

Diseño Conceptual de un Prototipo de Gasificación de Biomasa de Lecho Fijo tipo
Updraft con capacidad de 10 kg/h.

Paúl Andrés Solis Yépez

Universidad Internacional SEK

Nota de Autor

Paul Andrés Solis Yépez, Facultad de Arquitectura e Ingenierías, Universidad
Internacional SEK; Director Luis Tipanluisa.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:
pasyimsek@gmail.com

Declaración Juramentada

Yo, PAUL SOLIS YEPEZ, con cédula de identidad 171582937-8, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

PAUL SOLIS YEPEZ

C.I.: 171582937-8

Dedicatoria

El presente proyecto se lo dedico especialmente a mis padres, Paul y Cristina, quienes a través de sus sabios consejos y enseñanzas, han servido como fuente de inspiración para permitirme llegar cada día más lejos. Su herencia más grande ha sido siempre el espíritu de lucha y la perseverancia.

Agradezco a mis hermanos, Alex Xavier y Cristian David, por su apoyo y cariño incondicional; por ser mi soporte en los momentos de mayor dificultad y haber compartido conmigo cada uno de mis triunfos.

A mis amigos Jean, Santiago y Sebastián, un abrazo fraterno, por haber sido siempre parte de mí lucha. Quienes con humildad me enseñaron el valor de la amistad verdadera y me enriquecieron con ella.

Gracias a todos ustedes por haber sido parte de esta etapa de crecimiento personal y profesional.

Paul Andrés Solis Yépez

Julio 2015

Índice de Contenidos

Introducción	13
Estado del arte	15
Clasificación de la Biomasa.....	15
<i>Biomasa natural</i>	15
<i>Biomasa residual</i>	15
<i>Cultivos energéticos</i>	15
<i>Excedentes agrícolas</i>	16
Procesos de conversión de la Biomasa	17
Tipos de Reactores	19
Método	26
Descripción de alternativas.....	26
Diseño físico - químico del reactor.....	31
Proceso de gasificación en reactores.....	33
Estequiometria de la combustión	35
Composición de la cascarilla de arroz.	39
Estequiometria de la gasificación.	39
Poder calorífico superior e inferior de la cascarilla	44
Reacciones de gasificación	45
Calculo de la velocidad global de gasificación y volumen del reactor.....	57
Cálculo de la temperatura de los gases a la salida del gasificador.....	65

Velocidad de salida de los gases y energía térmica del gasificador	67
Diseño mecánico del sistema de alimentación, estructura metálica del reactor y equipo de alimentación de aire	69
Diseño mecánico del reactor	69
Selección del equipo de alimentación de aire para gasificar	73
Diseño del sistema de alimentación de biomasa.....	74
Diseño térmico del gasificador tipo updraft	102
Determinación de los coeficientes de transferencia de calor por conducción	103
Coeficiente de transferencia de calor por convección interna	104
Radio crítico y espesor de aislamiento.....	107
Coeficiente de transferencia de calor por convección externa.....	108
Determinación de la radiación de los gases	109
Coeficiente global de transferencia de calor	112
Calor que se disipa en el gasificador.....	114
Resultados	116
Resultados del diseño físico - químico del reactor	116
Resultados del diseño mecánico del reactor	118
Resultados del diseño térmico del reactor	120
Discusión.....	122
Conclusiones.....	122
Recomendaciones	123
Anexos.....	124

Anexo A <i>Reacciones típicas de gasificación a 25 °C</i>	124
Anexo B <i>Descripción electrodo 7018.</i>	125
Anexo C <i>Código de clasificación de materiales para transporte.</i>	126
Anexo D <i>Factores de capacidad para tornillos helicoidales</i>	127
Anexo E <i>Capacidades de transporte</i>	128
Anexo F <i>Eficiencias mecánicas (conjunto de transmisión).</i>	129
Anexo G <i>Eficiencias mecánicas (componentes individuales).</i>	130
Anexo H <i>Acoplamiento del eje transmisor</i>	131
Anexo I <i>Acoplamiento del eje conducido.</i>	132
Anexo J <i>Cubiertas planas y con pestaña.</i>	133
Anexo K <i>Canal de alimentación</i>	134
Anexo L <i>Alimentación estándar para canales en U.</i>	135
Anexo M <i>Descarga estándar para canales en U</i>	136
Anexo N <i>Placas para canales en U</i>	137
Anexo O <i>Planchas laminadas en frío AISI 1010.</i>	138
Anexo P <i>Eje de transmisión AISI 1018.</i>	139
Anexo Q <i>Eje tubular del helicoidal ASTM A513</i>	140
Anexo R <i>Tubería de acero negro sin costura cedula 40</i>	141
Anexo S <i>Planchas galvanizadas ASTM A653</i>	142
Anexo T <i>Planos del gasificador</i>	143
Referencias Bibliográficas	144

Índice de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1. <i>Principales residuos en la producción agrícola</i>	16
Tabla 2. <i>Ventajas y desventajas de los distintos tipos de Gasificadores.</i>	23
Tabla 3. <i>Cuadro comparativo de algunos Gasificadores comerciales.</i>	24
Tabla 4. <i>Tabla descriptiva de alternativas.</i>	26
Tabla 5. <i>Rangos de Calificación de Aspectos Técnicos.</i>	27
Tabla 6. <i>Validación y Calificación de las propuestas existentes</i>	28
Tabla 7. <i>Selección del tipo de gasificador</i>	29
Tabla 8. <i>Propiedades y características físicas de la cascarilla de arroz.</i>	31
Tabla 9. <i>Propiedades y características químicas de la cascarilla de arroz.</i>	32
Tabla 10. <i>Análisis de la Cascarilla de Arroz a nivel mundial.</i>	32
Tabla 11. <i>Calor de formación de varios elementos y compuestos a condiciones estándar, 25°C y 1bar de presión.</i>	46
Tabla 12. <i>Calor específico de ciertos gases.</i>	48
Tabla 13. <i>Tabla Estequiométrica de un Sistema de Flujo.</i>	58
Tabla 14. <i>Resultados de la tabla estequiométrica.</i>	59
Tabla 15. <i>Características técnicas del electrodo 7018.</i>	70
Tabla 16. <i>Características Blower Centrífugo T - CZR / 150 W.</i>	73
Tabla 17. <i>Características de los materiales.</i>	79
Tabla 18. <i>Selección del tornillo helicoidal.</i>	80
Tabla 19. <i>Tamaño de bulto máximo para tornillos estándar.</i>	82
Tabla 20. <i>Factor de modificación de vuelo.</i>	84

Tabla 21. <i>Factor de las paletas o aspas.</i>	85
Tabla 22. <i>Factor de diámetro del tornillo</i>	85
Tabla 23. <i>Factor del rodamiento.</i>	86
Tabla 24. <i>Torque máximo de los componentes.</i>	88
Tabla 25. <i>Dimensiones del tornillo helicoidal.</i>	92
Tabla 26. <i>Rodamiento ubicado al inicio de la transmisión.</i>	94
Tabla 27. <i>Rodamiento a la salida del eje conducido.</i>	94
Tabla 28. <i>Junta plana de soporte para rodamiento.</i>	95
Tabla 29. <i>Bujes o collarines internos.</i>	96
Tabla 30. <i>Pernos de acoplamiento.</i>	96
Tabla 31. <i>Motovariadores serie VHA.</i>	100
Tabla 32. <i>Dimensiones del motovariador.</i>	101
Tabla 33. <i>Propiedades de los gases a presión atmosférica.</i>	105
Tabla 34. <i>Numero de Reynolds para los distintos gases.</i>	106
Tabla 35. <i>Coefficiente de convección para los distintos gases.</i>	107
Tabla 36. <i>Resultados de la combustión</i>	116
Tabla 37. <i>Resultados de la reacción global de gasificación</i>	116
Tabla 38. <i>Resultados de las distintas reacciones de gasificación (800°C).</i>	117
Tabla 39. <i>Resultados finales del diseño físico-químico del gasificador</i>	118
Tabla 40. <i>Resultados finales del diseño mecánico del gasificador</i>	118
Tabla 41. <i>Materiales utilizados para el reactor</i>	119
Tabla 42. <i>Resultados finales del diseño térmico del gasificador</i>	120
Tabla 43. <i>Radio térmico de aislamiento y temperatura de los materiales</i>	121

Figuras

<i>Figura 1.</i> Procesos de conversión energética de la biomasa.....	18
<i>Figura 2.</i> Gasificador tipo Updraft.	20
<i>Figura 3.</i> Gasificador tipo Downdraft.....	20
<i>Figura 4.</i> Gasificador tipo Crossdraft.	21
<i>Figura 5.</i> Gasificador de lecho móvil.	21
<i>Figura 6.</i> Gasificador de lecho fluidizado.	22
<i>Figura 7.</i> Balanza electrónica correctamente encerada.	60
<i>Figura 8.</i> Peso del vaso de precipitación.	61
<i>Figura 9.</i> Vaso de precipitación con cascarilla de arroz.	61
<i>Figura 10.</i> Peso del vaso de precipitación que contiene cascarilla.....	61
<i>Figura 11.</i> Blower centrífugo para alimentación de aire	74
<i>Figura 12.</i> Tornillo estándar.	75
<i>Figura 13.</i> Tornillo de paso corto.	75
<i>Figura 14.</i> Tornillo de paso medio.....	76
<i>Figura 15.</i> Tornillo de transporte cónico	76
<i>Figura 16.</i> Tornillo de cinta simple.	77
<i>Figura 17.</i> Tornillo de vuelo cortante.	77
<i>Figura 18.</i> Tornillo de paletas.....	78
<i>Figura 19.</i> Juego radial requerido para tornillos helicoidales.....	82
<i>Figura 20.</i> Factor de sobrecarga.	84
<i>Figura 21.</i> Esquema general de un transportador helicoidal.	90
<i>Figura 22.</i> Motoreductores de tornillo sinfín con pre-reductor.	98
<i>Figura 23.</i> Motovariadores con reductor de engranes.	99
<i>Figura 24.</i> Etapas de gasificación en un reactor tipo updraft..	102
<i>Figura 25.</i> Coeficiente de radiación gaseosa para el vapor de agua.	110

<i>Figura 26.</i> Coeficiente de radiación gaseosa para el anhídrido carbónico.	110
<i>Figura 27.</i> Distribución de temperaturas del sistema de aislamiento	121

Resumen

El presente proyecto consiste en el diseño conceptual de un Gasificador Updraft, que va desde la selección del tipo de combustible para su estudio, así como del agente gasificante para garantizar la obtención del SYNGAS a bajas temperaturas. La primera etapa en el diseño del prototipo comprende el diseño termo-químico, donde se analizan las principales reacciones que ocurren dentro del mismo para determinar la relación aire-combustible, velocidad global de reacción y volumen del gasificador.

La segunda etapa comprende el diseño mecánico del reactor y finalmente en la tercera etapa se analizan las pérdidas de calor por radiación de los gases, convección y conducción térmica, así como también el diseño del sistema de aislamiento para asegurar un alto rendimiento.

Keywords: Gasificador Updraft, SYNGAS, termo-químico, radiación

Abstract

This project comprises the conceptual design of an Updraft Gasifier, leading from the selection of fuel for study, as well as the gasifying agent to ensure the production of SYNGAS at low temperatures. The first stage of this prototype design, comprises thermochemical design, where the principal reactions that occur within it are analyzed to determine the fuel-air relation, volume of the gasifier and overall reaction rate.

The second stage includes the mechanical design of the reactor, and finally in the third stage, heat losses by radiation of the gases, thermal conduction of the materials and convection, are analyzed as well as the design of the insulation system to ensure high performance.

Keywords: Updraft Gasifier ,SYNGAS , thermochemical, radiation

Introducción

En Ecuador, la situación del sector hidrocarburífero genera preocupación, pues se cuenta con una estructura de producción y refinación de derivados que no satisface las necesidades de la demanda y por lo tanto surge la necesidad de cubrir este déficit con importaciones. Desde 1990 al 2006, el consumo promedio de Gas licuado de Petróleo (GLP) se incrementó de 0,91 a 2,04 cilindros mensuales por familia. Por este motivo, el Estado está obligado a importar más del 80% del total que se consume en el país, pues la producción nacional es insuficiente y se incrementa a un ritmo de apenas 0,8%, mientras que las importaciones de este combustible crecen al 9%, lo que provoca un incremento del subsidio y altos egresos fiscales al Estado. (Hemisferios, 2008).

El Gas licuado de petróleo es un hidrocarburo combustible, constituido fundamentalmente por propano, butano o sus mezclas, que se comercializa como combustible líquido, el cual se almacena y distribuye en recipientes herméticos a presión (Licuado, 2015). Entre sus principales usos están:

1. Gas Domiciliario

- Cocción alimentos
- Calefacción y calentamiento agua
- Refrigeración

2. Gas Recreacional

- Camping (cocción e iluminación)
- Calefacción piscinas
- Calefacción sitios abiertos

3. Gas Industrial

- Vapor/agua caliente para procesos industriales

- Calefacción de galpones industriales
- Refrigeración
- Hornos

En base a la dependencia existente hacia el GLP por parte de las familias ecuatorianas y los factores anteriormente descritos, la medida que utiliza el gobierno actual es eliminar periódicamente el subsidio del GLP e incentivar a las familias ecuatorianas a la compra de cocinas de inducción, ofreciendo facilidades de pago, precios cómodos y acceso al subsidio de 80 kilovatios hora (kWh) al mes, ya que son más eficientes, pues se aprovecha el 85% de la energía mientras que en las cocinas de gas se aprovecha solo el 40%. (Renovable, 2015).

Afectadas serán las familias que no cuentan con los servicios básicos como son agua potable, luz, alcantarillado y que si dependen del subsidio del gas para poder cocinar, tener agua caliente para bañarse y mientras el gobierno llega a estas zonas rurales para proveer de energía eléctrica, se debe buscar una alternativa energética que pueda sustituir el uso del GLP por otro tipo de combustible de fácil obtención y bajo costo.

Una nueva alternativa es el uso del gas de síntesis “SYNGAS” producto de la gasificación de biomasa, el cual puede ser aprovechado como sustituto del GLP a baja escala o como centrales de gasificación en edificios. Pero su uso no se limita solo a la cocción, sino que puede ser empleado en la generación de energía eléctrica, calentamiento de agua en calderos, lo cual permitiría a empresas que trabajan con biomasa para la producción de arroz, azúcar, café, entre otros; utilizar los mismos residuos forestales como son el bagazo de caña, la cascarilla de arroz, la cascarilla del café en sistemas de gasificación para abastecer de energía eléctrica a sus plantas productivas.

El aprovechamiento de la biomasa como fuente energética en los procesos de combustión o generación eléctrica, asegura la soberanía y eficiencia de los sectores

estratégicos para la transformación industrial y tecnológica; que constituye uno de los objetivos del Plan del Buen Vivir. (SENPLADES, 2013 p. 313).

Estado del arte

Biomasa es toda la materia orgánica que tiene su origen en un proceso biológico. A partir de la luz solar, la formación de biomasa vegetal, se lleva a cabo mediante el proceso de fotosíntesis gracias al que se producen moléculas de alto contenido energético bajo la forma de energía química. La biomasa involucra a los procesos de reciente transformación de la materia orgánica, tanto si se producen de forma natural como artificial. El hecho de que se trate de una transformación reciente, excluye de este grupo a los combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo o el gas natural, cuya formación tuvo lugar hace millones de años. (Biomasa, 2014).

Clasificación de la Biomasa.

Según el origen de la biomasa, esta puede clasificarse de forma general en:

Biomasa natural.

La que se produce en ecosistemas naturales. La explotación intensiva de este recurso no es compatible con la protección del entorno.

Biomasa residual.

Incluye los residuos forestales y agrícolas, los residuos producidos por industrias forestales y agrícolas, los residuos sólidos urbanos y los residuos biodegradables como efluentes ganaderos, aguas residuales urbanas, etc.

Cultivos energéticos.

Realizados con el único objeto de su aprovechamiento energético, caracterizados por una gran producción de materia viva por unidad de tiempo.

Excedentes agrícolas.

Constituidos por los productos agrícolas que no emplea el hombre.

Para facilitar la investigación se considera principalmente a la biomasa producto de residuos industriales y agrícolas como combustible para el sistema de gasificación, debido a su fácil obtención y abundancia. En la tabla 1 se muestran los principales residuos de la producción agrícola.

Tabla 1. *Principales residuos en la producción agrícola*

Origen	Cantidad (Tm/año)
Cacao	4'262.985
Maíz duro seco	501.085
Palma africana	399.840
Caña para azúcar	321.708
Arroz en cáscara	265.218
Banano	229.360
Caña para otros usos	239.056
Papa	222.725
Maíz suave seco	136.101
Plátano	82.747

Fuente: <http://www.dwgreenewables.com/home/#>

En el Ecuador se cuenta con una excesiva producción de cascarilla de arroz, tanto en su recolección, como en su inapropiado manejo por parte de ciertas industrias arroceras. Esto a parte de tener un impacto negativo en el medio ambiente, es un desperdicio de biomasa que podría ser utilizada con fines energéticos. La tabla 1 indica que se encuentra en el puesto número 5 como principal residuo de la producción agrícola, por lo que su obtención es sencilla y a comparación del maíz o el bagazo de caña tiene menor contenido de humedad, su

forma granulométrica es definida y para su empleo en sistemas de gasificación es necesario secarla, para un aprovechamiento eficiente en procesos de conversión energética.

Procesos de conversión de la Biomasa

Los procesos de conversión de la biomasa para su aprovechamiento energético se dividen principalmente en:

Procesos Fisicoquímicos

Por medio ellos, se producen aceites vegetales combustibles y biodiesel mediante la transesterificación.

Procesos Bioquímicos

En los procesos bioquímicos se somete la materia orgánica a la acción de la descomposición anaeróbica obteniéndose biogás (en ausencia de aire).

Procesos Termoquímicos

A los procesos termoquímicos se los puede clasificar en pirólisis, gasificación, combustión y licuefacción. Estos procesos realizan la descomposición de la biomasa por medio de la aplicación de calor y/o agentes de reacción como oxígeno, aire, vapor de agua, dióxido de carbono, hidrógeno o mezcla de estos gases, los cuales reaccionan con los combustibles obtenidos del proceso, incrementando su poder calorífico. (Energy, 2013).

En la figura 1 se describen de forma general los procesos de conversión energética de la biomasa para su uso en la generación de calor, electricidad o como combustible:

Una de las ventajas del proceso de gasificación es que a diferencia de los procesos fisicoquímicos y bioquímicos puede tardar menos tiempo y obtener el combustible de aprovechamiento energético, en cuestión de minutos.

Tipos de Reactores

Existen diferentes configuraciones de reactores (gasificadores) que definen distintos modos de contacto entre la biomasa y el agente de reacción, lo cual se ve reflejado en la distribución de productos obtenidos de cada equipo. Se dividen de manera general en: gasificadores de lecho fijo, de lecho móvil, de lecho fluidizado y de flujo de arrastre. (Lecho Fijo, 2011).

Reactores de lecho fijo

Son de construcción simple, apropiados para pequeña escala y generalmente operan con alta conversión de carbono, largos tiempos de residencia, baja velocidad del gas y bajo transporte de cenizas. La biomasa debe tener un tamaño uniforme en sus partículas y un contenido de humedad y cenizas menor al 30% y 5% respectivamente. Se clasifican a su vez en:

Gasificadores en Contracorriente (Updraft)

En este tipo de gasificadores la alimentación de la biomasa se hace desde la parte superior del equipo y el agente de reacción entra por la parte inferior del mismo. Esto implica que el sólido y el gas se mueven en sentidos opuestos. Los gasificadores en contracorriente alcanzan las más altas eficiencias ya que el gas caliente pasa a través del lecho durante el proceso y sale del gasificador a baja temperatura para su posterior aprovechamiento.

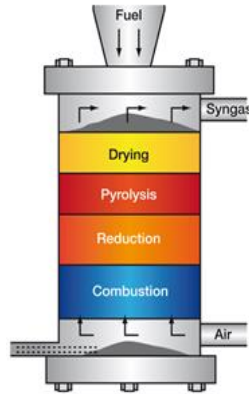


Figura 2. Gasificador tipo Updraft.

Fuente: <http://www.gbgasified.com/model.html>

Gasificadores de Corrientes Paralelas (Downdraft)

La alimentación de la biomasa y del agente de reacción se hace desde la parte superior del equipo, esto implica que el sólido y el gas se mueven en el mismo sentido de forma descendente, evacuándose el gas obtenido por la parte inferior del reactor.

