prueba, se hace necesaria la adquisición de una junta rotatoria que pueda operar con gases a alta temperatura.

- Debido a la pequeña escala en que se implementó el reactor, fue posible que este se moviera junto al disco parabólico, sin embargo, dificultó en gran medida la rotación del reactor por lo que para reactores de mayor escala se recomienda utilizar una configuración de concentración solar que no requiera el movimiento continuo del reactor, lo que se traduciría en mayor seguridad, simplificación de la mantención y operación, y ahorro energético al evitar el movimiento de una estructura de gran envergadura.
- Ya que la operación de un gasificador solar de esta naturaleza se componen de varios sistemas, es requerido que se lleven a cabo las pruebas por al menos dos operarios, siendo recomendable que estén presentes tres personas para que se lleve un control adecuado de los sistemas como también una respuesta rápida ante situaciones peligrosas como lo es la presencia de llama por la inflamación de ciertos materiales al alcanzar elevadas temperaturas.

13. Referencias

1. **AGENCIA INTERNACIONAL DE LA ENERGÍA (AIE).** World Energy Outlook 2013. [En línea] [Citado el: 28 de 10 de 2017.] <<http://www.iea.org>>.
2. **BP.** Coal reserves. [En línea] [Citado el: 29 de 10 de 2017.] <www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/coal/coal-reserves.html>.
3. **HOLT, N.** *Gasification Technology Status*. s.l. : EPRI, 2012.
4. **WEISSERMEL, K.** *Química orgánica industrial*. 1981.
5. **SCHLOEGL, Ed. R.** *Chemical Energy Storage*. Berlín : De Gruyter, 2013.
6. **MILLER, Bruce G.** *Clean Coal Engineering Technology*. s.l. : Elsevier, 2010.
7. *SOLAR gasification of coal, activated carbon, coke and coal and biomass mixtures.* **Gregg, D. W. [et al].** 1980, Solar Energy Vol. 25, págs. 353-364.
8. **FERNANDEZ DIEZ, Pedro.** *Librería sobre ingeniería energética*. [En línea] [Citado el: 26 de 10 de 2017.] <<http://es.pfernandezdiez.es/>>.
9. *STATE of the art on reactor designs for solar gasification.* **Puig-Arnabat, M. [et al].** 2013.
10. **ETSAP.** Energy Technology Network. [En línea] 2010. [Citado el: 1 de Octubre de 2017.] <www.etsap.org>.
11. **LEE, Sunggyu, SPEIGHT, James G., LOYALKA, Sudarshan K.** *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. s.l. : Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
12. **MATHUR, V. K. , BREAUULT, R. W. , LAKSHMANAN, S.** *Coal gasification using solar energy*. 1983. págs. 433-440.
13. **SALDIVIA, David.** *Apuntes IWM-330 Heliotecnia*. Valparaíso : s.n., 2016.

14. **KALOGIROU, Soteris A.** *Solar thermal collectors and applications*. s.l. : Elsevier, 2004.
15. *RECOMMENDATIONS for the characterization of porous solids*. **Rouquerol, J. [et al]**. 1994, Pure & Appl. Chem., Vol. 66, págs. 1739-1758.
16. **MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES**. Cromatografía de gases. [En línea] [Citado el: 25 de 10 de 2017.] <<http://www.mncn.csic.es>>.
17. **GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE**. Manual Explorador Solar. [En línea] 2016. [Citado el: 16 de 11 de 2017.] <<http://www.dgf.uchile.cl/>>.
18. *SOLAR-DRIVEN gasification of carbonaceous feedstock—a review*. **Piatkowski, Nicolas [et al]**. s.l. : The Royal Society of Chemistry, 2011.
19. **STEINFELD, Aldo**. *Solar thermochemical production of hydrogen- a review*. s.l. : Solar Energy, 2005. Vol. 78.
20. **LEE, Woon-Jae, KIM, Sang-Done, SONG, Byung-Ho**. *Steam Gasification of an Australian Bituminous Coal in a Fluidized Bed*. s.l. : Korean J. Chem. Eng, 2002. Vol. 19.
21. **MINENERGÍA**. Explorador de energía solar para autoconsumo. [En línea] [Citado el: 12 de Septiembre de 2017.] <<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>>.