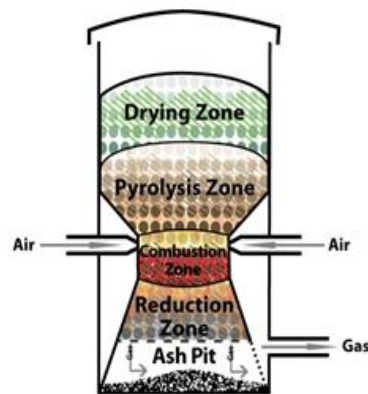


Figura 3. Gasificador tipo Downdraft.

Fuente: <http://engin1000.pbworks.com/w/page/18942701/Gasifier%20Go-Kart>

Gasificador de Flujo Cruzado (Crossdraft)

Presenta cierta similitud con el gasificador en contracorriente, con la ligera diferencia de que el agente de reacción entra por el costado del reactor y no desde la parte inferior. Las

desventajas son las altas temperaturas del gas a la salida del reactor y la reducción pobre de CO_2 .

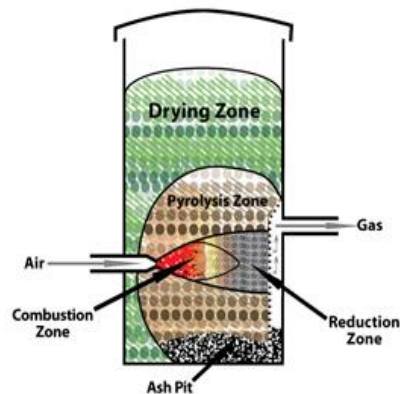


Figura 4. Gasificador tipo Crossdraft.

Fuente: <http://engin1000.pbworks.com/w/page/18942701/Gasifier%20Go-Kart>

Reactores de Lecho Móvil

Ofrecen algunas ventajas como tiempos cortos para el procesamiento en comparación con los reactores de lecho fijo y el procesamiento de materias primas con un rango amplio de propiedades fisicoquímicas.

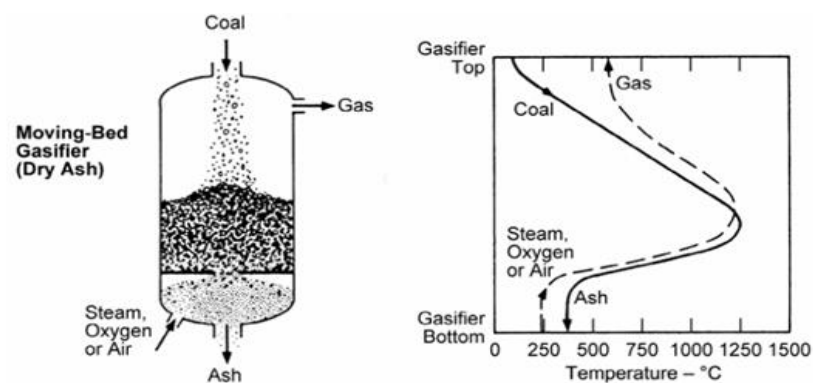


Figura 5. Gasificador de lecho móvil.

Fuente:

<http://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/energy%20systems/turbines/handbook/1-2-1.pdf>

Reactores de Lecho Fluidizado

Presentan elevadas velocidades de reacción y buenas condiciones de contacto entre el agente de reacción y el material carbonizado, lo cual hace que los perfiles de temperatura y concentración sean uniformes a lo largo del reactor, permitiendo un control muy preciso de las condiciones de operación.

La complejidad de los equipos se incrementa, produciéndose mayor desgaste debido a las mayores velocidades de los sólidos, aunque el uso de estos equipos reduce la tendencia de las partículas a aglomerarse.

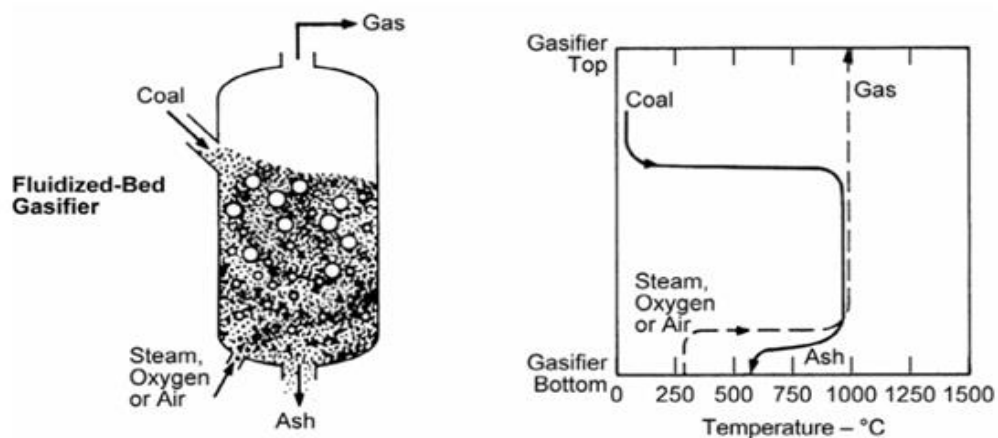


Figura 6. Gasificador de lecho fluidizado.

Fuente:

<http://www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Coal/energy%20systems/turbines/handbook/1-2-1.pdf>

Una vez descritos los tipos de gasificadores existentes; en la Tabla 2 se establecen las ventajas y desventajas de cada uno de ellos

Tabla 2. *Ventajas y desventajas de los distintos tipos de Gasificadores.*

Tipo de Gasificador	Ventajas	Desventajas
Contra corriente (Updraft)	<p>Simplicidad en la construcción y uso.</p> <p>Baja temperatura del gas producido.</p> <p>Alta eficiencia en la gasificación.</p> <p>Se pueden utilizar combustibles con alta humedad.</p> <p>Contenidos de un 25 a 50% de humedad de la biomasa.</p>	<p>Gran cantidad de alquitranes</p>
Corrientes paralelas (Downdraft)	<p>Alto rango de potencia desde 80 kW hasta 500 kW o más.</p> <p>Producción de gas con bajo contenido de alquitranes.</p>	<p>Grandes cantidades de ceniza y partículas de polvo.</p> <p>El combustible debe ser preparado.</p> <p>Altas temperaturas a la salida de los gases.</p> <p>El contenido de humedad debe ser menor al 25%</p>
Flujo cruzado (Crossdraft)	<p>Puede operarse a pequeña escala.</p>	<p>Alta cantidad de ceniza en los gases de combustión.</p> <p>Alta temperatura de los gases producidos.</p> <p>Baja eficiencia térmica en el gasificador.</p> <p>Debe utilizarse biomasa seca.</p>

Tabla 2. *Continuación*

Tipo de Gasificador	Ventajas	Desventajas
Lecho fluidizado	Rendimiento mayor que los gasificadores de cama fija. Puede trabajar con combustibles altamente corrosivos.	Debe utilizarse un combustible altamente reactivo. La ceniza generada es altamente corrosiva.
Gasificador de flujo de arrastre	Alcance de altos desempeños. Altas temperaturas garantizan ausencia de alquitranes. Eliminación de las cenizas en forma de escoria. Utilización a gran escala	Mayor consumo de aire primario. La pulverización o atomización del combustible. Mayores necesidades energéticas.

Fuente: (Yi Huaraz Choi, 2013).

La Tabla 2 realiza una breve descripción de las ventajas y desventajas de los distintos tipos de gasificadores, donde se ven involucrados el tipo de combustible, eficiencia, capacidad, humedad, entre otros parámetros. Para un análisis comparativo de las propiedades de cada uno de ellos, la Tabla 3 muestra de forma general a los gasificadores de lecho fijo y móvil en una misma agrupación, y se comparan con los de lecho fluidizado y flujo de arrastre.

Tabla 3. *Cuadro comparativo de algunos Gasificadores comerciales.*

Parámetros	Lecho Fijo/Móvil	Lecho Fluidizado	Flujo de Arrastre
Tamaño Alimentación	< 51 mm	< 6 mm	< 0.15 mm
Temperatura de salida del gas	450 - 650 °C	800 - 1000 °C	>1260°C

Tabla 3. *Continuación*

Parámetros	Lecho Fijo/Móvil	Lecho Fluidizado	Flujo de Arrastre
Tolerancia materia prima	Bajo rango de carbono	Bajo rango de carbono y excelente para biomasa	
Requisitos oxidantes	Bajo	Moderado	Alto
Temperatura de combustión	1090 °C	800 - 1000 °C	1990 °C
Temperatura de gasificación	700 – 1000 °C	< 900°C	1500°C
Requerimiento de vapor	Alto	Moderado	Bajo
Naturaleza de la ceniza producida	Seca	Seca	Llena de escoria
Eficiencia del gas frío	80%	89%	80%
Aplicación	Pequeñas capacidades	Unidades de tamaño mediano	Grandes capacidades
Breas	Baja	Intermedia	Ausente
Control	Fácil	Intermedio	Complejo
Potencia	10kW a 10MW	1MW a 100MW	> 100 MW
Áreas problemáticas	Producción de alquitranes	Conversión de carbono	Enfriamiento del gas

Fuente: (Basu, 2006).

Método

Para el diseño y operación de un gasificador, se requiere una compresión previa del proceso de gasificación y como el tipo de combustible, agente gasificante, sistema de alimentación y aislamiento térmico pueden influenciar en el rendimiento del mismo.

Descripción de alternativas

Para el análisis de alternativas se consideraron cuatro diferentes tipos de procesos de conversión de la biomasa para su uso con fines energéticos:

- Combustión directa
- Digestión Anaeróbica
- Pirólisis
- Gasificación

En la Tabla 4 se describen brevemente las alternativas consideradas, ya que su aplicación permite utilizar la biomasa en la generación de calor y electricidad.

Tabla 4. *Tabla descriptiva de alternativas.*

Procesos para generación de calor o electricidad		
Tipo de proceso	Descripción	Tiempo que tarda el proceso
Combustión directa	Oxidación de la biomasa a altas temperaturas para obtener energía en forma de calor	Minutos
Digestión anaeróbica	Bacterias que permiten la liberación de gas metano	Días
Pirólisis	Descomposición térmica en ausencia de oxígeno	Horas

Tabla 4. *Continuación*

Procesos para generación de calor o electricidad		
Tipo de proceso	Descripción	Tiempo que tarda el proceso
Gasificación	Descomposición	
	fisicoquímica bajo la acción del calor	Minutos

Fuente: “Diseño de un Gasificador de Biomasa por Pirólisis”, Daniela Aulestia y Sebastian Padilla, 2012.

Una vez descritas las alternativas para generar calor. En la Tabla 5 se especifica el puntaje de evaluación y en la Tabla 6 se observa la valoración obtenida por cada una de las alternativas descritas en la Tabla 4.

Tabla 5. *Rangos de Calificación de Aspectos Técnicos.*

Calificación	Porcentaje de validación
Excelente	100
Bueno	75
Regular	50
Malo	25
Muy malo	10

Tabla 6. *Validación y Calificación de las propuestas existentes*

Característica	Factor de ponderación	Alternativa 1		Alternativa 2	
		Combustión directa	Valor Ponderado	Digestión Anaeróbica	Valor Ponderado
Confiabilidad	0,25	50	12,5	50	12,5
Facilidad de operación	0,2	100	20	75	15
Tiempo que tarda el proceso	0,2	100	20	25	5
Producto Obtenido	0,1	50	5	50	5
Facilidad de instalación y construcción	0,15	75	11,25	75	11,25
Costos	0,1	50	5	75	7,5
Total	1	73,75		56,25	

Tabla 6. *Continuación*

Característica	Factor de ponderación	Alternativa 3		Alternativa 4	
		Pirolisis	Valor Ponderado	Gasificación	Valor Ponderado
Confiabilidad	0,25	75	18,75	75	18,75
Facilidad de operación	0,2	50	10	75	15
Tiempo que tarda el proceso	0,2	100	20	100	20
Producto Obtenido	0,1	75	7,5	100	10
Facilidad de instalación y construcción	0,15	50	7,5	50	7,5
Costos	0,1	75	7,5	50	5
Total	1	71,25		76,25	

La Tabla 6 permite analizar las ventajas y desventajas de las propuestas ya implementadas para la conversión de la biomasa para su uso como combustible, y constatar la validez del proyecto a realizar. En función de esta tabla, el promedio de la alternativa 1 *Combustión Directa* es de 73,75; de la alternativa 2 *Digestión Anaeróbica* es 56,25; de la alternativa 3 *Pirólisis* es 71,25 y de la alternativa 4 *Gasificación* es 76,25. Por los objetivos planteados en este proyecto, la mejor opción está representada por la alternativa 4.

Debido a ciertas desventajas que presentan los gasificadores de lecho fluidizado y de flujo de arrastre como son el control, tipo de combustible, velocidades de reacción, capacidad, entre otros; se evaluará solo a los gasificadores de lecho fijo, ya que son los más adecuados para proyectos a pequeña escala de hasta 10 MW.

Para elegir si el gasificador requerido para el proyecto es de tipo downdraft, updraft o crossdraft, se tendrá en cuenta los parámetros que afectan al gasificador señalados en las tablas 2 y 3. En la Tabla 7 se evalúan las alternativas para la selección del tipo de gasificador de acuerdo a la ponderación establecida en la tabla 5.

Tabla 7. *Selección del tipo de gasificador*

Característica	Factor de ponderación	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Downdraft	Valor Ponderado	Updraft	Valor Ponderado	Crossdraft	Valor Ponderado
Aplicación	0,1	50	5	50	5	10	1
Fabricación y montaje	0,1	80	8	100	10	60	6
Retiro de cenizas	0,1	80	8	80	8	80	8

(Continúa)

Tabla 7. *Continuación*

Característica	Factor de ponderación	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Downdraft	Valor Ponderado	Updraft	Valor Ponderado	Crossdraft	Valor Ponderado
Mantenimiento	0,1	100	10	90	9	70	7
Operatividad	0,1	100	10	80	8	70	7
Forma de alimentación	0,1	70	7	80	8	80	8
Transporte	0,1	80	8	80	8	100	10
Combustible	0,1	80	8	90	9	60	6
Cantidad de humedad del combustible	0,1	60	6	80	8	80	8
Contenido de Alquitrán	0,1	40	4	100	10	20	2
Total	1	74		83		63	

En función de la Tabla 7, el promedio de la alternativa 1 *Gasificador tipo Downdraft* es de 74; de la alternativa 2 *Gasificador tipo Updraft* es 83 y de la alternativa 3 *Gasificador tipo Crossdraft* es 63. En base a este análisis, la alternativa 2 es la más óptima para el sistema de Gasificación debido a su construcción simple, su adecuación a pequeña escala, y a que los gasificadores en contracorriente alcanzan las más altas eficiencias, ya que el gas caliente pasa a través del lecho durante el proceso y sale del gasificador a baja temperatura; por lo cual se diseñará un Gasificador tipo Updraft.

Con la información anterior se puede realizar el diseño conceptual del Gasificador de Biomasa, el cual permita a otros investigadores llevarlo a la construcción con fines científicos y de aplicación en la generación de energía, para realizar cambios o mejoras; habiendo establecido dentro de este proyecto las bases principales para el cálculo.

El proyecto consta de tres partes fundamentales:

- Diseño físico - químico del reactor

- Diseño mecánico del sistema de alimentación, estructura metálica del reactor y equipo de alimentación de aire.
- Diseño térmico del sistema de aislamiento

Diseño físico - químico del reactor

Una vez seleccionado el tipo de biomasa de la tabla 1, se deben establecer todas sus propiedades por medio de la caracterización de la misma. Para el diseño de este reactor se seleccionó cascarilla de arroz. En las Tablas 8 y 9 se detallan sus propiedades:

Tabla 8. *Propiedades y características físicas de la cascarilla de arroz.*

Característica	Valor
Tipo de biomasa	Cascarilla de arroz
Estado físico	Sólido granulado
Color	Beige
Olor	Olor característico
Longitud	4 – 14 mm
Ancho	2 – 4 mm
Espesor promedio	50 μm
Solubilidad en agua	Insoluble
Densidad verdadera	1,42 g/cm ³
Densidad aparente	0,65 g/cm ³
Densidad a granel	0,1 g/cm ³
Porosidad del combustible	54%

Fuente: Echeverría M. y López O. Tesis de grado, “Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica”.

Tabla 9. *Propiedades y características químicas de la cascarilla de arroz.*

Característica	Valor
Humedad	7.41%
Cenizas	19.39%
Materia volátil	57.09%
PH a 25°C	7.10
Fibra (Celulosa)	45,38%
Proteínas	3.59%
Extracto con Éter (Grasa)	0.40%
Carbohidratos totales	69.23%
PCS _{B,S} (Bomba Calorimétrica)	12.70 MJ/kg
PCS _{B,S} (Análisis Último)	15.58 MJ/kg
PCS _{B,S} (Análisis Último)	14.42 MJ/kg
PCS _{B,H} (Análisis Último)	13.50 MJ/kg

Fuente: Echeverría M. y López O. Tesis de grado, “Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica”.

Tabla 10. *Análisis de la Cascarilla de Arroz a nivel mundial.*

Parámetros	País						
	Canadá	California	China	Colombia	Ecuador		
%C	37,6 – 42,6	38,2 – 38,8	37,60	39,10	33,40	36,00	37,00
%H	4,70 – 5,40	4,70 – 5,20	5,78	5,20	4,30	4,70	5,78
%O	31,3 – 31,5	35,4 – 36,2	37,62	37,20	38,50	31,32	37,60
%N	0,38 – 0,51	0,52 – 0,87	1,88	0,27	0,38	0,38	1,88
%S	0,01 – 0,03	0,05 – 0,18	0,09	0,43	0,32	0,01	0,18
%Cl	0,01 – 0,13	0,12 – 0,58	0				
%ASH	18,2 – 24,6	18,6 – 20,2	16,93	17,80	23,10	14,83	23,94

(Continua)

Tabla 10. *Continuación*

Parámetros	País						
	Canadá	California	China	Colombia		Ecuador	
Total	100	100	100	100	100	100	100
HV (MJ/kg)	13,2- 14,2		13,40	17,64		13,40	14,90
CH (%)	8 - 15	8 - 15	8 - 15	8,9	9,4	8,41	6,40

Nota. Fuente: Sarchi, 2012.

a. ASH es el contenido de cenizas.

b. CH representa el contenido de humedad de la cascarilla.

c. HV es el poder calorífico de la biomasa.

Proceso de gasificación en reactores

En un gasificador tipo updraft, el combustible es alimentado desde la parte superior y el gas producto de la gasificación sale por la parte superior también. El agente gasificante “aire, oxígeno, vapor, o su mezcla”, es ligeramente precalentado y entra en el gasificador a través de una rejilla en la parte inferior. El gas se eleva entonces a través de un lecho de combustible descendente en la cámara de combustión del gasificador.

A medida que el aire “medio de gasificación” entra en la parte inferior de la cámara, se reúne con la ceniza caliente y con el carbono no convertido que descienden desde la parte superior.

La temperatura en la capa inferior supera la temperatura de ignición del carbono, por lo que la reacción de combustión es altamente exotérmica y se lleva a cabo con cierto exceso de oxígeno. El calor liberado calienta tanto el gas que asciende hacia la salida, así como a los sólidos que descienden desde la alimentación.



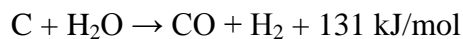
La reacción de combustión, *ecuación 1*, consume rápidamente la mayor parte del oxígeno disponible y como el oxígeno disponible se reduce aún más a medida que se eleva; la

reacción de combustión se transforma en una combustión parcial, liberando CO y una cantidad moderada de calor.



El gas caliente, es una mezcla de CO, CO₂, y de vapor de agua; el cual se mueve hacia arriba de la zona de gasificación, donde el carbono que yace en la parte superior del lecho se gasifica, según la *ecuación 2*.

Inicialmente en la combustión, la concentración de dióxido de carbono aumenta, pero una vez que el oxígeno está casi agotado, el CO₂ entra en la reacción de gasificación con el carbono, resultando en una disminución en la concentración de CO₂, como se muestra en la *ecuación 3*.



El calor sensible del gas caliente de la combustión proporciona la energía para las dos reacciones endotérmicas de gasificación mostradas en la *ecuación 3*: R1 y R2 (Anexo A). Estas son responsables de la mayoría de los productos de gasificación como el hidrógeno y monóxido de carbono debido a su naturaleza endotérmica.

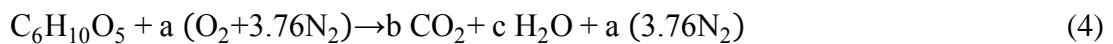
La zona ubicada sobre el área de gasificación es para la pirólisis de la biomasa. El calor residual del gas que asciende, calienta la biomasa seca que descendiende desde la alimentación. La biomasa entonces se descompone “piroliza” en gases no condensables, gases condensables y carbón. Ambos gases se desplazan hacia arriba, mientras que el carbón descende con otros sólidos.