14. Anexos

14.1. Anexo 1: Análisis elemental del carbón utilizado

INSPECTORATE COLOMBIA LTDA.
Calle 76#54-11,Pisc10
Edificio World Trade Center
TEL.: + 57 (5) 3669450
Barranquilla - Colombia



INSPECTORATE

Certificate Nbr 01-23040
Our Ref 15040-1
Slate 15-078

TO : CMC COAL MARKETING COMPANY LTD
(COLBUN S.A.)

SELLER	Cerrejon Ltd c/o CMC Coal Marketing Co. Ltd
VESSEL	ARTVIN
SHIPPER	CERREJON
CONSIGNEE	COLBUN S.A.
PRODUCT	STEAM COAL IN BULK
LOADING PORT	PUERTO BOLIVAR, COLOMBIA
DISCHARGE PORT	1SP 1SB CORONEL, CHILE
DATE	MARCH 30th - 31st, 2015
QUANTITY	59,591.00 MT

SAMPLING AND ANALYSIS CERTIFICATE

This is to certify that the sampling of this cargo of coal was conducted by **INSPECTORATE COLOMBIA LTDA.**, According to ASTM standards.

INSPECTORATE COLOMBIA LTDA., certifies that the following analytical results were established by us, at the laboratory of PUERTO BOLIVAR, COLOMBIA in accordance with the applicable **ASTM** standards:

CALCULATED COMPOSITE

NET CALORIFIC VALUE ASTM - [D-5865-13]

NET CALORIFIC VALUE, Btu/Lb

NET CALORIFIC VALUE, Kcal/Kg

PROXIMATE ANALYSIS

Total Moisture, pct. wt. ASTM - [D-3302/D3302M-12]

Ash, pct. wt. ASTM - [D-3174-12]

Volatile matter, pct. wt. ASTM - [D-3175-11]

Fixed carbon, pct. wt.

Sulphur, pct. wt. ASTM - [D-4239-14]

Gross calorific value, Btu/Lb. ASTM - [D-5865-13]

Gross calorific value, Kcal/Kg

AS RECEIVED DRY BASIS

11023

12431

6124

6906

AS RECEIVED DRY BASIS

10.44

9.85

11.00

33.46

37.37

46.25

51.63

0.66

0.74

11546

12892

6415

7162

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

RESULTS BASED ON AVERAGE WEIGHTED COMPOSITE SAMPLE

ULTIMATE ANALYSIS

	AS RECEIVED	DRY BASIS
Total Moisture, pct. wt. ASTM - [D-3302/D-3302M-12]	10.44	
Carbon, pct. wt. ASTM - [D-5373-14]	64.98	72.56
Hydrogen, pct. wt. ASTM - [D-5373-14]	4.50	5.03
Nitrogen, pct. wt. ASTM - [D-5373-14]	1.33	1.48
Ash, pct. wt. ASTM - [D-3174-12]	9.85	11.00
Sulfur, pct. wt. ASTM - [D-4239-14]	0.66	0.74
Chlorine, pct. wt. ASTM - [D-4208-07(2012)]	0.03	0.03
Oxygen, pct. wt. (by diff)	8.21	9.16

MINERAL ANALYSIS OF ASH,% wt

AS IGNITED

Silica, SiO ₂ ASTM - [D-3682(2013)]	60.57
Alumina, Al ₂ O ₃ ASTM - [D-3682(2013)]	20.05
Titania, TiO ₂ ASTM - [D-3682(2013)]	1.04
Ferric Oxide, Fe ₂ O ₃ ASTM - [D-3682(2013)]	8.29
Lime, CaO ASTM - [D-3682(2013)]	2.14
Magnesia, MgO ASTM - D-3682(2013)]	2.02
Sodium Oxide, Na ₂ O ASTM - [D-3682(2013)]	0.66
Potassium Oxide, K ₂ O ASTM - [D-3682(2013)]	2.15
Phos. Pentoxide, P ₂ O ₅ ASTM - [D-2795-95]	0.22
Sulphur Trioxide, SO ₃ ASTM - [D-5016-08e1]	1.89
Undetermined	0.97

FUSION TEMPERATURE OF ASH OXIDIZING ASTM - [D-1857 M-04(2010)]