La zona superior más alta seca la biomasa fresca, mediante el balance de entalpía del gas producto caliente procedente de la parte inferior. Este gas es una mezcla de la gasificación y pirólisis de los productos.

Por lo tanto, la energía térmica necesaria para realizar el secado, pirólisis, y gasificación, se suministra por medio de la combustión del gas de pirólisis. Este fenómeno se llama pirolisis flameante.

Estequiometria de la combustión

Para realizar la estequiometria del proceso de combustión de la cascarilla de arroz se toma como componente principal la celulosa, ya que contiene aproximadamente un 45,38% de este componente y para el análisis se considera una reacción con un 100% de aire. (Echeverría, 2010).

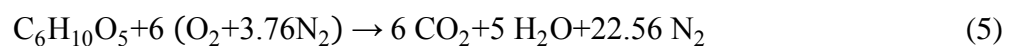


Al igualar la ecuación por el método algebraico, se tiene que:

$$\begin{aligned} \text{O: } 5 + 2a &= 2b + c \\ \text{H: } 10 &= 2c \\ \text{C: } 6 &= b \end{aligned}$$

Se remplazan los coeficientes estequimetricos obtenidos por el método algebraico en la ecuación 4. Es decir que por cada mol de celulosa $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$, que se combina con 6 moles de aire, se producen 6 moles de CO_2 , 5 moles de agua y 22.56 moles de nitrógeno N_2 .

La ecuación 5 muestra la reacción de combustión correctamente balanceada



Peso molecular de la cascarilla de arroz.

Datos:

$$PM_C := 12 \frac{gm}{mol}$$

$$PM_H := 1 \frac{gm}{mol}$$

$$PM_O := 16 \frac{gm}{mol}$$

El peso molecular de la cascarilla comprende la suma de los pesos moleculares de sus componentes, multiplicados por cada uno de sus coeficientes, según muestra la ecuación 6

$$PM_{CASCARILLA} := 6 (PM_C) + 10 (PM_H) + 5 (PM_O) = 162 \frac{gm}{mol} \quad (6)$$

Masa de la cascarilla.

Es conocido que se van a combustionar 10 kg de cascarilla, lo cual indica la cantidad de combustible utilizado.

Número de moles.

El número de moles de un compuesto, se calcula por medio la ecuación 7

$$n = \frac{m}{PM} \quad (7)$$

$$n_{CASCARILLA} := \frac{m_{CASCARILLA}}{(PM_{CASCARILLA})} = 61.728 \text{ mol}$$

Dónde:

n número de moles de la sustancia; m masa de combustible (kg); PM peso molecular (g/mol), o (kg/kmol).

Análisis para el agente de combustión (aire).

El aire se compone de un 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno

$$PM_{O_2} := 2 \quad PM_O = 32 \frac{gm}{mol}$$

$$PM_{N_2} := 2 \quad PM_N = 28 \frac{gm}{mol}$$

$$x_{O_2} = 0.21$$

$$x_{N_2} = 0.79$$

Teniendo el número de moles iniciales de la cascarilla, se determina la masa y número de moles de oxígeno. Con la relación porcentual de oxígeno existente en el aire, se determina la cantidad de aire necesaria para combustionar cascarilla de arroz.

$$m_{O_2} = 61.728 \text{ mol Cascarilla} \times \frac{6 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol Cascarilla}} \times \frac{32g \text{ } O_2}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{1kg \text{ } O_2}{1000g \text{ } O_2} = 11.852kg$$

$$n_{O_2} := \frac{m_{O_2}}{PM_{O_2}} = 370.37 \text{ mol}$$

Si 11.852 kg de O_2 equivalen al 21% de la masa de aire, por medio de la ecuación 8 se obtiene que:

$$m_{Aire} := m_{O_2} \cdot \left(\frac{1}{x_{O_2}} \right) = 56.415 \text{ kg} \quad (8)$$

Donde la masa total de aire que ingresa para combustionar 10 kg de cascarilla es de 56.415 kg, por lo tanto la relación aire – combustible se determina según la ecuación 9

$$RAC = \frac{m_{Comburente}}{m_{Combustible}} \quad (9)$$

$$RAC := \frac{m_{Aire}}{m_{CASCARILLA}} = 5.641$$

Esto indica que por cada kg de biomasa se necesitan 5.641 kg de aire para poderla combustionar.

Análisis de los productos.

Entre los productos se tiene vapor de agua H_2O) y dióxido de carbono CO_2 , que son parte de ciertas reacciones de gasificación y el nitrógeno que al ser un gas inerte no reacciona. Por lo tanto para obtener el número de moles de los productos de la reacción inicial de combustión, se sigue el procedimiento de los reactantes.

Cantidad de moles de CO_2

$$PM_{CO_2} := PM_C + PM_{O_2} = 44 \frac{gm}{mol}$$

$$m_{CO_2} = 61.728 \text{ mol Cascarilla} \times \frac{6 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol Cascarilla}} \times \frac{44g \text{ } CO_2}{1 \text{ mol } CO_2} \times \frac{1kg \text{ } CO_2}{1000g \text{ } CO_2} = 16.296 \text{ kg}$$

$$n_{CO_2} := \frac{m_{CO_2}}{PM_{CO_2}} = 370.37 \text{ mol}$$

Cantidad de moles de vapor de agua

$$PM_{H_2O} := 2 PM_H + PM_O = 18 \frac{gm}{mol}$$

$$m_{H_2O} = 61.728 \text{ mol Cascarilla} \times \frac{5 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol Cascarilla}} \times \frac{18g \text{ } H_2O}{1 \text{ mol } H_2O} \times \frac{1kg \text{ } H_2O}{1000g \text{ } H_2O} = 5.556 \text{ kg}$$

$$n_{H_2O} := \frac{m_{H_2O}}{PM_{H_2O}} = 308.642 \text{ mol}$$

Cantidad de moles de nitrógeno (N_2)

$$PM_{N_2} := 2 PM_N = 28 \frac{gm}{mol}$$

$$m_{N_2} = 61.728 \text{ mol Cascarilla} \times \frac{22.56 \text{ mol } N_2}{1 \text{ mol Cascarilla}} \times \frac{44g \text{ } N_2}{1 \text{ mol } N_2} \times \frac{1kg \text{ } N_2}{1000g \text{ } N_2} = 38.993 \text{ kg}$$

$$n_{N_2} := \frac{m_{N_2}}{PM_{N_2}} = (1.393 \cdot 10^3) \text{ mol}$$

Masa total de los productos

$$m_{PRODUCTOS} := m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2} = 60.844 \text{ kg}$$

Composición de la cascarilla de arroz.

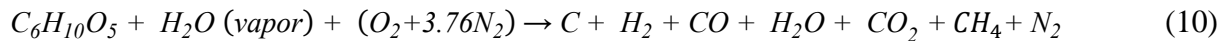
Los valores de su composición son porcentuales y fueron tomados de la tabla 10 donde se tienen los siguientes datos para la cascarilla de arroz en el Ecuador:

$$C := 36 \quad H := 4.70 \quad O := 31.32 \quad N := 0.38 \quad S := 0.01 \quad ASH := 14.9 \quad h := 10\%$$

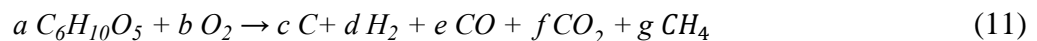
Con un contenido de cenizas (ASH) de 14.9% y una humedad del 10%, la cual es muy cercana a la que tienen los pellets o la cascarilla previamente compactada.

Estequiometria de la gasificación.

A diferencia de la combustión el proceso de gasificación comprende varias reacciones secuenciales que se dan a partir de una reacción global, mostrada en la ecuación 10



El N_2 y el vapor de agua no entran en la reacción Rx porque son inertes, entonces la ecuación 10 se reduce a:



Al igualar la ecuación 11 utilizando el método algebraico, se tiene que:



Análisis de los reactantes

Al igual que en la etapa de combustión se puede determinar la masa de oxígeno necesaria para poder gasificar, siguiendo el mismo procedimiento

$$m_{O_2} = 61.728 \text{ mol Cascarilla} \times \frac{1 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol Cascarilla}} \times \frac{32 \text{ g } O_2}{1 \text{ mol } O_2} \times \frac{1 \text{ kg } O_2}{1000 \text{ g } O_2} = 1.975 \text{ kg}$$

$$n_{O_2} := \frac{m_{O_2}}{PM_{O_2}} = 61.728 \text{ mol}$$

La masa de vapor de agua que se forma para la reacción global de gasificación viene dada por el contenido de humedad de la cascarilla, como se muestra en la ecuación 13

$$m_{H_2O} := m_{CASCARILLA} \cdot h = 1 \text{ kg} \quad (13)$$

$$n_{H_2O} := \frac{m_{H_2O}}{PM_{H_2O}} = 55.556 \text{ mol}$$

Al igual que en la combustión, con la relación porcentual de oxígeno en el aire se determina la cantidad de aire necesaria para la gasificación cascarilla y la relación aire – combustible, según la ecuación 14

$$m_{Aire} := m_{O_2} \cdot \left(\frac{1}{x_{O_2}} \right) = 9.402 \text{ kg}$$

$$M_a := \frac{m_{Aire}}{m_{CASCARILLA}} = 0.94 \quad (14)$$

La masa de aire mínima requerida para gasificar 10 kg de cascarilla es de 9.02 kg, con esto se determina el número de moles de nitrógeno que contiene la misma y que no reaccionan, utilizando la ecuación 15

$$m_{N_2} := m_{Aire} - m_{O_2} = 7.427 \text{ kg} \quad (15)$$

$$nN_2 := \frac{mN_2}{PM_{N_2}} = 265.256 \text{ mol}$$

Dónde:

m_{Aire} Masa de aire para gasificar (kg); Ma : Relación de aire – combustible para la gasificación.

Cantidad de aire estequiométrica para la gasificación

La relación aire requerido para la combustión completa de biomasa seca en condiciones ideales se calcula por medio de la ecuación 16. (Basu, p. 59)

$$m_{th} = 0.1153 C + 0.3434 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0.0434 S = 4.421 \quad (16)$$

Sabiendo que el tiempo de alimentación es de 60 minutos y conociendo el requerimiento de aire teórico en condiciones ideales. La velocidad de alimentación de combustible se determina por medio de la ecuación 17

$$M_f := \frac{m_{CASCARILLA}}{t_{feed}} = 0.167 \frac{kg}{min} \quad (17)$$

El radio equivalente dicta el rendimiento del gasificador. Cuando $ER < 1$ se entiende que el sistema no tiene exceso de aire y por lo tanto se darán todas las reacciones de gasificación, pero si $ER > 1$ entonces solo tendrá origen la combustión. (Basu, p. 195)

$$M_a = m_{th} \times ER \quad (18)$$

$$ERr := \frac{M_a}{m_{th}} = 0.213$$

El rango de ER para obtener un mayor rendimiento en la gasificación esta entre 0.2 y 0.3 por lo que al tomar un valor promedio se tiene que

$$ER_t := 0.25$$

Con el valor promedio se determina la relación aire – combustible óptima para gasificar utilizando la ecuación 19

$$RAC_g := m_{th} \cdot ER_t = 1.105 \quad (19)$$

El flujo de aire requerido para gasificar depende de la relación aire-combustible y la velocidad de alimentación del combustible. (Basu, p. 195).

$$M_{fa} := m_{th} \cdot ER_t \cdot M_f = 11.052 \frac{kg}{hr} \quad (20)$$

Esto indica que por cada kg de biomasa se necesitan realmente 1.105 kg de aire para poder gasificar y asegurar la eficiencia del proceso.

Dónde:

m_{th} , Requerimiento de aire teórico para una combustión completa

RAC_g , Relación aire – combustible (gasificación)

t_{feed} , Tiempo de alimentación del combustible (min)

M_f , Velocidad de alimentación del combustible (kg/min)

ER_r , Radio equivalente (real)

ER_b , Radio equivalente ideal ($0.2 < 0.3$)

M_f , Flujo másico de aire para gasificar (kg/h)

Análisis de los productos.

Para la reacción global de gasificación los productos que se forman son:

Char o carbonizados

$$PM_C := 12 \frac{gm}{mol}$$

$$nC := n_{CASCARILLA} \cdot c = 61.728 \text{ mol}$$

$$mC := PM_C \cdot nC = 0.741 \text{ kg}$$

Gas hidrógeno

$$PM_{H_2} := 2 \quad PM_H = 2 \frac{gm}{mol}$$

$$nH_2 := n_{CASCARILLA} \cdot d = 185.185 \text{ mol}$$

$$mH_2 := PM_{H_2} \cdot nH_2 = 0.37 \text{ kg}$$

Monóxido de carbono

$$PM_{CO} := PM_C + PM_O = 28 \frac{gm}{mol}$$

$$nCO := n_{CASCARILLA} \cdot e = 61.728 \text{ mol}$$

$$mCO := PM_{CO} \cdot nCO = 1.728 \text{ kg}$$

Dióxido de carbono

$$PM_{CO_2} := PM_C + PM_{O_2} = 44 \frac{gm}{mol}$$

$$nCO_2 := n_{CASCARILLA} \cdot f = 185.185 \text{ mol}$$

$$mCO_2 := PM_{CO_2} \cdot nCO_2 = 8.148 \text{ kg}$$

Gas metano

$$PM_{CH_4} := PM_C + 4 PM_H = 16 \frac{gm}{mol}$$

$$n_{CH_4} := n_{CASCARILLA} \cdot g = 61.728 \text{ mol}$$

$$m_{CH_4} := PM_{CH_4} \cdot n_{CH_4} = 0.988 \text{ kg}$$

Para determinar el número de moles de los productos, se multiplica directamente el número de moles iniciales de cascarilla por el coeficiente de cada uno de los productos.

Masa total de los productos de gasificación

$$m_{PRODUCTOS} := m_C + m_{H_2} + m_{CO} + m_{CO_2} + m_{CH_4} = 11.985 \text{ kg}$$

Poder calorífico superior e inferior de la cascarilla

Las propiedades energéticas de la biomasa vienen dadas por el Poder Calorífico Superior PCS o por sus siglas en inglés HHV.

El HHV se define como la cantidad de calor desprendido por la combustión completa de un kilogramo de combustible a presión constante y se representa por medio de la ecuación 21. (Basu, p. 194)

$$HHV_d = (0.3491 C + 1.1783 H + 0.1005 S - 0.0151 N - 0.1034 O - 0.0211 ASH) 10^6 \quad (21)$$

$$HHV_d = (1.455 \cdot 10^7) \frac{J}{kg}$$

$$HHV_d = (3.475 \cdot 10^3) \frac{kcal}{kg}$$

Sin embargo se utiliza con mayor frecuencia el Poder Calorífico Inferior PCI o por sus siglas en inglés LHV, ya que refleja la cantidad de calor desprendida, una vez que se ha

descontado el calor absorbido en la evaporación del agua contenida en la biomasa. Para ello se utiliza la ecuación 22. (Renovables, p. 497)

$$LHV_d = HHV_d - 585 \cdot \left(\frac{h + 0.54}{h + 1} \right) \cdot \left(\frac{kcal}{kg} \right) \quad (22)$$

$$LHV_d = (3.134 \cdot 10^3) \frac{kcal}{kg}$$

$$LHV_d = (1.312 \cdot 10^7) \frac{J}{kg}$$

Dónde:

HHV_d Poder calorífico superior de la biomasa (J/kg)

LHV_d Poder calorífico inferior de la biomasa (kcal/kg)

Reacciones de gasificación

La etapa de gasificación que sigue a la pirólisis implica reacciones químicas entre los hidrocarburos y el combustible, vapor de agua, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno dentro del reactor; así como las reacciones químicas entre los gases desprendidos. El carbón producido a través de la pirólisis de la biomasa no es necesariamente carbono puro. Este contiene una cierta cantidad de hidrocarburo que se compone de hidrógeno y oxígeno.

Las reacciones R1, R2, R3 y R9 (Anexo A), describen el proceso de gasificación donde en la mayoría de casos se forma CO, CO₂, H₂ y CH₄ en pequeñas cantidades.

- Reacción de Boudouard



- Reacción Agua – Gas



- Reacción de Metanación o Hidrogasificación

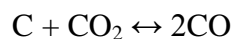


- Reacción de desplazamiento (Agua-Gas)



Reacción de Boudouard

La gasificación del carbono en CO_2 para producir CO se conoce como reacción de Boudouard, donde en primer lugar el CO_2 se disocia en un sitio activo libre de carbono, liberando monóxido de carbono y formando una superficie compleja de carbono-oxígeno, $\text{C}(\text{O})$.



La entalpía de formación de cada uno de los reactantes y productos de esta reacción, se obtiene de la tabla 11:

Tabla 11. *Calor de formación de varios elementos y compuestos a condiciones estándar, 25°C y 1bar de presión.*

Substancia	Δh_f^0 (kJ/mol)	S^0 (J/K*mol)	ΔG_f^0 (kJ/mol)
C	0	5.7	0
CO_2	-393.5	213.7	-394.4
CO	-110.53	197.7	-137.2
H_2O	-241.8	188.8	-228.6
H_2	0	130.7	0
CH_4	-74.8	186.3	-50.7

Fuente: Basu (2010).

Dónde:

ΔH_f^0 , Entalpía de formación (kJ/mol)

S^0 , Entropía de cada sustancia o compuesto (J/K*mol)

ΔG_f^0 , Energía libre de Gibbs de formación (kJ/mol)

La entalpía de reacción a condiciones estándar se calcula según la ecuación 23.

(Atkins, p.70)

$$\Delta_r H^0 = \sum_{\text{Productos}} \nu H_f^0 - \sum_{\text{Reactivos}} \nu H_f^0 \quad (23)$$

Desarrollo:

$$\Delta H_{298K} = (2 \cdot hfCO) - (hfCO_2 + hfC) = (1.724 \cdot 10^5) \frac{J}{mol}$$

Dónde:

$\Delta_r H^0$, Entalpía de reacción (J/mol); ν , Coeficiente estequiométrico

Al tener la entalpía un valor positivo, se entiende que la reacción de Boudouard es endotérmica, ya que genera energía.

El siguiente paso es determinar si existe un aumento de energía a la temperatura de gasificación por medio del cálculo de la entalpía a la temperatura de gasificación de 800 °C o 1073K. (Basu, p. 201)

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298K}^0 + \left(\sum_{\text{Productos}} \int_{298K}^T Cp \, dT - \sum_{\text{Reactivos}} \int_{298K}^T Cp \, dT \right) \quad (24)$$

El calor específico de cada compuesto varía en función de la temperatura, por lo cual se utiliza la Tabla 12

Tabla 12. *Calor específico de ciertos gases.*

Gas	PM (g/mol)	Cp a temperatura, T (J/K*mol)	Rango de validez (K)
H ₂ O (vapor)	18	$34.4 + 0.000628*T + 0.0000052*T^2$	300 - 2500
H ₂	2	$27.71 + 0.0034*T$	273 - 2500
CH ₄	16	$22.35 + 0.048*T$	273 - 1200
CO	28	$27.62 + 0.005*T$	273 - 2500
CO ₂	44	$43.28 + 0.0114*T - 818363/T^2$	273 - 1200
O ₂	32	$34.62 + 0.00108*T - 785712/T^2$	300 - 5000

Fuente: Basu (2010).

De la Tabla 12 se toman las funciones para resolver cada una de las integrales tanto para reactivos como productos, y reemplazándolas en la ecuación estequiometria de la reacción.

Datos:

$$CpCO(T) := (27.62 + 0.005 T)$$

$$CpCO_2(T) := 43.28 + 0.0114 - \left(\frac{818363}{T^2} \right)$$

Desarrollo:

$$I_{HEP} := \left(2 \int_{298}^{1073} ((27.62 + 0.005 T)) dT \right) \frac{J}{mol} = (4.812 \cdot 10^4) \frac{J}{mol}$$

$$I_{HER} := \left(\int_{298}^{1073} \left(43.28 + 0.0114 - \left(\frac{818363}{T^2} \right) \right) dT \right) \frac{J}{mol} = (3.157 \cdot 10^4) \frac{J}{mol}$$

$$\Delta H_{1073K} := \Delta H_{298K} + (I_{HEP} - I_{HER}) = (1.89 \cdot 10^5) \frac{J}{mol}$$

Dónde:

I_{HBP} , Integral que asocia la entalpía de los productos de la reacción de Boudouard.

I_{HBR} , Integral que asocia la entalpía de los reactivos de la reacción de Boudouard.

Para el cambio de entropía a condiciones estándar se calcula de forma similar a la entalpía de reacción, utilizando la ecuación 25

$$\Delta rS^0 = \sum_{\text{Productos}} \nu S^0 - \sum_{\text{Reactivos}} \nu S^0 \quad (25)$$

Desarrollo:

$$\Delta S_{298K}^0 = (2 S^0_{CO}) - (S^0_C + S^0_{CO_2}) = 176 \frac{J}{K \cdot mol}$$

Similar a lo ocurrido con la entalpía a la temperatura de gasificación. Para calcular la entropía a la temperatura de gasificación, se utilizan las ecuaciones 26, 27 y 28

$$\Delta Cv^0 = \sum_{\text{Productos}} n Cv - \sum_{\text{Reactivos}} n Cv \quad (26)$$

$$Cp = Cv + R \quad (27)$$

Datos:

$$Cp_{CO} = 29.14 \frac{J}{mol \cdot K} \quad Cv_{CO} = Cp_{CO} - R = 20.826 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$Cp_C = 8.527 \frac{J}{mol \cdot K} \quad Cv_C = Cp_C - R = 0.213 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$Cp_{CO_2} = 37.11 \frac{J}{mol \cdot K} \quad Cv_{CO_2} = Cp_{CO_2} - R = 28.796 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Valores para Cp a condiciones estándar. Atkins (2008).

Desarrollo:

$$\Delta Cv = 2 Cv_{CO} - (Cv_C + Cv_{CO_2}) = 12.643 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298K}^0 + \left(\sum \int_{298K}^T \frac{\Delta C_v}{T} dT \right) \quad (28)$$

$$I_{SB} = \left(\int_{298}^{1073} \left(\frac{\Delta C_v}{T} \right) dT \right) = 16.197 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$\Delta S_{1073K}^0 = \Delta S_{298K}^0 + I_{SB} = 192.197 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Dónde:

C_p , capacidad calorífica específica a presión constante (J/mol*K).

C_v , capacidad calorífica específica a volumen constante (J/mol*K).

R , Contante universal de los gases (0.08205746 atm*L/mol*K).

I_{SB} , Integral que asocia el cambio en la entropía de la reacción de Boudouard.

La energía libre de Gibbs es una función de estado extensiva con unidades de energía, que da la condición de equilibrio y de espontaneidad para una reacción química. En condiciones estándar se calcula por medio de la ecuación 29, utilizando datos de la Tabla 11.

$$\Delta G^0 = \sum_{Productos} \nu G^0 - \sum_{Reactivos} \nu G^0 \quad (29)$$

Desarrollo:

$$\Delta G_{298K} = (2 \cdot \Delta G_{CO}) - (\Delta G_{CO_2} + \Delta G_C) = (1.2 \cdot 10^5) \frac{J}{mol}$$

La ecuación 30 permite determinar la energía libre de Gibbs a la temperatura de gasificación en el reactor, en función de la entalpía y entropía de gasificación.

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T \cdot \Delta S_T^0 \quad (30)$$

La ecuación 31 determina la variación de la energía libre de Gibbs, ya que de esa variación se obtiene la constante de equilibrio. (Basu, p.138)

$$\Delta G = \Delta G_{298K}^0 - \Delta G_T^0 \quad (31)$$

$$\Delta G = RT \cdot \ln K \quad (32)$$

La constante K es un factor importante, ya que de ella depende el equilibrio en cada una de las reacciones de gasificación y se obtiene de la ecuación 32.

Datos:

$$T_g := 800 \text{ } ^\circ\text{C} = (1.073 \cdot 10^3) \text{ } K$$

Desarrollo:

$$\Delta G_{1073K} := \Delta H_{1073K} - T_g \cdot \Delta S_{1073K} = -1.726 \cdot 10^4 \frac{J}{mol}$$

$$\Delta G := \Delta G_{298K} - \Delta G_{1073K}$$

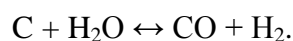
Despejando K de la ecuación 32 se tiene:

$$K_e = \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right)$$

$$K_B := e^{\left(\frac{\Delta G}{R \cdot T_g}\right)} = 2.085 \cdot 10^{-7}$$

Reacción agua – gas

La gasificación del carbono en agua, conocida como reacción agua-gas, es la reacción de gasificación más importante, para la formación de H₂ y CO que son los principales componentes del gas de síntesis.



Desarrollo:

$$\Delta H_{298K} := (hfCO + hfH_2) - (hfH_2O + hfC) = (1.313 \cdot 10^5) \frac{J}{mol}$$

Entalpía en condiciones estándar para la reacción agua – gas.

De la Tabla 12 se toman las funciones para calcular la entalpía a la temperatura de gasificación.

Datos:

$$Cp_{H_2O}(T) := 34.4 + 0.000628 T + 0.0000052 T^2$$

$$Cp_{H_2}(T) := 27.71 + 0.0034 T$$

$$Cp_{CO}(T) := 27.62 + 0.005 T$$

Desarrollo:

$$I_{HWP} := \left(2 \int_{298}^{1073} ((27.62 + 0.005 T) + (27.71 + 0.0034 T)) dT \right) \frac{J}{mol} = (9.469 \cdot 10^4) \frac{J}{mol}$$

$$I_{HWR} := \left(\int_{298}^{1073} (34.4 + 0.000628 T + 0.0000052 T^2) dT \right) \frac{J}{mol} = (2.909 \cdot 10^4) \frac{J}{mol}$$

$$\Delta H_{1073K} := \Delta H_{298K} + (I_{HWP} - I_{HWR}) = (1.969 \cdot 10^5) \frac{J}{mol}$$

Entalpía a la temperatura de gasificación para la reacción agua – gas.

Dónde:

I_{HWP} , Integral que asocia la entalpía de los productos de la reacción agua - gas

I_{HWR} , Integral que asocia la entalpía de los reactivos de la reacción agua - gas

Siguiendo el procedimiento anterior para el cambio de entropía a condiciones estándar se tiene que:

$$\Delta S_{298K}^{\circ} := (s^{\circ}CO + s^{\circ}H_2) - (s^{\circ}C + s^{\circ}H_2O) = 252.8 \frac{J}{K \cdot mol}$$

Entropía a condiciones estándar para la reacción agua – gas.

Para calcular la entropía a la temperatura de gasificación, se utilizan las ecuaciones 26, 27 y 28.

Datos:

$$C_{pH_2O} = 33.58 \frac{J}{mol \cdot K} \quad C_{vH_2O} = C_{pH_2O} - R = 25.266 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$C_{pH_2} = 28.824 \frac{J}{mol \cdot K} \quad C_{vH_2} = C_{pH_2} - R = 20.51 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Valores para Cp a condiciones estándar. Atkins (2008).

Desarrollo:

$$\Delta C_v = (C_{vC} + C_{vH_2O}) - (C_{vCO} + C_{vH_2}) = -15.857 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$I_{SW} = \left(\int_{298}^{1073} \left(\frac{\Delta C_v}{T} \right) dT \right) = -20.315 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$\Delta S^\circ_{1073K} = \Delta S^\circ_{298K} + I_{SW} = 232.485 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Entropía a la temperatura de gasificación para la reacción agua – gas.

Finalmente se determina la constante de equilibrio para la reacción agua – gas utilizando las ecuaciones 30, 31 y 32.

Desarrollo:

$$\Delta G_{298K} = (\Delta G_{CO} + \Delta G_{H_2}) - (\Delta G_{H_2O} + \Delta G_C) = (9.99 \cdot 10^4) \frac{J}{mol}$$

$$\Delta G_{1073K} = \Delta H_{1073K} - T_g \cdot \Delta S^\circ_{1073K} = -5.26 \cdot 10^4 \frac{J}{mol}$$

$$\Delta G = \Delta G_{298K} - \Delta G_{1073K}$$

$$K_W := e^{\left(\frac{\Delta G}{R \cdot T_s}\right)} = 3.773 \cdot 10^{-8}$$

Reacción de metanación o hidrogasificación

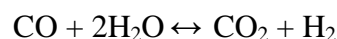
Esta reacción involucra la gasificación del carbono en un ambiente lleno de hidrogeno, lo que conduce a la producción de gas metano. La reacción de hidrogasificación implica un aumento en el volumen, y por ende la presión tiene una influencia positiva sobre la misma. La alta presión y rápido calentamiento ayudan a la formación de esta reacción.

Es importante descartar de esta secuencia a la reacción de metanación R3, ya que esta reacción involucra la gasificación del carbono en un ambiente lleno de hidrogeno, para producir gas metano, pero dado que el agente gasificante es aire, muy difícilmente se forme por completo. (Basu, 2010).



Reacción de desplazamiento (agua-gas)

Esta reacción incrementa el contenido de hidrógeno del producto de la gasificación a expensas del monóxido de carbono. La reacción de desplazamiento es ligeramente exotérmica, y su rendimiento de equilibrio disminuye lentamente con la temperatura. Dependiendo de la temperatura, esta puede ser conducida en cualquier dirección: sea productos o reactivos. Sin embargo, no es sensible a la presión (Petersen y Werther, 2005).



Desarrollo:

$$\Delta H_{298K} := (h_f CO_2 + h_f H_2) - (h_f H_2O + h_f CO) = -4.115 \cdot 10^4 \frac{J}{mol}$$

Entalpía en condiciones estándar para la reacción de desplazamiento agua – gas.

De la Tabla 12 se toman las funciones para calcular la entalpía a la temperatura de gasificación.

Datos:

$$CpCO(T) := 27.62 + 0.005 T$$

$$CpH_2O(T) := 34.4 + 0.000628 T + 0.0000052 T^2$$

$$CpCO_2(T) := 43.28 + 0.0114 - \left(\frac{818363}{T^2} \right)$$

$$CpH_2(T) := 27.71 + 0.0034 T$$

Desarrollo:

$$I_{HWGP} := \left(\int_{298}^{1073} \left(\left(43.28 + 0.0114 - \left(\frac{818363}{T^2} \right) \right) + (27.71 + 0.0034 T) \right) dT \right) \frac{J}{mol} = (5.485 \cdot 10^4) \frac{J}{mol}$$

$$I_{HWGR} := \left(\int_{298}^{1073} ((27.62 + 0.005 T) + (34.4 + 0.000628 T + 0.0000052 T^2)) dT \right) \frac{J}{mol} = (5.315 \cdot 10^4) \frac{J}{mol}$$

$$\Delta H_{1073K} := \Delta H_{298K} + (I_{HWGP} - I_{HWGR}) = -3.945 \cdot 10^4 \frac{J}{mol}$$

Entalpía a la temperatura de gasificación para la reacción de desplazamiento agua – gas.

Dónde:

I_{HWGP} , Integral que asocia la entalpía de los productos de la reacción de desplazamiento agua – gas.

I_{HWGR} , Integral que asocia la entalpía de los reactivos de la reacción de desplazamiento agua – gas.

Siguiendo el procedimiento anterior para el cambio de entropía a condiciones estándar se tiene que:

$$\Delta S^{\circ}_{298K} := (s^{\circ}CO_2 + s^{\circ}H_2) - (s^{\circ}H_2O + s^{\circ}CO) = 76.8 \frac{J}{K \cdot mol}$$

Entropía a condiciones estándar para la reacción de desplazamiento agua – gas.

Para calcular la entropía a la temperatura de gasificación, se utilizan las ecuaciones 26, 27 y 28.

Datos:

$$\begin{aligned} C_p CO &:= 29.14 \frac{J}{mol \cdot K} & C_v CO &:= C_p CO - R = 20.826 \frac{J}{mol \cdot K} \\ C_p H_2O &:= 33.58 \frac{J}{mol \cdot K} & C_v H_2O &:= C_p H_2O - R = 25.266 \frac{J}{mol \cdot K} \\ C_p CO_2 &:= 37.11 \frac{J}{mol \cdot K} & C_v CO_2 &:= C_p CO_2 - R = 28.796 \frac{J}{mol \cdot K} \\ C_p H_2 &:= 28.824 \frac{J}{mol \cdot K} & C_v H_2 &:= C_p H_2 - R = 20.51 \frac{J}{mol \cdot K} \end{aligned}$$

Valores para Cp a condiciones estándar. Atkins (2008).

Desarrollo:

$$\Delta C_v := (C_v CO_2 + C_v H_2) - (C_v H_2O + C_v CO) = 3.214 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$I_{SWG} := \left(\int_{298}^{1073} \left(\frac{\Delta C_v}{T} \right) dT \right) = 4.118 \frac{J}{mol \cdot K}$$

$$\Delta S^{\circ}_{1073K} := \Delta S^{\circ}_{298K} + I_{SWG} = 80.918 \frac{J}{mol \cdot K}$$

Entropía a la temperatura de gasificación para la reacción de desplazamiento agua – gas.

A diferencia de las reacciones anteriores que representan un cambio de fase sólida a gaseosa, para la reacción de desplazamiento agua – gas la variación de la energía libre de Gibbs se calcula por medio de la ecuación 33. (Basu, p. 145).

$$\Delta G = -32.197 + 0.031T - (1774.7/T) \quad (33)$$

$$K_{WG} := e^{\left(\frac{\Delta G}{R \cdot T_r}\right)} = 1$$

Calculo de la velocidad global de gasificación y volumen del reactor

Para un sistema de flujo con velocidad de alimentación constante es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

Velocidad de alimentación de la biomasa

La velocidad de alimentación de la biomasa corresponde al número de moles que van a ingresar al reactor por hora, según muestra la ecuación 34. (Foggler, p. 107)

$$F_{A0} = \frac{n_{BIOMASA}}{t_{ALIMENTACIÓN}} \quad (34)$$

Datos:

$$n_{CASCARILLA} = 61.728 \text{ mol}$$

Desarrollo:

$$F_{A0} := \frac{n_{CASCARILLA}}{t_{feed}} = 0.017 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Teniendo la velocidad de alimentación, de la reacción de gasificación se escribe la Tabla 13.

Tabla 13. *Tabla Estequiométrica de un Sistema de Flujo.*

Símbolo	Especie	Velocidad de alimentación al reactor (mol/s)	Cambio dentro del reactor (mol/s)	Velocidad del efluente del reactor (mol/s)
A	$C_6H_{10}O_5$	F_{A0}	$-F_{A0} * X$	$F_A = F_{A0} * (1 - X)$
B	O_2	$F_{B0} = \Theta_B F_{A0}$	$-b/a * (F_{A0} * X)$	$F_B = F_{A0} * (\Theta_B - b/a * X)$
C	C	$F_{C0} = \Theta_C F_{A0}$	$-c/a * (F_{A0} * X)$	$F_C = F_{A0} * (\Theta_C - c/a * X)$
D	H_2	$F_{D0} = \Theta_D F_{A0}$	$-d/a * (F_{A0} * X)$	$F_D = F_{A0} * (\Theta_D - d/a * X)$
E	CO	$F_{E0} = \Theta_E F_{A0}$	$-e/a * (F_{A0} * X)$	$F_E = F_{A0} * (\Theta_E - e/a * X)$
F	CO_2	$F_{F0} = \Theta_F F_{A0}$	$-f/a * (F_{A0} * X)$	$F_F = F_{A0} * (\Theta_F - f/a * X)$
G	CH_4	$F_{G0} = \Theta_G F_{A0}$	$-g/a * (F_{A0} * X)$	$F_G = F_{A0} * (\Theta_G - g/a * X)$
I	N_2	$F_{I0} = \Theta_I F_{A0}$		$F_I = \Theta_I F_{A0}$

Fuente: Foggler (2010).

Dónde:

I , Gas inerte (N_2)

F_{A0} , Velocidad de alimentación al reactor (mol/s)

X , Factor de conversión de la reacción

Θ_B , Relación molar

c_{A0} , Cambio dentro del reactor (mol/s)

F_A , Velocidad del efluente del reactor (mol/s)

Al comprender la gasificación un conjunto de reacciones dentro del reactor, su conversión no es completa, por lo que se considera un factor de conversión del 80% para un equipo de flujo continuo. Foggler (2010).

Desarrollo:

$$\Theta_B = \frac{n_{CASCARILLA}}{n_{O_2}} = 1$$

$$\Theta_I := \frac{n_{CASCARILLA}}{n_{N_2}} = 0.233$$

$$\Theta_C := 0$$

$$\Theta_D := 0$$

$$\Theta_E := 0$$

$$\Theta_F := 0$$

$$\Theta_G := 0$$

Los valores para los productos inicialmente son cero ya que solo reacciona la biomasa con el agente gasificante.

Una vez desarrollada la Tabla 13, se escribe la siguiente tabla de resultados:

Tabla 14. *Resultados de la tabla estequiométrica.*

Símbolo	Especie	Velocidad de alimentación al reactor (mol/s)	Cambio dentro del reactor (mol/s)	Velocidad del effluente del reactor (mol/s)
A	C ₆ H ₁₀ O ₅	0.017	-0.014	0.003
B	O ₂	0.017	-0.014	0.003
C	C	0	-0.014	-0.014
D	H ₂	0	-0.041	-0.041
E	CO	0	-0.014	-0.014
F	CO ₂	0	-0.041	-0.041
G	CH ₄	0	-0.014	-0.014
I	N ₂	0.004		0.004

La velocidad de alimentación inicial total en el reactor se determina por medio de la ecuación 35.

$$F_{T0} := F_{A0} + F_{B0} + F_{I0} = 0.038 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \quad (35)$$

La velocidad global de reacción, corresponde al sumatorio de las velocidades finales y se expresa de la siguiente manera:

$$F_T := F_{T0} + \left(\frac{g}{a} + \frac{f}{a} + \frac{e}{a} + \frac{d}{a} + \frac{c}{a} - \frac{b}{a} - 1 \right) \cdot F_{A0} \cdot X = 0.134 \frac{\text{mol}}{\text{s}} \quad (36)$$

Densidad real de la biomasa

Las propiedades físico - químicas de la cascarilla de arroz están dadas por las Tablas 8 y 9, pero para determinar el volumen real del gasificador es necesario conocer la densidad a granel de la biomasa que va a ser utilizada en el proceso.

Los materiales a ser utilizados son:

- Vaso de precipitación (graduado)
- Balanza electrónica de precisión
- Cascarilla de Arroz

Pasos a Realizarse:

1. Encerar la balanza y esperar un tiempo para verificar que no cambie el valor en el display del equipo.



Figura 7. Balanza electrónica correctamente encerada.

2. Pesar el vaso de precipitación vacío en la balanza



Figura 8. Peso del vaso de precipitación.

3. Llenar el vaso de precipitación con la cascarilla de arroz hasta un volumen de 500 ml.



Figura 9. Vaso de precipitación con cascarilla de arroz.

4. Pesar nuevamente el vaso de precipitación con el contenido de cascarilla



Figura 10. Peso del vaso de precipitación que contiene cascarilla.

Los resultados obtenidos del ensayo son:

$$m_{VASO} = 184 \text{ g}$$

$$m_{VASO + CASCARILLA} = 238 \text{ g}$$

Entonces de la diferencia entre ambos se obtiene la masa de la cascarilla

$$m_{CASCARILLA} = (m_{VASO + CASCARILLA}) - (m_{VASO}) = 54 \text{ g}$$

$$V_{CASCARILLA} = 500 \text{ ml} = 500 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto la densidad experimental de la cascarilla es:

$$\rho_{CASCARILLA} = \frac{54 \text{ g}}{500 \text{ cm}^3} = 0.108 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{CASCARILLA} = 108 \text{ kg/m}^3$$

Concentraciones molares y volumen del gasificador

El flujo volumétrico en la alimentación se deduce de la siguiente ecuación:

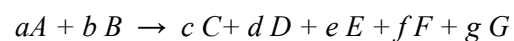
$$M_f = v * \rho_{CASCARILLA} \quad (37)$$

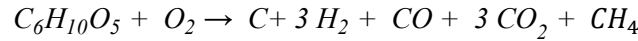
$$v := \frac{M_f}{\rho_{CASCARILLA}} = (2.572 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Dónde:

$\rho_{CASCARILLA}$: Densidad de la cascarilla (kg/m^3); v , Flujo volumétrico de alimentación (m^3/min) o (m^3/s)

Para un reactor de flujo continuo, la velocidad de reacción se obtiene por medio del siguiente análisis:





a, b, c, d, e, f, g son los coeficientes estequiométricos y la tasa de reacción depende de C_A y C_B que representan las concentraciones de A y B respectivamente. (Basu, p.136).

$$-r = k C_A^a C_B^b \quad (38)$$

Con los datos de la Tabla 14 se obtienen las concentraciones de A y B por medio de las ecuaciones 39 y 40. (Fogler, p.107).

$$C_A = \frac{F_A}{v} = \frac{F_{A0}}{v} (1 - X) \quad (39)$$

$$C_B = C_{A0} \left(\theta_B - \frac{b}{a} X \right) \quad (40)$$

Desarrollo:

$$C_{A0} := \frac{F_{A0}}{v} = 666.667 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$C_{B0} := \frac{F_{B0}}{v} = 666.667 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Entonces C_{A0} y C_{B0} son iguales por que la relación molar entre el agente gasificante y la biomasa es de 1:1 por lo que:

$$C_A := C_{A0} (1 - X)$$

$$C_B := C_{A0} \left(\cancel{\theta_B} - \cancel{\frac{b}{a}} \cdot X \right)$$

$$C_B := C_{A0} (1 - X)$$

En condiciones ideales y cuando se ha conseguido el equilibrio de las reacciones, la constante k global para la gasificación se considera como un promedio de las 3 constantes obtenidas en las reacciones R1, R2 y R9 que se calcularon anteriormente.

$$k := \frac{K_B + K_W + K_{WG}}{3} = 0.333 \quad (41)$$

Con los datos obtenidos de las ecuaciones 39, 40 y 41 se puede calcular el volumen mínimo que requiere el reactor, por medio de la ecuación 42. (Fogler, p.44)

$$V = N_A \int_0^X \frac{dX}{-r_A} \quad (42)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación se tiene que:

$$V = (N_A N_B) \int_0^X \frac{dX}{k C_A C_B}$$

$$V = (N_A N_B) \int_0^X \frac{dX}{k C_{A0} C_{B0} (1-X)^2}$$

$$V = \frac{(N_A N_B)}{k C_{A0} C_{B0}} \int_0^X \frac{dX}{(1-X)^2}$$

$$V = 4 * \frac{(61.728)(61.728)}{(0.333)(666.667)(666.667)}$$

$$V = 0.103 m^3$$

Dónde:

N_A , Número de moles de la cascarilla de arroz

N_B , Número de moles del agente gasificante

k , Constante global de gasificación

V , Volumen del reactor (m^3)

Cálculo de la temperatura de los gases a la salida del gasificador

Es de vital importancia el poder predecir la temperatura de salida de los gases en el reactor, ya que de ello depende si el gas a la salida requiere de un sistema de enfriamiento para su uso en aplicaciones energéticas.