Initial deformation temperature. IT	1332 °C
Softening temperature, (H=W),ST	1387
Hemispherical temperature, (H=1/2W),HT	1441
Fluid temperature FT.	1488

FUSION TEMPERATURE OF ASH REDUCING ASTM - [D-1857-M-04(2010)]

Initial deformation temperature. IT	1243 °C
Softening temperature, (H=W),ST	1306
Hemispherical temperature, (H=1/2W),HT	1373
Fluid temperature FT.	1434

HARDGROVE GRINDABILITY INDEX ASTM - [D-409/D-409M-12]

HGI = 51 at 4.57 Percent of moisture

14.2. Anexo 2: Análisis cromatográfico

Tabla 12: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,2 [mL] de la cuarta prueba.

Gas fase móvil	Componente	t [min]	A [μVs]	%vol.
He	H_2	2.67	12,617.43	26.6%
	CO	8.669	108,112.97	5.3%
	CH_4	9.645	518,719.89	26%
	C_2H_6	-	-	-
	CO_2	22.948	181,608.90	12.5%

Tabla 13: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,1 [mL] de la cuarta prueba.

Gas fase móvil	0.1	t [min]	A [μVs]	%vol.
N_2	H_2	2.063	2,646,815.82	26%
	CH_4	3.935	308,344.94	4.9%
	CO_2	12.327	152,772.96	9.2%

Tabla 14: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,05 [mL] de la cuarta prueba.

Gas fase móvil	0.05	t [min]	A [μVs]	%vol.
N_2	H_2	2.061	1,172,507.78	23.4%
	CH_4	3.956	145,745.20	4.5%
	CO_2	12.407	55,124.16	8.7%

Tabla 15: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,08 [mL] de la cuarta prueba.

Gas fase móvil	0.08	t [min]	A [μVs]	%vol.
N_2	H_2	2.071	2,067,686.36	25.8%
	CH_4	3.96	248,356.11	4.9%
	CO_2	12.435	135,218.62	10.4%

Tabla 16: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,08 [mL] de la sexta prueba.

Gas fase móvil	0.1	t [min]	A [μVs]	%vol.
N2	H2	2.059	1,562,944.64	15.6%
	CH4	3.944	238,141.29	3.8%
	CO2	-	-	FR-U

Tabla 17: Resultado porcentual de análisis cromatográfico de un volumen inyectado de 0,08 [mL] de la sexta prueba.

Gas fase móvil	0.1	t [min]	A [μVs]	%vol.
N2	H2	2.067	1,513,228.25	15.1%
	CH4	3.96	237,011.81	3.8%
	CO2	-	-	FR-U

14.3. Anexo 3: Registro de Temperaturas

Tabla 18: Registro de temperaturas quinta prueba.

Hora	Fecha	T_1	T_2	T_3
	(M/D/A)	[°C]	[°C]	[°C]
12:47:30	11/9/2017	25.48	22.24	27.62
12:47:35	11/9/2017	25.41	22.18	27.53
12:47:40	11/9/2017	46.90	22.25	27.53
12:47:45	11/9/2017	79.14	22.30	27.47
12:47:50	11/9/2017	60.81	22.60	27.42
12:47:55	11/9/2017	49.47	22.95	27.38
12:48:00	11/9/2017	76.26	23.66	27.39
12:48:05	11/9/2017	72.78	25.38	27.35
12:48:10	11/9/2017	73.29	26.31	27.40
12:48:15	11/9/2017	76.94	26.93	27.39
12:48:20	11/9/2017	78.83	27.64	27.35
12:48:25	11/9/2017	79.77	27.99	27.35
12:48:30	11/9/2017	78.77	28.37	27.42
12:48:35	11/9/2017	80.23	28.80	27.37
12:48:40	11/9/2017	81.84	28.95	27.31