Para los gasificadores de lecho fijo tipo updraft la temperatura de salida de los gases oscila entre los 200 y 400 °C.

Datos:

$$CpO_2 = 0.918 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$CpCO_2 = 0.844 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$CpC = 0.711 \frac{J}{gm \cdot K} = 711 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$CpCH_4 = 2.2537 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$CpH_2 = 14.297 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$CpCO = 1.04 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Valores para Cp obtenidos de Cengel (2003).

La temperatura de salida de los gases es una relación que depende tanto del poder calorífico de la biomasa, así como del calor específico global para la reacción de gasificación. (Fogler, p. 44)

$$T_{out} = T_{in} + \left(\frac{LHV_d}{\Delta Cp_T} \right) \quad (43)$$

Dónde:

T_{out} , Temperatura de salida de los gases

T_{in} , Temperatura de ingreso del aire (25°C)

LHV_d , Poder calorífico inferior de la biomasa

ΔCp_T , Calor específico global

El calor específico indica la capacidad calorífica de una sustancia. Tanto la humedad como la temperatura afectan al calor específico de la biomasa. Para biomasa residual de origen vegetal, se utiliza la ecuación 44. (Basu, p. 46)

$$Cp_{\theta} = 0.266 + 0.0116\theta \quad (44)$$

Donde la temperatura θ está dada en °C

$$\theta = 25$$

$$Cp_{\theta} = (0.266 + 0.0116 \cdot \theta) \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$Cp_{\theta} = 556 \frac{J}{kg \cdot K}$$

La expresión que involucra el factor de la humedad y la temperatura se calcula utilizando la ecuación 45. (Basu, p. 46).

$$Cp_{BM} = h' \cdot Cp_{H_2O} + (1 - h') \cdot Cp_{\theta} \quad (45)$$

La cantidad de agua contenida en el grano, se calcula por medio de la ecuación 46. (Renovables, p. 497)

$$h' = \frac{h}{h + 1} \quad (46)$$

Desarrollo:

$$Cp_{H_2O} = 1.8723 \cdot 10^3 \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$h' = \frac{h}{h + 1} = 0.091$$

$$Cp_{BM} = h' \cdot Cp_{H_2O} + (1 - h') \cdot Cp_{\theta} = 675.664 \frac{J}{kg \cdot K}$$

Dónde:

Cp_{H_2O} , Calor específico del agua

h' , Humedad de la biomasa en base húmeda

Cp_θ , Calor específico a la temperatura de reacción

Cp_{BM} , Calor específico de la biomasa

El calor específico Cp para la reacción global de gasificación, se obtiene de la ecuación 47. (Fogler, 2008)

$$\Delta Cp_T := \left(\frac{g}{a} Cp_{CH_4} + \frac{f}{a} Cp_{CO_2} + \frac{e}{a} Cp_{CO} + \frac{d}{a} Cp_{H_2} + \frac{c}{a} Cp_C \right) - \left(\frac{b}{a} Cp_{O_2} + Cp_{BM} \right) \quad (47)$$

$$\Delta Cp_T = (4.783 \cdot 10^4) \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$T_{out} := T_R + \left(\frac{LHV_d}{\Delta Cp_T} \right) = 299.918 \text{ } ^\circ C$$

La temperatura de salida de los gases en el reactor es de aproximadamente 300 °C lo cual indica que en condiciones ideales el reactor cumple dentro del rango establecido.

Velocidad de salida de los gases y energía térmica del gasificador

Al ser un gasificador de flujo continuo, la presión en el mismo es mínima o muy cercana a la atmosférica, por lo que la velocidad de salida de los gases depende del caudal de aire que ingresa en el reactor y se calcula con la ecuación 48. (Basu, p. 210).

$$V_g = \frac{M_{fa}}{\rho_g} \quad (48)$$

Desarrollo:

$$\rho_{AIRE} := 1.184 \frac{kg}{m^3}$$

$$V_g := \frac{M_{ga}}{\rho_{AIRE}} = 0.003 \frac{m^3}{s}$$

El calor de combustión en el gasificador se calcula utilizando la ecuación 49.

(Tipanluisa, 2012).

$$Q = m_c \cdot HR \quad (49)$$

Datos:

$$HR := LHV_d = (3.134 \cdot 10^3) \frac{kcal}{kg}$$

$$m_c := 10 \text{ kg}$$

Desarrollo:

$$Q := m_c \cdot HR = (3.134 \cdot 10^4) \text{ kcal}$$

$$Q = (1.312 \cdot 10^8) \text{ J}$$

Dónde:

V_g , Velocidad de salida de los gases (m^3/s)

HR , Equivalente al LHV_d en (kcal/kg)

m_c , Masa combustible en (kg).

La potencia térmica útil en el gasificador está sujeta a ciertas pérdidas energéticas por transferencia de calor, radiación de ciertos gases, entre otras. Por lo que Basu determina una eficiencia que va del 80 al 95% en gasificadores de lecho fijo tipo updraft. Este valor se obtiene del diseño térmico del reactor.

Diseño mecánico del sistema de alimentación, estructura metálica del reactor y equipo de alimentación de aire

Diseño mecánico del reactor

Una vez determinado el volumen mínimo del reactor, así como la presión de operación del mismo. Se debe determinar el espesor mínimo de pared del reactor en base a los siguientes puntos:

Presión de diseño del reactor

La presión de diseño del reactor cuando es inferior a los 300 psi, se calcula por medio de la ecuación 50. (Estrada, 2001).

$$Si P_0 \leq 300 \text{ psi}$$

$$P = P_0 + 30 \text{ psi} \quad (50)$$

Eficiencia de las soldaduras

El material de aporte de la soldadura, deberá ser compatible con el material base a soldar. Los electrodos más comunes para soldar recipientes a presión de acero al carbono, son el 6010 y el 7018.

$$E = 0.7 \quad (51)$$

Para juntas soldadas a tope y sin haber sido examinadas, la eficiencia de las mismas es del 70% (Megyesy, p. 172). La selección del tipo de electrodo se hace en base a los requerimientos del gasificador que son la humedad y las altas temperaturas, en el Anexo B se muestran las características para un electrodo 7018.

Al ser también un tipo de electrodo bastante comercial, se vuelve idóneo para las soldaduras del cuerpo del reactor. Las características técnicas del E7018 se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. *Características técnicas del electrodo 7018.*

Composición química (típica) del metal depositado:

C 0,06%; Mn 1,05%; Si 0,49%; P 0,015%; S 0,010%

Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):

Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte	Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
Resistencia a la tracción : 535 MPa	490 MPa	130J a -30°C	27J a -30°C
Límite de fluencia : 445 MPa	400 MPa		
Alargamiento en 50 mm : 30%	22%		

Amperajes recomendados:

Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	70	120	55
3,2	350	120	150	28
4,0	350	140	200	20
4,8	350	200	275	14

Fuente: Indura.

Factor de corrosión

La humedad, temperatura, lluvia, viento e impurezas tienen un efecto en la velocidad de corrosión de los metales. La corrosión se produce cuando la humedad relativa del aire es del 70 al 80%.

Esta reacción de corrosión es posible generalmente cuando la temperatura está por encima de 0 °C y la humedad relativa es superior al 80% (la superficie está húmeda). Las impurezas del aire que se disuelven en agua o el vapor condensado pueden acelerar la corrosión (NACE, 2015).

El reactor está expuesto tanto al vapor saturado que se produce dentro del gasificador por las distintas reacciones que allí se generan, así como a la humedad del ambiente. La velocidad de corrosión para el vapor saturado es de 0.3 mm/año y para proteger al gasificador

de la humedad del ambiente, se aísla térmicamente con materiales cerámicos y pintura anticorrosiva.

Al ser un reactor prototipo, que puede estar sujeto a modificaciones de diseño, construcción, entre otras. Un tiempo de vida útil al cual se proyectan muchos reactores y calderos es de 10 años, por lo que:

$$CA = (0.3mm/año) * (10 años) \quad (52)$$

$$CA = 3mm$$

Presión en tapas planas

Se utilizan para “cerrar” recipientes que están sujetos a presión atmosférica por lo general. Su costo entre las tapas es el más bajo y se utilizan también como fondos para tanques de almacenamiento de grandes dimensiones. (Megyesy, p. 26).

$$t = D \sqrt{\frac{C \times P}{S \times E}} \quad (53)$$

Dónde:

D , Diámetro del cilindro (mm o pulg).

C , Constante adimensional. Para diámetros que no exceden a 24in, C es igual a 0.13.

P_o , Presión de operación (psi o kPa).

P , Presión de diseño (psi o kPa).

S , Resistencia a la fluencia del material (ksi o MPa).

Desarrollo:

$$t = D \cdot \sqrt{\frac{0.13 P}{S \cdot E}} = 4.838 \text{ mm}$$

El espesor mínimo requerido para las tapas, tomando en cuenta las altas temperaturas es de 5 mm.

Presión interna del cilindro

Con todas las consideraciones anteriores, el espesor de pared se calcula según lo establece Megyesy (2001) en el “Pressure Vessel Handbook” por medio de la ecuación 54.

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} + CA \quad (54)$$

Dónde:

CA, Tolerancia a la corrosión que está en (mm o pulg).

R, Radio interior del cilindro (mm o pulg).

Para reactores de flujo continuo y de geometría cilíndrica, se tiene que la relación altura - diámetro es de 3 a 1 como mínimo, según lo recomienda Basu (2010).

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot h \quad (55)$$

Desarrollo:

$$h = 3D = 6R$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{V}{6\pi}} = 6.934 \text{ in}$$

$$R = 176.135 \text{ mm}$$

$$D = 2 R = 352.27 \text{ mm}$$

$$h = 6 R = 1.057 \text{ m}$$

Para el diseño se seleccionan planchas de acero laminado en frío SAE 1010 que tienen alta resistencia a la fluencia y a la temperatura.

$$S = 44\text{ksi o } 300 \text{ Mpa.}$$

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 P} + CA = 3.256 \text{ mm}$$

El espesor mínimo requerido para el cuerpo del cilindro es entonces de 3.5 mm, pero para mantener una relación de espesores más cercana con la tapa del cilindro, se recomienda una lámina de 4 mm de espesor.

Selección del equipo de alimentación de aire para gasificar

El flujo másico de aire que se necesita para combustionar es de 56.41 kg/h, entonces el caudal de aire mínimo necesario para iniciar el proceso se calcula utilizando la ecuación 56.

$$Q = \frac{M_{aire}}{\rho_{aire}} \quad (56)$$

$$\rho_{AIRE} := 1.184 \frac{kg}{m^3}$$

$$Q := \frac{M_{AIRE}}{\rho_{AIRE}} = 0.794 \frac{m^3}{min}$$

Dónde:

Q , Caudal de aire mínimo para iniciar la combustión (m^3/min)

M_{aire} , Flujo másico de aire (kg/h)

ρ_{aire} , Densidad del aire a 25 °C (kg/m^3)

Un blower centrífugo de aluminio con salida de 2 pulgadas presenta las siguientes características:

Tabla 16. Características Blower Centrífugo T - CZR / 150 W.

Modelo	Salida (pulg)	Potencia (W)	Corriente (A)	Voltaje (V)	Peso del equipo (kg)	Flujo (m^3/min)
T-CZR	2	150	2	110	2.3	2.2
WRT	2½	190	2	110	2.8	3.3

Fuente: http://es.aliexpress.com/store/product/T-CZR-150W-centrifugal-blowers-aluminum-2/503943_348226439.html



Figura 11. Blower centrifugo para alimentación de aire

Por requerimientos de diseño un equipo de 150W y salida de 2 pulgadas cumple satisfactoriamente.

Diseño del sistema de alimentación de biomasa

Los transportadores helicoidales corresponden a uno de los métodos más antiguos en el transporte de materiales. Fueron inventados en el siglo III a. C. por Arquímedes, del cual reciben su nombre, aunque existen hipótesis de que ya eran utilizados en el Antiguo Egipto. Hoy en día la tecnología moderna ha hecho del tornillo de Arquímedes uno de los métodos más eficientes y económicos para el traslado de materiales.

Sus ventajas respecto a otros sistemas de transporte de fluidos o materiales son:

- Su versatilidad para ser empleados en instalaciones de forma horizontal, inclinada o vertical.
- Se pueden utilizar para controlar el flujo de materiales en operaciones que dependen de la dosificación exacta.

- Pueden utilizarse para mezclar o agitar ingredientes solidos o líquidos para mantener soluciones en suspensión.

Los tipos de trasportadores helicoidales que existen son los siguientes:

Tornillo de sección estándar

Los tornillos transportadores con paso igual al diámetro del tornillo se consideran estándar. Son adecuados para una amplia gama de materiales en la mayoría de las aplicaciones convencionales.

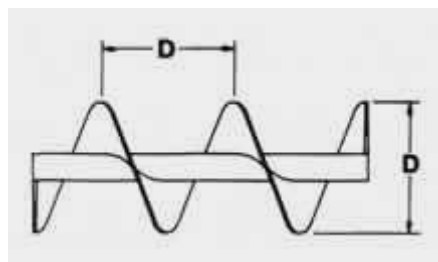


Figura 12. Tornillo estándar. Fuente: <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/conveyor-flight-pitch-types.htm>

Tornillos de paso corto

Son aquellos cuyo paso es igual a $2/3$ del diámetro. Al ser el paso más corto se retrasa el flujo de materiales a ser transportados.

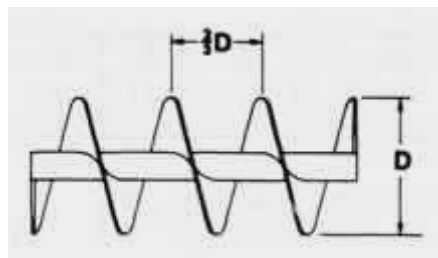


Figura 13. Tornillo de paso corto. Fuente: <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/conveyor-flight-pitch-types.htm>

Tornillos de paso medio

Similares a los de paso corto, excepto que el paso se reduce a la mitad del diámetro. Son útiles para aplicaciones verticales o inclinadas y para el transporte de materiales muy fluidos.

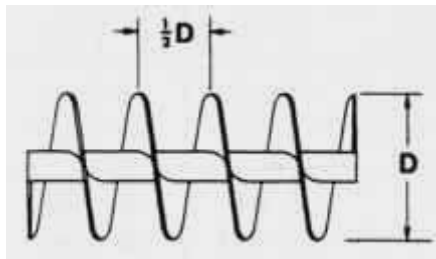


Figura 14. Tornillo de paso medio. Fuente: <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/conveyor-flight-pitch-types.htm>

Tornillos de transporte cónicos

Utilizados generalmente en alimentadores de tornillo para proporcionar un retiro uniforme de materiales abultados.

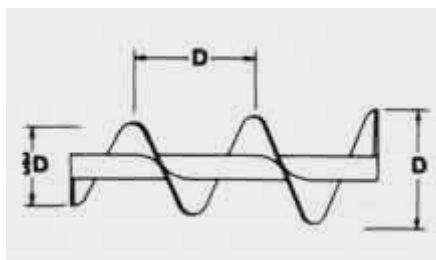


Figura 15. Tornillo de transporte cónico. Fuente: <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/conveyor-flight-pitch-types.htm>

Tornillos de cinta simple

Excelente para el transporte de materiales pegajosos o muy viscosos. El espacio abierto que existe entre el vuelo y la tubería, elimina el amontonamiento de material.

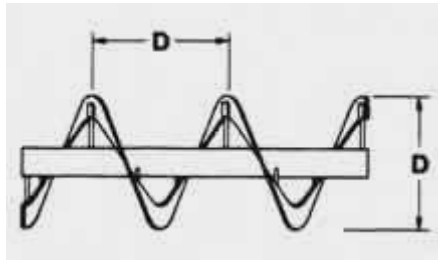


Figura 16. Tornillo de cinta simple. Fuente: <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/conveyor-flight-pitch-types.htm>

Tornillo de espas cortantes

Se utiliza para el transporte de materiales livianos, finos o granulares que tienden a aglomerarse en movimiento. Permite mezclar el material en tránsito, para eliminar la suciedad del grano

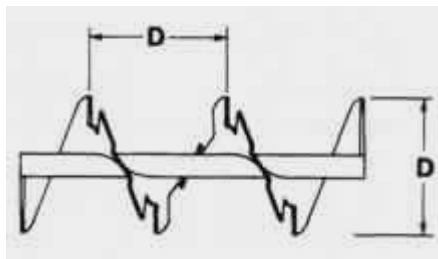


Figura 17. Tornillo de vuelo cortante. Fuente: <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/conveyor-flight-pitch-types.htm>

Tornillo de paletas

Se utilizan para realizar mezcla completa o remoción de materiales. Las paletas pueden ser fijas “soldadas al tubo” o de paso ajustable “empernadas, para proporcionar grados variables de mezcla”.

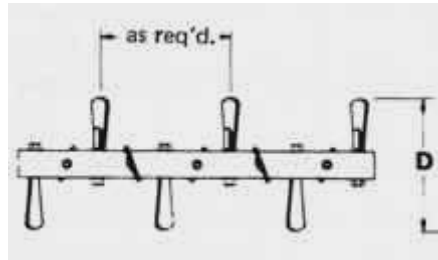


Figura 18. Tornillo de paletas. Fuente: <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/conveyor-flight-pitch-types.htm>

Una vez determinados los tipos de transportadores helicoidales existentes, se selecciona al tornillo de paso simple, por su simplicidad en el diseño y por ser una de las alternativas más utilizadas en el transporte de materiales.

Diseño del transportador helicoidal

Para el diseño del transportador helicoidal se debe seguir una serie de pasos que se muestran a continuación:

Establecer los requerimientos de transporte

El material a ser transportado es cascarilla de arroz, el cual tiene una densidad de 108 kg/ m³ y fluye a una velocidad de 0.09 m³/h (3.178 ft³/h) a una distancia estimada de 2½ ft.

Identificar el material con su respectivo código

De acuerdo a la Asociación de Fabricantes de Equipos Transportadores CEMA, los materiales a ser transportados se clasifican de acuerdo con el Anexo C.

Cada uno de los puntos mencionados en el Anexo C, sirve para determinar el código del material a ser transportado, ya que la cascarilla de arroz puede variar en su densidad de acuerdo al país. La CEMA establece un código general de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 17. *Características de los materiales.*

TABLE B: Material Characteristics (continued)

MATERIAL	MAT'L CLASS CODE	CONV LOADING	COMPONENT GROUP	WEIGHT (LBS/CF)		MAT'L FACTOR F_m	VERT.*
				MIN	MAX		
Oxalic Acid Crystals – Ethane Diacid Crystals	60B35QS	30A	1A,1B	60	60	1.0	
Oyster Shells, Ground	55C36T	30B	3D	50	60	1.8	
Oyster Shells, Whole	80D36TV	30B	3D	80	80	2.3	
Paper Pulp (4% or less)	62E45	30A	2A,2B	62	62	1.5	
Paper Pulp (6% to 15%)	62E45	30A	2A,2B	60	62	1.5	
Paraffin Cake, ½"	45C45K	30A	1A,1B	45	45	0.6	
Rice, Bran	20B35NY	30A	1A,1B,1C	20	20	0.4	x
Rice, Grits	44B35P	30A	1A,1B,1C	42	45	0.4	x
Rice, Hulled	47C25P	45	1A,1B,1C	45	49	0.4	x
Rice, Hulls	21B35NY	30A	1A,1B,1C	20	21	0.4	x
Rice, Polished	30C15P	45	1A,1B,1C	30	30	0.4	x
Rice, Rough	34C35N	30A	1A,1B,1C	32	36	0.6	x
Rosin, ½"	67C45Q	30A	1A,1B,1C	65	68	1.5	
Rubber, Pelleted	53D45	30A	2A,2B,2C	50	55	1.5	
Rubber, Reclaimed Ground	37C45	30A	1A,1B,1C	23	50	0.8	x
Rye	45B15N	45	1A,1B,1C	42	48	0.4	x
Rye Bran	18B35Y	30A	1A,1B,1C	15	20	0.4	x
Rye Feed	33B35N	30A	1A,1B,1C	33	33	0.5	x
Rye Meal	38B35	30A	1A,1B,1C	35	40	0.5	x
Rye Middlings	42B35	30A	1A,1B	42	42	0.5	x
Rye, Shorts	33C35	30A	2A,2B	32	33	0.5	x
Safflower Seed (Saffron)	45B15N	45	1A,1B,1C	45	45	0.4	x
Safflower, Cake (Saffron)	50D26	30B	2D	50	50	0.6	
Safflower, Meal (Saffron)	50B35	30A	1A,1B,1C	50	50	0.6	x

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

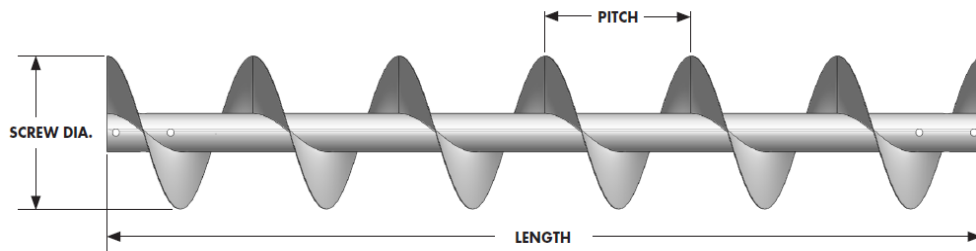
Capacidad de transporte, tamaño del tornillo y velocidad

La capacidad requerida es un factor que depende del diámetro del tornillo, el diámetro del tubo, el porcentaje de carga y el paso del tornillo, según lo establece la CEMA en la ecuación 57.

$$C = \frac{0.7854 (D_s^2 - D_p^2) \times P \times K \times 60}{1728} \quad (57)$$

Tabla 18. Selección del tornillo helicoidal.

SECTIONAL SCREW



SCREW DIA	COUPLING SHAFT DIA	SCREW PART #	NOMINAL PIPE SIZE	PIPE OD	FLIGHT THICK.	STD LENGTH	STD LENGTH SCREW WT* (LB)			FLIGHT WT EACH (LB)
							SCH 40	SCH 80	SCH 80 CLAD**	
6	1 ½	6SS309	2	2 ¾	10 ga	9'-10"	62	75	NA	1.1
6	1 ½	6SS312	2	2 ¾	¾	9'-10"	70	83	NA	1.6
6	1 ½	6SS316	2	2 ¾	¼	9'-10"	80	93	NA	2.1
9	1 ½	9SS309	2 ½	2 ¾	10 ga	9'-10"	78	91	NA	3.0
9	1 ½	9SS312	2 ½	2 ¾	¾	9'-10"	115	132	NA	3.9
9	1 ½	9SS316	2 ½	2 ¾	¼	9'-10"	131	148	NA	5.2

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

De acuerdo con la empresa Conveyor Engineering & Manufacturing, que es uno de los principales representantes de la CEMA a nivel mundial; para el transporte de materiales, el diámetro mínimo de tornillo que se puede seleccionar es de 6 pulgadas.

$$C = \frac{0.784 \cdot (D_s^2 - D_p^2) \cdot P \cdot K \cdot 60}{1728} \left(\frac{ft^3}{hr} \right) = 1.568 \frac{ft^3}{hr}$$

Dónde:

C , Capacidad requerida (ft^3/h)

D_s , Diámetro del tornillo (6 in)

D_p , Diámetro del tubo (2 in)

P , Paso del tornillo (6 in)

K , Porcentaje de carga (30%)

Al ser la capacidad requerida menor a la real; la cual tiene un valor de $3.178 \text{ ft}^3/\text{h}$. Para el diseño se utilizará la mayor de ambas.

$$\text{Capacidad Equivalente} = C \times CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \quad (58)$$

$$\text{Capacidad Equivalente} = (3.178 \text{ ft}^3/\text{h}) \times 1 \times 1 \times 1.08 = 3.432 \text{ ft}^3/\text{h}$$

Dónde:

CF_1 , CF_2 y CF_3 , Factores de capacidad para transportadores helicoidales (Anexo D)

El número de revoluciones necesario para mantener un flujo de alimentación constante se determina por medio de la ecuación 59.

$$N = \frac{\text{Capacidad Equivalente}}{\text{Capacidad a 1 rpm}} \quad (59)$$

$$N = \frac{3.432 \text{ (ft}^3/\text{h)}}{1.5 \text{ (ft}^3/\text{h} * \text{rpm)}} = 2.23 \text{ rpm}$$

Dónde:

N , Velocidad del tornillo (rpm); *Capacidad a 1 rpm*, Obtenida del Anexo E

El juego radial que necesita el tornillo helicoidal, para evitar rozamiento con las paredes de la superficie, se representa por medio de la Figura 19:

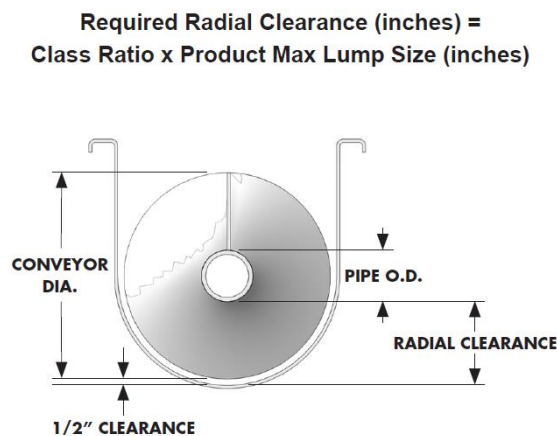


Figura 19. Juego radial requerido para tornillos helicoidales. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Para tornillos normalizados que van a partir del diámetro de 6 pulgadas, el juego radial requerido se obtiene por medio de la Tabla 19.

Tabla 19. Tamaño de bulto máximo para tornillos estándar.

SCREW DIA (INCHES)	PIPE OD (INCHES)	RADIAL CLEARANCE (INCHES)	CLASS 1 10% LUMPS MAX LUMP SIZE (IN)	CLASS 2 25% LUMPS MAX LUMP SIZE (IN)	CLASS 3 95% LUMPS MAX LUMP SIZE (IN)
6	2 3/8	2 5/16	1 1/4	3/4	1/2
9	2 3/8	3 13/16	2 1/4	1 1/2	3/4
9	2 7/8	3 9/16	2 1/4	1 1/2	3/4
12	2 7/8	5 1/16	2 3/4	2	1
12	3 1/2	4 3/4	2 3/4	2	1
12	4	4 1/2	2 3/4	2	1
14	3 1/2	5 3/4	3 1/4	2 1/2	1 1/4
14	4	5 1/2	3 1/4	2 1/2	1 1/4
14	4 1/2	5 1/4	3	2	1
16	4	6 1/2	3 3/4	2 3/4	1 1/2
16	4 1/2	6 1/4	3 3/4	2 3/4	1 1/2
16	5 9/16	5 23/32	3 1/4	2 1/4	1 1/4

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

De acuerdo con la Tabla 19, para un tornillo helicoidal de 6 pulgadas, que tiene un tubo de diámetro exterior de 2 3/8" se requiere un juego radial de 2 5/16" pulgadas.

Potencia mínima requerida para el tornillo

La potencia necesaria para hacer funcionar un transportador de tornillo horizontal se basa en la propia instalación, en la velocidad de alimentación para el transportador, entre otros criterios de diseño. El requerimiento de potencia es el total de la potencia necesaria para superar la fricción de los componentes del transportador HP_f y la potencia para transportar el material HP_m , multiplicado por el factor de sobrecarga F_o y dividido por la eficiencia total.

$$HP_f = \frac{L \times N \times F_d \times F_b}{1000000} \quad (60)$$

$$HP_m = \frac{C \times L \times D \times F_m \times F_f \times F_p}{1000000} \quad (61)$$

$$HP_{total} = \frac{(HP_f + HP_m) \times F_o}{e} \quad (62)$$

Dónde:

L , Longitud total del tornillo (ft)

N , Velocidad de operación (rpm)

C , Capacidad requerida (ft³/ h)

D , Densidad del material a ser transportado (lb/ft³)

F_d , Factor de diámetro del tornillo (Tabla 22)

F_b , Factor del rodamiento (Tabla 23)

F_m , Factor del material (Tabla 18)

F_f , Factor de modificación de vuelo (Tabla 20)

F_p , Factor de las paletas o aspas (Tabla 21)

F_o , Factor de sobrecarga (Figura 20)

e , Eficiencia total (Anexo F)

Del Anexo F, al ser un eje acoplado en línea directo con el motor y la caja reductora apropiada, se tiene una eficiencia de 94%.

Al tener un eje que trabaja a bajas revoluciones, el torque va a ser alto para poder vencer la inercia, por lo que del Anexo G se estima una eficiencia del 94%, que representa el uso de 2 cajas reductoras acopladas en serie.

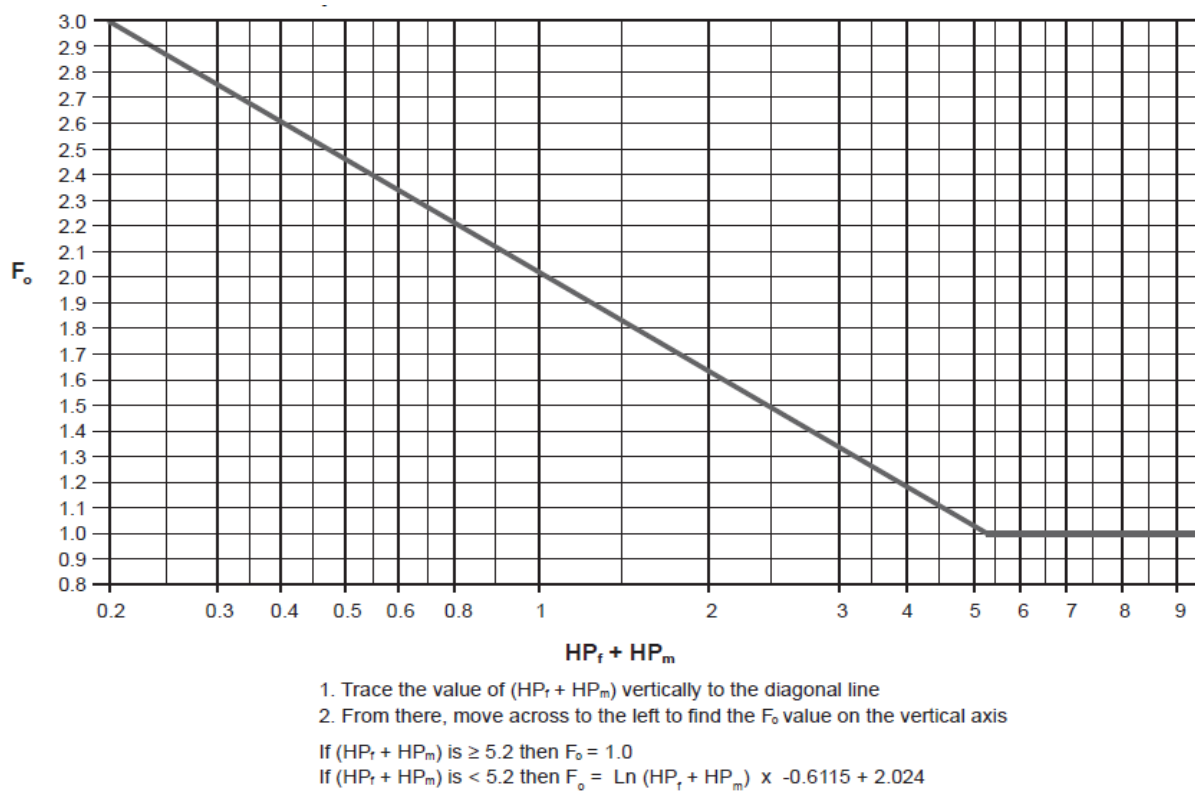


Figura 20. Factor de sobrecarga. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Tabla 20. Factor de modificación de vuelo.

TYPE OF FLIGHTING	CONVEYOR LOADING			
	15%	30%	45%	95%
Standard	1.00	1.00	1.00	1.00
Cut	1.10	1.15	1.20	1.30
Cut & Folded	NR	1.50	1.70	2.20
Ribbon	1.05	1.14	1.20	NR

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Al ser un tornillo estándar con una carga de alimentación del 30%, el factor de modificación de vuelo es igual a 1.

Tabla 21. *Factor de las paletas o aspas.*

STD PADDLES PER PITCH SET AT 45° REVERSE PITCH				
NONE	1	2	3	4
1.00	1.29	1.58	1.87	2.16

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Se elige un factor de 1.29 debido a que la relación paso – diámetro es igual a 1. Lo cual indica que se forma una hélice por cada paso del tornillo.

Tabla 22. *Factor de diámetro del tornillo*

SCREW DIA.	F _d	SCREW DIA.	F _d
6	18	24	235
9	31	30	360
10	37	36	512
12	55	42	720
14	78	48	940
16	106	54	1200
18	135	60	1500
20	165		

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

El factor de diámetro del tornillo es igual a 18, debido a que el diámetro del helicoidal es de 6 pulgadas.

Tabla 23. *Factor del rodamiento.*

COMPONENT GROUP	BEARING TYPE	FACTOR F_b
A	Ball	1.0
B & C	Babbitt	1.7
	Bronze	1.7
	Bronze (oil impregnated)	1.7
	Bronze w/Graphite Plugs	1.7
	Canvas Based Phenolic	1.7
	Ertalyte	2.5
	Gatke	1.7
	Melamine	3.5
	Nylon/Nylatron GS	2.0
	Plastic Resin	2.0
	Ryertex	1.7
	Teflon	2.0
	UHMW	2.0
	Wood (oil impregnated)	1.7
D	Chilled Hard Iron	4.4
Req's hardened cplg shaft	Hardened Alloy Sleeve	4.4
	Stellite	4.4

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

El factor del rodamiento es igual a 1, ya que bajas revoluciones los ejes pueden trabajar eficientemente con rodamientos de bolas.

Entonces de los datos obtenidos de las tablas y figuras anteriores se tienen los siguientes valores:

$$C := 3.178 \frac{ft^3}{hr}$$

$$D := 20 \frac{lb}{ft^3}$$

$$L := 2.5 \text{ ft}$$

$$N := 3 \text{ rpm}$$

$$F_d := 18$$

$$F_b := 1$$

$$F_m := 0.4$$

$$F_f := 1$$

$$F_p := 1.29$$

$$e := 0.94 \cdot 0.94 = 0.884$$

Desarrollo:

$$HP_f := \frac{L \cdot N \cdot F_d \cdot F_b}{1000000} \text{ (hp)} = (1.35 \cdot 10^{-4}) \text{ hp}$$

$$HP_f = 0.101 \text{ W}$$

$$HP_m := \frac{C \cdot L \cdot D \cdot F_m \cdot F_f \cdot F_p}{1000000} \text{ (hp)} = (8.199 \cdot 10^{-5}) \text{ hp}$$

$$HP_m = 0.061 \text{ W}$$

El factor de sobrecarga puede ser obtenido de la Figura 20, pero al ser la suma de ambas potencias muy baja, se cumple que cuando $(HP_f + HP_m) < 5.2$ el factor de sobrecarga se determina por medio de la ecuación 63.

$$F_o := \ln(HP_f + HP_m) \cdot (-0.6115) + 2.204 = 7.229 \quad (63)$$

Entonces se tiene que la potencia minima requerida por el motor para mover el tornillo helicoidal es:

$$HP_{total} := \frac{(HP_f + HP_m) \cdot F_o}{e} = 1.647 \text{ W}$$

Al tenerse una potencia muy baja debido al pequeño flujo de alimentación, bajas revoluciones y longitud corta del tornillo, se realiza la selección del motor en base a los modelos existentes en el mercado, que se puedan acoplar a cajas reductoras que suministren el torque necesario para mover el tornillo.

Torque necesario para mover el tornillo

El torque necesario es una función del tamaño del motor HP y la velocidad del tornillo helicoidal rpm . Se calcula por medio de la ecuación 64:

$$TQ = \frac{63.025 \times HP_{total}}{N} \quad (64)$$

$$TQ = \frac{63.025 \cdot HP_{total}}{N} = (2.925 \cdot 10^3) \text{ in}\cdot\text{lbf}$$

$$TQ = 330.444 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Dónde:

TQ , Torque requerido (lb*in)

El diámetro del eje que requiere el tornillo helicoidal de 6" es de 1½" y el material para el mismo, se selecciona de la tabla 24:

Tabla 24. *Torque máximo de los componentes.*

SHAFT DIA	PIPE	SHAFTS*		PIPE	COUPLING BOLTS					
					SHEAR		LOAD BEARING			
		MATERIAL		MAT'L	2-BOLT	3-BOLT	w/o PADS	w/o PADS	w/ PADS	w/ PADS
		SS/1018**	4140				2-BOLT	3-BOLT	2-BOLT	3-BOLT
1-1/2"	2" sch 40	2,565	3,552	7,288	3,829	5,743	5,016	7,524	16,641	24,962
1-1/2"	2" sch 80	2,565	3,552	9,501	3,829	5,743	5,016	7,524	16,641	24,962
1-1/2"	2-1/2" sch 40	2,565	3,552	13,832	3,829	5,743	8,945	13,417	22,070	33,105
1-1/2"	2-1/2" sch 80	2,565	3,552	17,402	3,829	5,743	8,945	13,417	22,070	33,105
2"	2-1/2" sch 40	6,354	8,798	13,832	7,977	11,965	7,888	11,833	26,170	39,254
2"	2-1/2" sch 80****	6,354	8,798	17,402	7,977	11,965	7,888	11,833	26,170	39,254
2"	3" sch 40	6,354	8,798	22,413	7,977	11,965	15,345	23,018	35,970	53,955
2"	3" sch 80	6,354	8,798	28,929	7,977	11,965	15,345	23,018	35,970	53,955
2"	3" 80/10 clad	6,354	8,798	42,631	7,977	11,965	18,598	27,896	40,123	60,184

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Los materiales recomendados para ejes de transmisión de potencia según la empresa Conveyor Engineering & Manufacturing son el acero AISI 1018 y AISI 4140.

Para determinar el esfuerzo a torsión ejercido sobre el eje de transmisión se utilizan las ecuaciones 65 y 66.

Datos:

$$T = 330.444 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$D = 1.5 \text{ in}$$

$$r = \frac{D}{2} = 0.75 \text{ in}$$

$$S_y = 53.7 \text{ ksi}$$

AISI 1018

$$S_{ut} = 63.8 \text{ ksi}$$

Desarrollo:

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{32} = 0.497 \text{ in}^4 \quad (66)$$

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} = 4.413 \text{ ksi} \quad (67)$$

$$\tau = 30.429 \text{ MPa}$$

Dónde:

T , Torque aplicado al eje (lb*in)

D , diámetro del eje (in)

r , Centroide (in)

J , Momento polar de inercia del eje (in⁴)

τ , Esfuerzo a torsión (ksi o MPa)

S_y , Resistencia a la fluencia del material (ksi)

S_{ut} , Resistencia ultima a la tracción del material (ksi)

Tamaño requerido para los componentes del sistema de alimentación de biomasa

La siguiente figura indica los componentes de un sistema de transporte helicoidal.