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

12:48:45	11/9/2017	80.83	29.42	27.32
12:48:50	11/9/2017	81.99	29.95	27.21
12:48:55	11/9/2017	79.01	30.62	27.23
12:49:00	11/9/2017	79.81	31.38	27.22
12:49:05	11/9/2017	81.07	32.22	27.16
12:49:10	11/9/2017	82.13	32.85	27.12
12:49:15	11/9/2017	82.94	33.47	27.10
12:49:20	11/9/2017	81.27	34.24	27.04
12:49:25	11/9/2017	82.35	34.98	27.02
12:49:30	11/9/2017	83.98	35.35	26.93
12:49:35	11/9/2017	83.69	35.55	26.93
12:49:40	11/9/2017	83.61	36.34	26.91
12:49:45	11/9/2017	85.32	37.15	26.83
12:49:50	11/9/2017	86.03	38.03	26.84
12:49:55	11/9/2017	87.78	38.84	26.89
12:50:00	11/9/2017	88.06	39.77	26.85
12:50:05	11/9/2017	90.30	39.87	26.80
12:50:10	11/9/2017	90.77	40.61	26.73
12:50:15	11/9/2017	91.83	40.86	26.70
12:50:20	11/9/2017	92.01	41.55	26.65
12:50:25	11/9/2017	91.96	42.51	26.67
12:50:30	11/9/2017	93.89	43.46	26.70
12:50:35	11/9/2017	93.63	44.16	26.62
12:50:40	11/9/2017	95.59	44.71	26.69
12:50:45	11/9/2017	95.24	45.23	26.65
12:50:50	11/9/2017	95.19	45.80	26.61
12:50:55	11/9/2017	93.96	46.25	26.63
12:51:00	11/9/2017	96.11	46.62	26.68
12:51:05	11/9/2017	96.58	46.82	26.69
12:51:10	11/9/2017	94.46	47.26	26.73
12:51:15	11/9/2017	86.92	47.41	26.67
12:51:20	11/9/2017	67.14	46.82	26.72
12:51:25	11/9/2017	65.53	47.16	26.78
12:51:30	11/9/2017	68.55	47.49	26.75
12:51:35	11/9/2017	69.65	48.10	26.75
12:51:40	11/9/2017	75.38	48.91	26.75
12:51:45	11/9/2017	79.39	50.11	26.71
12:51:50	11/9/2017	84.81	50.78	26.76
12:51:55	11/9/2017	92.76	51.37	26.74
12:52:00	11/9/2017	94.25	51.93	26.75
12:52:05	11/9/2017	93.61	52.62	26.73

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

12:52:10	11/9/2017	94.49	53.27	26.73
12:52:15	11/9/2017	93.67	54.15	26.72
12:52:20	11/9/2017	95.08	55.07	26.69
12:52:25	11/9/2017	95.28	56.05	26.68
12:52:30	11/9/2017	94.60	57.15	26.71
12:52:35	11/9/2017	96.48	58.60	26.75
12:52:40	11/9/2017	96.79	58.85	26.78
12:52:45	11/9/2017	96.94	60.23	26.81
12:52:50	11/9/2017	97.22	63.57	26.84
12:52:55	11/9/2017	97.40	66.21	26.91
12:53:00	11/9/2017	97.45	70.02	26.95
12:53:05	11/9/2017	97.58	74.33	26.99
12:53:10	11/9/2017	97.69	78.37	26.98
12:53:15	11/9/2017	97.69	81.89	26.99
12:53:20	11/9/2017	97.76	83.92	26.99
12:53:25	11/9/2017	97.55	84.13	26.95
12:53:30	11/9/2017	97.22	83.45	26.96
12:53:35	11/9/2017	97.28	83.88	26.93
12:53:40	11/9/2017	97.25	84.92	27.00
12:53:45	11/9/2017	96.48	86.00	27.07
12:53:50	11/9/2017	97.37	85.49	27.08
12:53:55	11/9/2017	95.71	86.01	27.10
12:54:00	11/9/2017	95.60	86.37	27.04
12:54:05	11/9/2017	95.39	85.90	27.01
12:54:10	11/9/2017	96.18	85.62	26.95
12:54:15	11/9/2017	95.49	85.63	26.90
12:54:20	11/9/2017	97.57	85.61	26.90
12:54:25	11/9/2017	97.46	85.42	27.00
12:54:30	11/9/2017	97.51	85.44	27.00
12:54:35	11/9/2017	97.42	85.52	27.06
12:54:40	11/9/2017	97.30	85.84	27.09
12:54:45	11/9/2017	97.44	85.79	27.11
12:54:50	11/9/2017	97.61	85.90	27.20
12:54:55	11/9/2017	97.73	85.84	27.27
12:55:00	11/9/2017	98.06	85.94	27.33
12:55:05	11/9/2017	98.21	86.08	27.36
12:55:10	11/9/2017	98.29	86.47	27.53
12:55:15	11/9/2017	99.05	86.43	27.67
12:55:20	11/9/2017	122.87	86.28	27.74
12:55:25	11/9/2017	222.47	85.80	27.78
12:55:30	11/9/2017	293.99	85.25	27.87

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

12:55:35	11/9/2017	330.47	84.25	28.01
12:55:40	11/9/2017	349.11	83.07	28.13
12:55:45	11/9/2017	356.39	82.21	28.15
12:55:50	11/9/2017	359.68	81.44	28.25
12:55:55	11/9/2017	336.42	80.95	28.32
12:56:00	11/9/2017	321.00	80.43	28.39
12:56:05	11/9/2017	309.36	79.89	28.47
12:56:10	11/9/2017	299.07	79.49	28.48
12:56:15	11/9/2017	290.79	79.17	28.53
12:56:20	11/9/2017	264.32	78.90	28.57
12:56:25	11/9/2017	234.36	78.58	28.68
12:56:30	11/9/2017	214.24	78.27	28.73

Tabla 19: Registro de temperaturas y radiación sexta prueba.

Hora	Fecha	T_1	T_2	T_3	Radiación
	(M/D/A)	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]
12:14:14	11/16/2017	25.46	21.27	26.89	1036.896
12:14:19	11/16/2017	25.48	21.36	26.94	1034.672
12:14:24	11/16/2017	26.24	21.62	26.85	1032.574
12:14:29	11/16/2017	42.01	21.58	26.84	1037.085
12:14:34	11/16/2017	63.14	25.60	26.81	1036.123
12:14:39	11/16/2017	65.65	32.90	26.82	1037.937
12:14:44	11/16/2017	62.39	38.39	26.81	1037.763
12:14:49	11/16/2017	65.83	41.30	26.82	1037.921
12:14:54	11/16/2017	69.59	45.07	26.85	1037.448
12:14:59	11/16/2017	68.23	45.06	26.88	1038.647
12:15:04	11/16/2017	71.13	49.59	26.98	1038.931
12:15:09	11/16/2017	72.60	52.59	27.03	1039.956
12:15:14	11/16/2017	77.26	54.71	27.00	1039.419
12:15:19	11/16/2017	79.82	62.29	26.95	1039.735
12:15:24	11/16/2017	76.76	70.61	27.01	1039.656
12:15:29	11/16/2017	78.82	75.63	26.94	1040.05
12:15:34	11/16/2017	78.64	80.05	26.96	1039.972
12:15:39	11/16/2017	81.26	82.41	26.94	1039.577
12:15:44	11/16/2017	81.98	83.35	26.85	1039.151
12:15:49	11/16/2017	83.35	84.75	26.83	1039.514
12:15:54	11/16/2017	84.49	85.62	26.82	1038.237
12:15:59	11/16/2017	85.93	86.77	27.53	1038.584
12:16:04	11/16/2017	86.55	88.82	28.92	1038.678