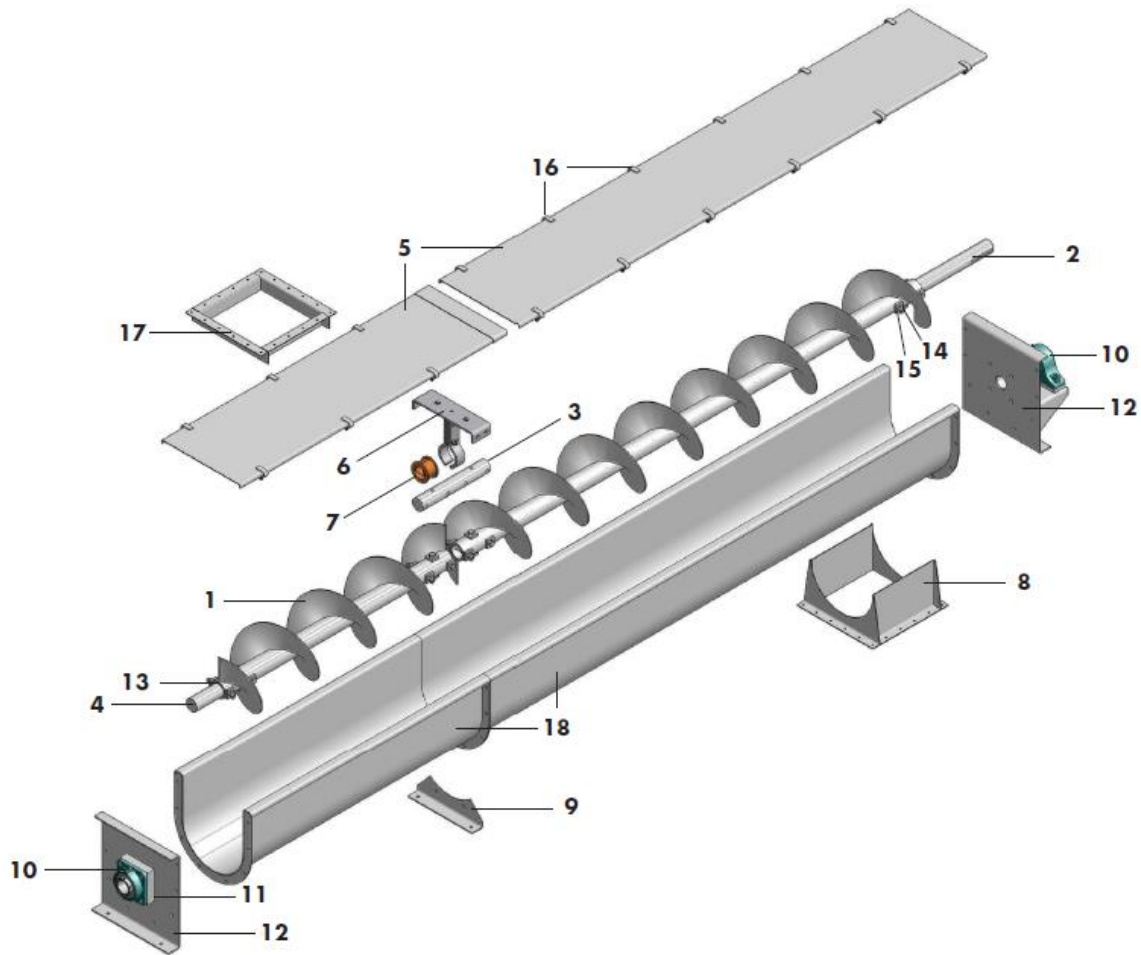


Figura 21. Esquema general de un transportador helicoidal. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

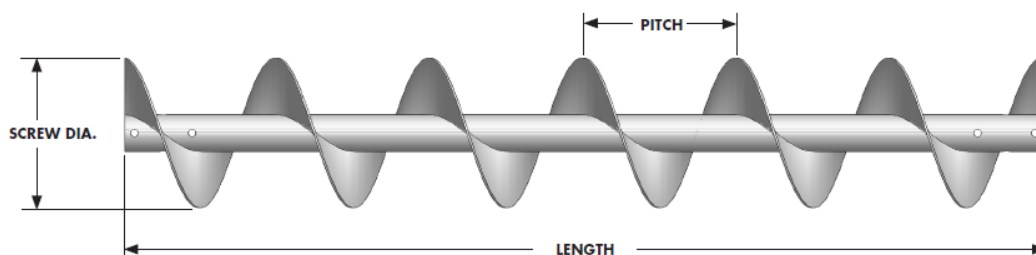
Partes:

1. Tornillo
2. Eje transmisor
3. Eje de acople
4. Eje conducido

5. Cubiertas
6. Soporte
7. Rodamiento del soporte
8. Descarga
9. Pie de apoyo
10. Rodamientos
11. Juntas
12. Placas de soporte
13. Bujes o collarines internos
14. Pernos de acoplamiento
15. Arandelas y tuercas
16. Abrazaderas de sujeción
17. Alimentación
18. Canal

Tornillo y sus partes

La tubería de acero revestido que va de cedula 10 a cedula 80 es una de las más utilizadas en los sistemas de transporte helicoidales, la cual lleva en la industria más de 20 años mostrando grandes resultados según la empresa Conveyor Engineering & Manufacturing. Para la selección del tornillo se utiliza la tabla 25.

Tabla 25. *Dimensiones del tornillo helicoidal.***HELICOID SCREW**

SCREW DIA	COUPLING SHAFT DIA	SCREW PART #	NOMINAL PIPE SIZE	PIPE OD	FLIGHT AT BASE	THICKNESS AT TIP	STANDARD LENGTH	STD LENGTH SCREW WT (LB)	FLIGHTING ONLY STD LENGTH WT (LB)
6	1 ½	6SH304	2	2 ¾	⅛	⅛	9'-10"	52	14
9	1 ½	9SH306	2	2 ¾	⅜	⅜	9'-10"	70	31
9	2	9SH406	2 ½	2 ¾	⅜	⅜	9'-10"	91	30
10	1 ½	10SH306	2	2 ¾	⅜	⅜	9'-10"	81	48
12	2	12SH408	2 ½	2 ¾	¼	⅛	11'-10"	140	67

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

La longitud estándar de este tipo de transportadores es de 9 ft (108 in), por lo que al requerir de una longitud máxima de 2 ½ ft (30in) solo se toma en cuenta las dimensiones del tornillo, tubo y diámetro del eje.

Eje transmisor y eje conducido

Al tratarse de un tornillo helicoidal de longitud corta, no se necesita de un eje de acople, ya que estos se utilizan solo en transportadores que mueven grandes cantidades de material. El tipo de acoplamiento estándar satisface a las consideraciones de diseño, ya que no hay riesgo de altas temperaturas. El eje se selecciona de los Anexos H e I.

Cubiertas

Una de las cubiertas más utilizada es la cubierta plana, tanto por su facilidad constructiva como por el montaje. Su función es evitar salpicaduras o desperdicio de material, una vez que el material fluye por el tornillo. Las dimensiones se obtienen del Anexo J.

Para el tornillo de 6 in se necesita una cubierta calibre 14, que tiene 2.108 mm (0.083 in) de espesor. Fuente: <http://www.mesteel.com/cgi-bin/w3-mysql/goto.htm?url=/info/carbon/thickness.htm>

Canal de alimentación

Los canales de alimentación se fabrican de planchas de acero de lámina delgada y se seleccionan de acuerdo con el Anexo K. El espesor de lámina debe ser el mismo que para las tapas, por lo que se selecciona una plancha de acero calibre 14.

Alimentación

La alimentación se selecciona de acuerdo al tipo de canal, por lo que al ser un canal en U estándar, se tiene que la alimentación va empernada de acuerdo a la configuración mostrada en el Anexo L.

A diferencia de las tapas, el espesor requerido para este tipo de alimentación es de calibre 12 (2.769 mm o 0.109 in). Los pernos de sujeción deben ser de 3/8 in.

Descarga

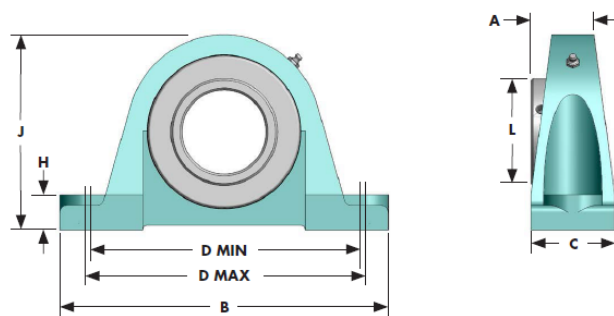
Similar a lo ocurrido con la alimentacion; la descarga debe tener el mismo espesor que la alimentación y los pernos de ajuste utilizados, deberan ser tambien de 3/8 in. (Anexo M)

Rodamientos

Los rodamientos son elementos importantes que disminuyen o amenizan la fricción producida por el eje en contacto. Mientras mayor sea la superficie en contacto mayor resistencia al rozamiento y a la fricción pondrá el rodamiento.

Al trabajar con un eje que gira a bajas revoluciones, los rodamientos de bolas que son los que menor superficie en contacto tienen, garantizan un buen funcionamiento y bajo costo en relación a otros tipos. Estos se seleccionan de las siguientes tablas:

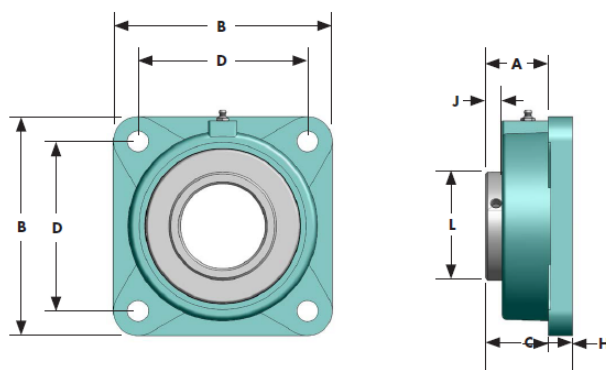
Tabla 26. Rodamiento ubicado al inicio de la transmisión.



SHAFT	PART #	A	B	C	D MIN	D MAX	H	J	L	M	BOLT DIA	WEIGHT
1 1/2	P2B-SC-108	1 11/16	7 1/4	1 15/16	5 3/16	5 7/8	1 9/16	4 3/8	2 3/64	2 1/8	1/2	6
2	P2B-SCM-200	1 27/32	8 7/8	2 5/16	6 3/8	7 1/16	7/8	4 31/32	2 23/32	2 1/2	5/8	9
2 7/16	P2B-SC-207	1 53/64	9 1/2	2 3/8	6 7/8	7 15/16	7/8	5 13/32	2 31/32	2 3/4	5/8	11
3	P2B-SCM-300	2 11/32	11 3/4	3	8 1/2	9 1/2	1 1/4	6 31/32	3 53/64	3 1/2	7/8	21
3 7/16	P2B-SCM-307	2 31/64	14	3 3/8	10 5/8	11 5/8	1 5/16	8	4 23/64	4	7/8	32

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Tabla 27. Rodamiento a la salida del eje conducido.



SHAFT	PART #	A	B	C	D	H	J	L	BOLT DIA	WEIGHT
1 1/2	F4B-SC-108	1 11/16	5 1/8	1 7/8	4	9/16	1 7/32	2 3/64	1/2	5
2	F4B-SCM-200	1 27/32	6 1/2	2 5/32	5 1/8	1 1/16	9/16	2 23/32	5/8	10
2 7/16	F4B-SC-207	1 53/64	6 7/8	2 9/32	5 5/8	1 1/16	9/16	2 31/32	5/8	11
3	F4B-SCM-300	2 11/32	7 3/4	3 3/32	6	7/8	1 9/32	3 53/64	3/4	21
3 7/16	F4B-SCM-307	2 31/64	8 7/16	3 11/32	6 3/4	1	9/16	4 23/64	3/4	28

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

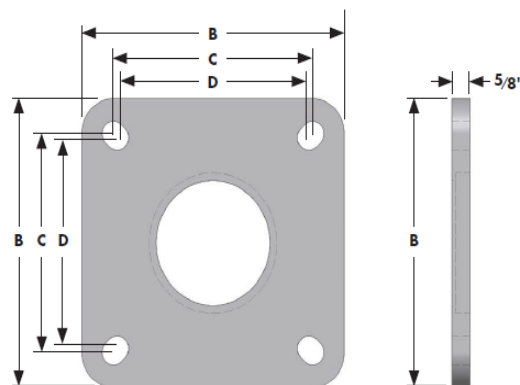
Juntas

Las juntas o sellos están diseñadas para el montaje entre la placa de soporte que une al canal y el rodamiento, para poder asegurar un correcto montaje del rodamiento a la salida.

Estas se seleccionan de la tabla 28.

Tabla 28. *Junta plana de soporte para rodamiento.*

PLATE SEAL



SHAFT DIA	PART #	B	C	D	BOLTS	WEIGHT
1 1/2	CSF112	5 3/8	4 1/8	4	1/2	2
2	CSF2	6 1/2	5 1/8	4 3/8	5/8	3
2 7/16	CSF2716	7 3/8	5 3/8	5 3/8	5/8	4
3	CSF3	7 3/4	6	6	3/4	5
3 7/16	CSF3716	9 1/4	7	6 3/4	3/4	8
3 15/16	CSF31516	10 1/4	7 3/4	7 3/4	7/8	11

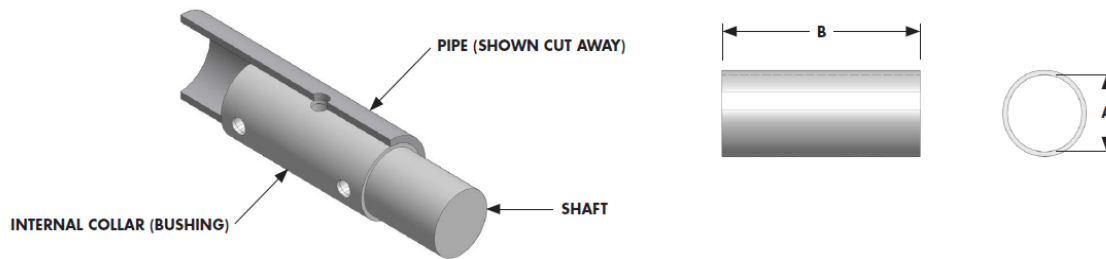
Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Placas de soporte

Las placas de soporte son el elemento principal de sellado del canal de transporte, ya que de ello depende que la biomasa sea correctamente transportada y no hayan desperdicios o fugas en las salidas. Se seleccionan del Anexo N.

Bujes o collarines internos

Los bujes sirven para mantener correctamente el acople entre el tubo y el eje de transmisión. Se selecciona de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 29. *Bujes o collarines internos.*

SHAFT DIA	(2 BOLT) PART #*	(3 BOLT) PART #*	A** BORE	B (2 BOLT)	B (3 BOLT)	BOLT HOLE DIAMETER	COUPLING BOLT
1 1/2	CICS-112	-	1.510	4 3/4	7 3/4	17/32	1/2
2	CICS-2	CICS-2-3B	2.010	4 3/4	7 3/4	21/32	5/8
2 7/16	CICS-2716	CICS-2716-3B	2.448	4 7/8	7 7/8	21/32	5/8
3	CICS-3	CICS-3-3B	3.014	5	8	25/32	3/4
3 7/16	CICS-3716	CICS-3716-3B	3.452	7	11	29/32	7/8
3 15/16	CICS-31516	CICS-31516-3B	3.952	7	11 1/2	1 3/16	1 1/8
4 7/16	CICS-4716	CICS-4716-3B	4.452	N/A	11 3/4	1 5/16	1 1/4

* CICS=Stainless Steel, CIC=Carbon Steel,

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Pernos de acoplamiento

A diferencia de otras partes y piezas del sistema de alimentacion que pueden ser acero al carbono y aleaciones, la empresa Conveyor Engineering & Manufacturing recomienda que los pernos a utilizarse sean de acero inoxidable 316 y rosca UNC para resistir la corrosión que existe al transportar materiales que contienen cierto grado de humedad.

Tabla 30. *Pernos de acoplamiento.*

SHAFT SIZE	NOMINAL PIPE SIZE	BOLT SIZE (316SS, UNC) w/o BOLT PADS	BOLT SIZE (316SS, UNC) w/ BOLT PADS	MAX TORQUE* (FT-LB) 316SS	MAX TORQUE* (FT-LB) GRADE 5 CS
1 1/2	2	1/2 x 3	-	45	75
1 1/2	2 1/2	1/2 x 4	-	45	75
2	2 1/2	5/8 x 4	5/8 x 5	95	150
2	3	5/8 x 5	5/8 x 6	95	150
2	3 1/2	5/8 x 5 1/2	3/4 x 6 1/2	95	150
2 7/16	3	5/8 x 5	5/8 x 6	95	150
2 7/16	3 1/2	5/8 x 5 1/2	5/8 x 6 1/2	95	150
2 7/16	4	5/8 x 6	5/8 x 7	95	150
3	3 1/2	3/4 x 5 1/2	3/4 x 6 1/2	130	260
3	4	3/4 x 6	3/4 x 7	130	260
3	5	3/4 x 7	3/4 x 8	130	260

Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

Abrazaderas de sujeción

Las abrazaderas de sujeción mantienen el sello y la hermeticidad entre el canal de transporte y la cubierta. Se pueden utilizar abrazaderas de muelle, ya que son las más comunes para cubiertas planas.

Selección del motor y caja reductora

Al tener una potencia mínima requerida de 1,7 W la cual es muy pequeña debido a que el material transportado no es de alta densidad, se recomienda para evitar problemas de aglomeramiento el uso de pellets o pequeñas muestras de biomasa previamente compactada. El torque que se requiere para transmitir la fuerza al eje es de 330,4 Nm lo cual está directamente relacionado con el bajo número de revoluciones que el eje requiere.

La marca Motovario presenta una serie de alternativas para la selección de motor y caja reductora que se puedan acoplar a las necesidades de diseño.

La primera opción esta presentada por motoreductores de tornillo sin fin de baja potencia según muestra la Figura 22.



Tamaños / Sizes:	040-050-063-075 090-110
M ₂ max (1400 rpm):	1.189 Nm
Relación de reducción / Ratio:	22,1 ÷ 1.083
Potencias / Power:	hasta / up to 1,85 kW
Certificaciones / Certifications:	ATEX 2GD/3GD

Figura 22. Motoreductores de tornillo sinfín con pre-reductor. Fuente:

<http://www.motovario.com/spa/productos/reductores-de-tornillo-sin-fin--serie-vsf/reductores-de-tornillo-sin-fin-combinados-y-con-pre-reductor>

Estos motoreductores se acoplan a motores de potencia máxima de 1,85kW y pueden llegar a dar un torque máximo de 1189 Nm lo cual cubre satisfactoriamente los requisitos del sistema de alimentación, pero la desventaja se presenta en que no puede haber un control o regulación de velocidad en caso de utilizar otro tipo de material de mayor densidad o peso. Por lo que la alternativa ideal es utilizar un sistema de reducción con variador, para poder controlar tanto la velocidad como el torque necesario para mover el tornillo helicoidal.

Las versiones de aluminio VHA, con diseño compacto, están disponibles con variadores para tener un mejor control de la velocidad de alimentación del material transportado, según muestra la Figura 23.

**VHA****aluminio** *aluminum***Motovariorreductores***Motovariator-gear reducers*

Tamaños / <i>Sizes</i> :	TXF+A30-A40 A50-A60
M_2 max (1400 rpm):	480 Nm
Relación de reducción / <i>Ratio</i> :	0,8 ÷ 1.500
Potencias / <i>Power</i> :	hasta / <i>up to</i> 2,2 kW

Figura 23. Motovariadores con reductor de engranes. Fuente:



<http://www.motovario.com/spa/productos/motovariadores--serie-var/motovariorreductores--serie-aluminio>

Para el torque tan alto que requiere el eje de transmisión y la necesidad de tener un control de la velocidad de alimentación, este tipo de motovariadores con reducción de engranes son muy útiles y presentan una relación de reducción de hasta 1500 con un torque máximo de 480 Nm lo cual garantiza el correcto funcionamiento del sistema de alimentación de acuerdo a los parámetros de diseño.

El tipo de reducción para la serie VHA se obtiene de la Tabla 31.