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

12:16:09	11/16/2017	86.71	90.12	31.28	1039.104
12:16:14	11/16/2017	87.09	90.77	34.14	1038.568
12:16:19	11/16/2017	87.17	91.39	37.89	1038.126
12:16:24	11/16/2017	86.72	91.86	42.71	1039.12
12:16:29	11/16/2017	87.42	92.54	47.86	1038.442
12:16:34	11/16/2017	88.07	92.86	52.92	1039.246
12:16:39	11/16/2017	88.55	93.46	57.42	1038.962
12:16:44	11/16/2017	88.50	93.81	61.71	1039.009
12:16:49	11/16/2017	88.80	94.25	65.86	1039.041
12:16:54	11/16/2017	88.81	94.63	69.45	1039.293
12:16:59	11/16/2017	88.92	95.09	72.47	1039.419
12:17:04	11/16/2017	89.40	95.36	74.98	1038.994
12:17:09	11/16/2017	89.32	95.28	77.14	1039.183
12:17:14	11/16/2017	89.16	95.24	79.05	1038.457
12:17:19	11/16/2017	89.34	95.56	80.54	1038.536
12:17:24	11/16/2017	89.41	95.31	81.73	1038.773
12:17:29	11/16/2017	89.91	95.31	82.84	1038.047
12:17:34	11/16/2017	90.12	95.36	83.81	1038.568
12:17:39	11/16/2017	90.54	95.27	84.56	1038.41
12:17:44	11/16/2017	90.43	95.58	85.21	1038.71
12:17:49	11/16/2017	90.28	95.55	85.75	1039.293
12:17:54	11/16/2017	90.29	95.50	86.22	1038.741
12:17:59	11/16/2017	90.20	95.42	86.72	1039.798
12:18:04	11/16/2017	90.50	95.53	87.16	1039.057
12:18:09	11/16/2017	90.39	95.87	87.56	1038.82
12:18:14	11/16/2017	90.43	95.84	87.69	1038.899
12:18:19	11/16/2017	90.40	95.73	87.80	1039.451
12:18:24	11/16/2017	90.61	95.69	87.87	1038.867
12:18:29	11/16/2017	90.94	95.55	88.03	1038.11
12:18:34	11/16/2017	91.25	95.71	88.29	1038.347
12:18:39	11/16/2017	91.34	95.82	88.49	1038.095
12:18:44	11/16/2017	91.38	95.87	88.78	1037.842
12:18:49	11/16/2017	91.49	95.74	88.96	1038.047
12:18:54	11/16/2017	91.57	95.41	89.12	1038.568
12:18:59	11/16/2017	91.47	95.11	89.17	1037.984
12:19:04	11/16/2017	91.74	94.90	89.29	1038.347
12:19:09	11/16/2017	91.85	94.94	89.34	1038.158
12:19:14	11/16/2017	92.30	94.96	89.39	1038.584
12:19:19	11/16/2017	92.53	95.16	89.45	1038.615
12:19:24	11/16/2017	92.61	95.33	89.60	1038.347
12:19:29	11/16/2017	92.69	95.20	89.71	1038.284

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles
sólidos con aporte solar.

12:19:34	11/16/2017	92.86	95.43	89.94	1038.726
12:19:39	11/16/2017	92.87	95.62	90.10	1038.82
12:19:44	11/16/2017	92.92	95.40	90.22	1039.246
12:19:49	11/16/2017	93.05	95.54	90.36	1039.057
12:19:54	11/16/2017	93.04	95.42	90.45	1038.915
12:19:59	11/16/2017	93.28	95.72	90.55	1039.404
12:20:04	11/16/2017	93.25	95.68	90.65	1039.372
12:20:09	11/16/2017	93.43	95.74	90.77	1039.625
12:20:14	11/16/2017	93.54	95.71	90.83	1039.546
12:20:19	11/16/2017	93.62	95.62	90.98	1039.625
12:20:24	11/16/2017	93.62	95.77	91.04	1039.703
12:20:29	11/16/2017	93.69	95.65	91.05	1039.388
12:20:34	11/16/2017	93.90	95.74	91.12	1039.104
12:20:39	11/16/2017	93.69	95.62	91.19	1039.972
12:20:44	11/16/2017	94.33	95.73	91.29	1039.719
12:20:49	11/16/2017	94.48	95.77	91.29	1039.83
12:20:54	11/16/2017	94.63	95.33	91.30	1040.271
12:20:59	11/16/2017	94.63	95.32	91.31	1040.066
12:21:04	11/16/2017	94.65	95.32	91.32	1040.965
12:21:09	11/16/2017	94.74	95.35	91.40	1041.454
12:21:14	11/16/2017	94.86	95.19	91.41	1041.123
12:21:19	11/16/2017	94.95	95.29	91.45	1040.95
12:21:24	11/16/2017	94.87	95.19	91.53	1040.003
12:21:29	11/16/2017	94.99	95.26	91.66	1040.208
12:21:34	11/16/2017	95.00	95.21	91.73	1040.397
12:21:39	11/16/2017	95.07	95.43	91.75	1040.145
12:21:44	11/16/2017	95.13	95.46	91.83	1040.271
12:21:49	11/16/2017	95.13	95.51	91.92	1040.019
12:21:54	11/16/2017	94.99	95.49	91.96	1039.972
12:21:59	11/16/2017	95.03	95.65	92.05	1039.893
12:22:04	11/16/2017	95.06	95.48	92.14	1040.24
12:22:09	11/16/2017	95.07	95.56	92.17	1038.11
12:22:14	11/16/2017	94.97	95.49	92.15	1038.41
12:22:19	11/16/2017	95.13	95.53	92.27	1043.3
12:22:24	11/16/2017	95.19	95.44	92.26	1042.464
12:22:29	11/16/2017	95.28	95.60	92.21	1042.621
12:22:34	11/16/2017	95.26	95.56	92.31	1043.3
12:22:39	11/16/2017	95.30	95.62	92.30	1043.883
12:22:44	11/16/2017	95.35	95.60	92.42	1043.805
12:22:49	11/16/2017	95.38	95.53	92.49	1043.631
12:22:54	11/16/2017	95.34	95.61	92.46	1043.694

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

12:22:59	11/16/2017	95.31	95.37	92.45	1043.584
12:23:04	11/16/2017	95.31	95.44	92.33	1044.073
12:23:09	11/16/2017	95.23	95.03	92.19	1043.473
12:23:14	11/16/2017	95.24	95.03	92.19	1044.23
12:23:19	11/16/2017	95.24	95.12	92.11	1042.969
12:23:24	11/16/2017	95.17	94.96	92.14	1044.325
12:23:29	11/16/2017	95.23	95.13	92.10	1044.23
12:23:34	11/16/2017	95.14	95.26	92.09	1043.741
12:23:39	11/16/2017	95.42	95.32	92.03	1043.836
12:23:44	11/16/2017	95.52	95.16	92.05	1045.745
12:23:49	11/16/2017	95.58	95.05	92.11	1045.713
12:23:54	11/16/2017	95.59	94.73	92.03	1045.666
12:23:59	11/16/2017	95.66	94.79	92.01	1045.871
12:24:04	11/16/2017	95.75	94.72	91.97	1045.603
12:24:09	11/16/2017	95.69	95.08	92.05	1045.682
12:24:14	11/16/2017	95.74	95.08	92.01	1045.177
12:24:19	11/16/2017	96.00	95.05	92.06	1044.893
12:24:24	11/16/2017	96.49	95.29	92.12	1045.855
12:24:29	11/16/2017	96.86	95.22	92.10	1045.287
12:24:34	11/16/2017	95.77	94.72	92.03	1046.107
12:24:39	11/16/2017	95.87	93.71	91.91	1046.155
12:24:44	11/16/2017	96.78	92.55	91.65	1046.391
12:24:49	11/16/2017	100.66	91.52	91.28	1045.571
12:24:54	11/16/2017	109.49	90.43	90.85	1046.092
12:24:59	11/16/2017	124.78	89.56	90.47	1045.603
12:25:04	11/16/2017	140.55	88.87	89.94	1046.928
12:25:09	11/16/2017	156.59	88.46	89.52	1046.644
12:25:14	11/16/2017	170.44	88.04	89.05	1046.281
12:25:19	11/16/2017	182.41	87.89	88.71	1045.997
12:25:24	11/16/2017	192.67	87.86	88.36	1046.644
12:25:29	11/16/2017	201.39	88.00	88.08	1045.934
12:25:34	11/16/2017	209.02	87.81	87.87	1046.707
12:25:39	11/16/2017	215.56	87.75	87.62	1046.691
12:25:44	11/16/2017	221.33	87.58	87.44	1047.007
12:25:49	11/16/2017	226.66	87.03	87.15	1047.622
12:25:54	11/16/2017	227.56	86.87	86.88	1044.924
12:25:59	11/16/2017	227.26	87.50	86.60	1045.335
12:26:04	11/16/2017	224.82	88.56	86.38	1045.776
12:26:09	11/16/2017	218.66	89.67	86.17	1045.571
12:26:14	11/16/2017	211.95	90.05	85.94	1047.101
12:26:19	11/16/2017	206.50	90.30	85.71	1047.669

Diseño e implementación de un reactor rotatorio de gasificación de combustibles sólidos con aporte solar.

12:26:24	11/16/2017	201.33	90.41	85.47	1048.647
12:26:29	11/16/2017	197.01	90.77	85.39	1048.679
12:26:34	11/16/2017	192.94	90.73	85.16	1046.376