Tabla 31. *Motovariadores serie VHA.*

0,15 kW

n2 (a) [1/min]	n2 (b) [1/min]	M2 (a) [Nm]	M2 (b) [Nm]	M2 max [Nm]	f.s. (a)	f.s. (b)	i			Fr2 [N]
390,8	75,3	3,0	5,6	25	8,7	4,6	1,45	VH002 A41	63C6	1000
192,2	37,0	6,0	11,4	25	4,3	2,3	2,94	VH002 A41	63C6	1000
119,2	22,9	9,7	18,4	30	3,2	1,7	4,75	VH002 A41	63C6	1000
105,2	20,3	10,8	20,7	80	7,5	4,0	5,38	VH002 A32	63C6	2000
103,8	20,0	11,1	21,2	30	2,8	1,5	5,45	VH002 A41	63C6	1000
86,8	16,7	13,1	25,0	80	6,2	3,3	6,52	VH002 A32	63C6	2000
71,9	13,8	16,0	30,6	25	1,6	0,8	7,88	VH002 A41	63C6	1000
69,8	13,4	16,4	31,1	75	4,7	2,5	8,11	VH002 A32	63C6	2000
51,8	10,0	22,0	42,0	90	4,2	2,2	10,94	VH002 A32	63C6	2000
42,7	8,2	26,7	50,9	80	3,1	1,6	13,25	VH002 A32	63C6	2000
34,3	6,6	33,2	63,3	80	2,5	1,3	16,49	VH002 A32	63C6	2000
27,9	5,4	40,8	77,8	90	2,3	1,2	20,26	VH002 A32	63C6	2000
23,1	4,4	49,5	94,3	85	1,8	0,9	24,55	VH002 A32	63C6	2000
18,5	3,6	61,6	117,3	140	2,3	1,2	30,55	VH002 A42	63C6	4300
16,0	3,1	71,4	136,1	150	2,1	1,1	35,44	VH002 A42	63C6	4300
12,8	2,5	88,9	169,3	140	1,6	0,8	44,10	VH002 A42	63C6	4300
11,4	2,2	98,3	187,2	300	3,1	1,6	49,80	VH002 A53	63C6	6000
9,4	1,8	118,9	226,5	300	2,5	1,3	60,25	VH002 A53	63C6	6000
7,6	1,5	147,8	281,5	300	2,0	1,1	74,88	VH002 A53	63C6	6000
6,4	1,2	173,7	330,9	300	1,7	0,9	88,02	VH002 A53	63C6	6000
5,1	1,0	220,3	419,6	480	2,2	1,1	111,61	VH002 A63	63C6	8000
4,1	0,8	273,8	521,6	480	1,8	0,9	138,71	VH002 A63	63C6	8000

Fuente: <http://www.motovario.com/spa/productos/motovariadores--serie-var/motovariarreductores--serie-aluminio>

Dónde:

P , Potencia (kW)

M , Momento torsor (Nm)

n , Número de revoluciones (rpm)

i , Relación de reducción

$f.s.$, Factor de servicio

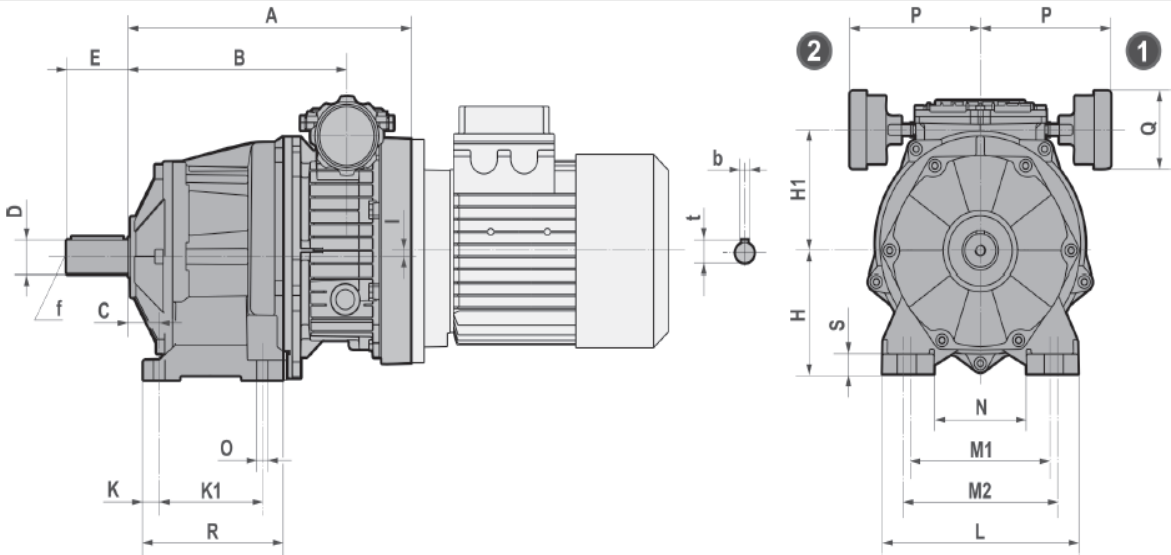
I , Eje de entrada

2, Eje de salida

Se selecciona un motovariador modelo VH002 A63 el cual puede variar la velocidad máxima de 5.1 rpm hasta una velocidad mínima de 1 rpm, entregando hasta un torque máximo de 480 Nm.

Las dimensiones del equipo presentadas por la marca motovario de acuerdo al modelo seleccionado se muestran en la Tabla 32.

Tabla 32. Dimensiones del motovariador.



	A	B	C	D j6	E	H	H1	I	K	K1	L	M1
002/063/A32	202	159,5	18	20 (16) (14)	40 (40) (30)	75	79	10	13	80	145	110
002/063/A33	255	212,5	18	20 (16) (14)	40 (40) (30)	75	79	10	13	80	145	110
002/063/A42	209	166,5	25	25 (19)	50 (40)	80	79	10	13	85	145	110
002/063/A53	302,5	260	30	30 (35) (24)	60 (70) (50)	110	74,5	5,5	15,5	100	190	135
002/063/A63	311,5	269	35	40 (28)	80 (60)	120	84,5	15,5	20	110	230	170
005/071/A32	212	165,5	18	20 (16) (14)	40 (40) (30)	75	92	10	13	80	145	110
005/071/A42	219	172,5	25	25 (19)	50 (40)	80	92	10	13	85	145	110

Fuente: <http://www.motovario.com/spa/productos/motovariadores--serie-var/motovariarredutores--serie-aluminio>

La marca Motovario tiene motores eléctricos en un campo de potencia de 0,09 kW a 90 kW. De acuerdo a la Tabla 30 el motovariador con caja reductora debe ser acoplado a un motor eléctrico de 0,15kW.

Diseño térmico del gasificador tipo updraft

Para el diseño térmico del reactor se debe tomar en cuenta la radiación de los gases en el gasificador, los coeficientes de transferencia de calor por conducción para aislar la temperatura, el número de Reynolds de los principales gases y el coeficiente global de transferencia de calor para determinar la pérdida de calor en el reactor.

Un diagrama de temperatura de todas las reacciones ocurridas dentro del gasificador se ve representado por la Figura 24:

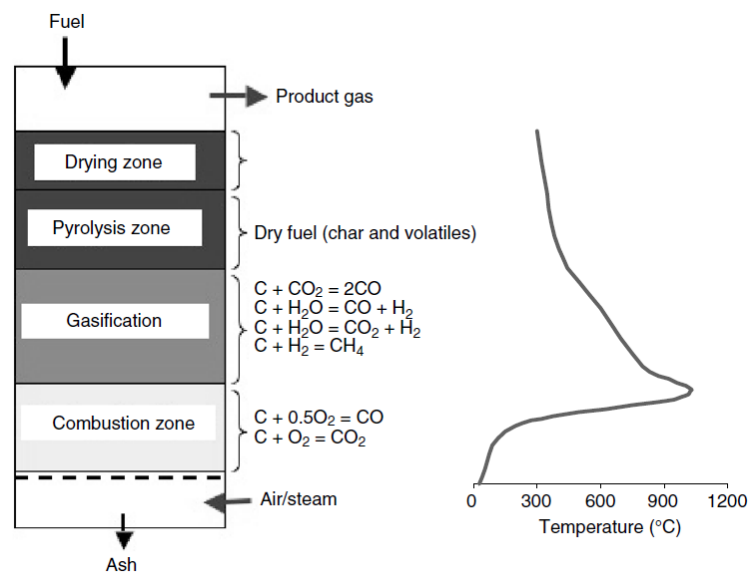


Figura 24. Etapas de gasificación en un reactor tipo updraft. Fuente: Basu (2010).

Las principales temperaturas dentro del gasificador en base a la Figura 24 son:

1. Inicio: 25 °C
2. Secado: 300 °C
3. Pirolisis: 500 °C
4. Gasificación: 800 °C
5. Combustión: 1100 °C

Bajo condiciones de funcionamiento reales, la máxima temperatura que podría darse dentro del proceso de gasificación es de 900 °C.

Determinación de los coeficientes de transferencia de calor por conducción

Para poder aislar térmicamente la cámara de combustión y gasificación del reactor se debe conocer la conductividad térmica de cada uno de los materiales que servirán para aislar térmicamente al reactor, asegurando una temperatura de contacto que no produzca quemaduras con la piel.

Plancha de acero AISI 1010

$$k_{\text{acero}} := 63.9 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$t_{\text{acero}} := 4 \text{ mm}$$

Cemento cruzite castable

Cemento refractario convencional para temperaturas de hasta 3.200 °F (1.760 °C). Es un material de alto contenido de alúmina (76%) y resiste muy elevadas temperaturas. Tiene una densidad de 2.530 kg/m³. Por cada saco de 100 libras, se usa 1 galón de agua para la mezcla. Fuente: <http://www.refractarioslauruca.com/matfibceralttemais.htm>

$$\varepsilon_{\text{cemento}} := 0.40$$

$$k_{\text{cemento}} := 1.8 \frac{W}{m \cdot K}$$

Fibra cerámica STD

Tiene una densidad de 128 kg/m³, con espesores que van desde 1" hasta 2" por 7,62 metros de largo. El factor k es = 0,053 W/m.K. Fuente:

<http://www.refractarioslauruca.com/matfibceralttemais.htm>

$$k_{fc} := 0.053 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$t_{fc} := 3 \text{ in} = 76.2 \text{ mm}$$

Fibra de vidrio AW

Rollos de lana de fibra de vidrio que vienen en 1" y 1 ½" de espesor por 15,24 metros de largo. Si se desea mayor espesor se pueden colocar dos o tres rollos de acuerdo a la necesidad. Esta fibra resiste temperaturas de hasta 540 °C (1.000 °F). El factor k es 0,039 W/m.K. Fuente: <http://www.refractarioslauruca.com/matfibceralttemais.htm>

$$k_{fv} := 0.039 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$t_{fv} := 3 \text{ in} = 76.2 \text{ mm}$$

Dónde:

k , Conductividad térmica del material (W/m.K)

ε , Emisividad de la superficie receptora

t , Espesor del material de aislamiento (mm)

fc , Subíndice fibra cerámica

fv , Subíndice fibra de vidrio

Coefficiente de transferencia de calor por convección interna

Se debe determinar el coeficiente total de transferencia de calor por convección térmica interna producido por los gases, así como el coeficiente de convección externa generado por el viento.

Tabla 33. *Propiedades de los gases a presión atmosférica.*

T (K)	ρ (kg/m ³)	Cp (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^7$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
298	1.1707	1.0069	183.6	15.712	26.14	22.236	0.707
Dióxido de carbono (CO ₂)							
800	0.6614	1.17	337	51.0	55.1	71.2	0.716
Monóxido de carbono (CO)							
800	0.42095	1.14	343	81.5	55.5	116	0.705
Hidrogeno (H ₂)							
800	0.03030	14.7	172.4	569	378	849	0.670
Oxigeno (O ₂)							
800	0.4810	1.054	415.2	86.32	58.9	116	0.745
Vapor de agua (H ₂ O)							
800	0.2739	2.152	278.6	101.7	59.2	100	1.01

Fuente: Incropera (1999).

Numero de Reynolds

El número de Reynolds es una propiedad de los fluidos y gases, para determinar si el flujo es laminar o turbulento y si se encuentra completamente desarrollado. Para flujo interno se utiliza la ecuación 68.

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (68)$$

Dónde:

 Re_D , Numero de Reynolds en tubos circulares \dot{m} , Flujo de masa (kg/s) D , Diámetro interno del recipiente (m) μ , Viscosidad dinámica del fluido (N.s/m²) Q , Flujo volumétrico del blower (Tabla 16)

Datos:

$$Q := 2.2 \cdot \frac{m^3}{min}$$

$$m := Q \cdot \rho_{AIRE} = 0.043 \frac{kg}{s}$$

Desarrollo:

Tabla 34. *Numero de Reynolds para los distintos gases.*

Aire	$8.466 \cdot 10^{-11}$
Dióxido de carbono (CO ₂)	$4.613 \cdot 10^{-11}$
Monóxido de carbono (CO)	$4.532 \cdot 10^{-11}$
Hidrogeno (H ₂)	$9.016 \cdot 10^{-11}$
Oxigeno (O ₂)	$3.744 \cdot 10^{-11}$
Vapor de agua (H ₂ O)	$5.591 \cdot 10^{-11}$

Al tener un flujo másico del agente gasificante (aire) demasiado bajo, el número de Reynolds para los distintos gases que se forman es bajo también, por lo que no se entra en el régimen turbulento.

Numero de Nusselt

Se determina por medio de la ecuación 69

$$N_{UD} = \frac{h \cdot D}{k} = 0.664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (69)$$

Dónde:

N_{UD} , Numero de Nusselt

Pr , Numero de Prandtl

h , Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m².K)

Despejando la ecuación 69 se tiene que:

$$h = \frac{0.664 * Re^{1/2} * Pr^{1/3} * k}{D}$$

Desarrollo:

Tabla 35. *Coeficiente de convección para los distintos gases.*

Fluido	h (W/m ² .K)
Aire	0.4
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.625
Monóxido de carbono (CO)	0.621
Hidrogeno (H ₂)	5.865
Oxigeno (O ₂)	0.61
Vapor de agua (H ₂ O)	0.829
Total	8.95

Radio crítico y espesor de aislamiento

El radio crítico permite determinar el espesor mínimo requerido para el material que entra en contacto directo con los gases y altas temperaturas dentro del reactor. Se calcula con la ecuación 70.

$$R_c = \frac{k}{h} \quad (70)$$

Dónde:

R_c , Radio crítico de aislamiento (mm)

t_c , Espesor mínimo de aislamiento (mm)

Desarrollo:

$$R_c := \frac{k_{\text{cemento}}}{h_{\text{int}}} = 201.114 \text{ mm}$$

$$t_c = 2.331 \text{ cm}$$

Un valor adecuado para el espesor que debe tener el cemento es de 2.5 mm.

Coefficiente de transferencia de calor por convección externa

Para el aire que choca con las paredes del reactor “flujo externo”. El número de Reynolds se calcula por medio de la ecuación 72.

$$Re_D = \frac{V \cdot De}{\nu} \quad (71)$$

Dónde:

V , Velocidad del viento (m/s)

ν , Viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

De , Diámetro externo (mm)

Datos:

$$V = 30 \frac{km}{hr} = 8.333 \frac{m}{s}$$

Velocidad máxima del viento en Quito. Fuente: <http://www.weather.com/>

Desarrollo:

$$Re_D = 3.545 \cdot 10^{-7}$$

El viento que choca contra las paredes del reactor es de régimen laminar ya que el número de Reynolds es menor a 1000. Para determinar el coeficiente de convección del aire se utiliza la ecuación 69.

$$h_{ext} := \frac{0.664 \cdot Re_D^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_{aire}^{\frac{1}{3}} \cdot k_{aire}}{De} = 13.774 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Determinación de la radiación de los gases

Los gases a elevadas temperaturas no son luminosos pero emiten radiaciones calóricas. De los gases comúnmente presentes en la combustión que son el O_2 y el N_2 se emiten cantidades muy pequeñas de energía radiante.

Los gases que están dentro del proceso de gasificación son el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y ciertos hidrocarburos. Se puede decir que de ellos los que contienen cantidades importantes de radiación son el CO_2 y H_2O .

Torreguitar y Weiss recomiendan el siguiente método para evaluar el calor transmitido por radiación del H_2O y CO_2 .

$$Q_{rad} = \epsilon * \alpha_r * A * (T_g - T_s) \quad (72)$$

Dónde:

α_r , Coeficiente de radiación (para el H_2O y CO_2).

A , Área de la superficie receptora.

T_g , Temperatura del gas.

T_s , Temperatura de la superficie receptora.

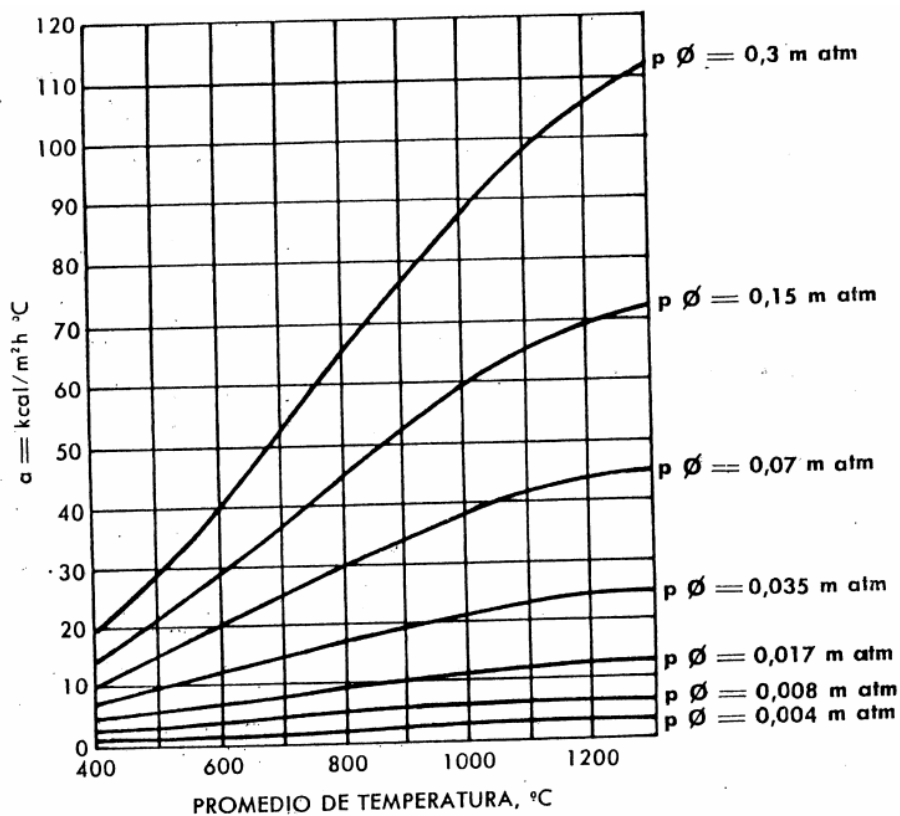


Figura 25. Coeficiente de radiación gaseosa para el vapor de agua. Fuente: Torreguilar y Weiss (1975).

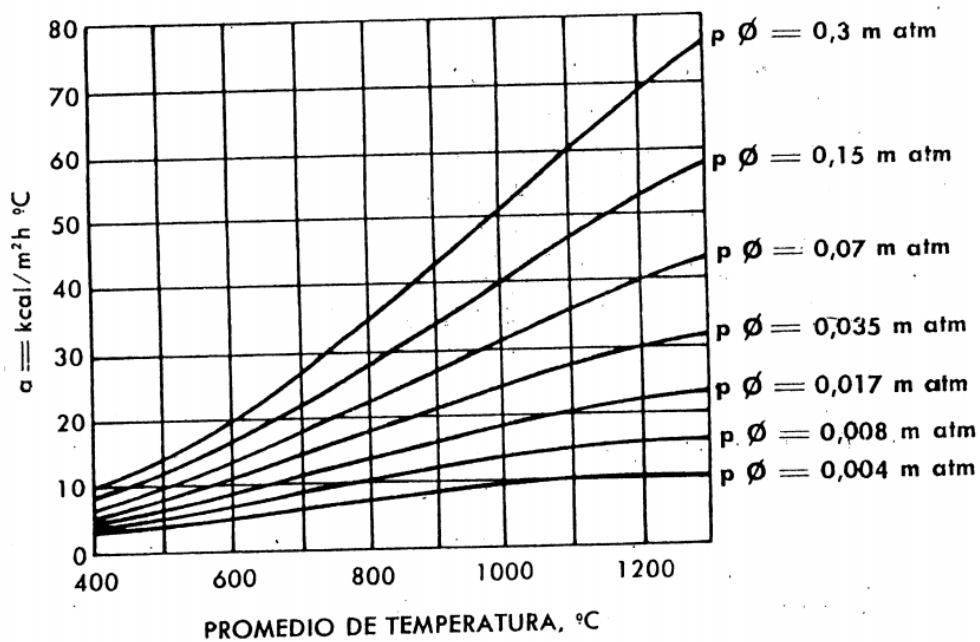


Figura 26. Coeficiente de radiación gaseosa para el anhídrido carbónico. Fuente: Torreguilar y Weiss (1975).

Datos para el cilindro:

$$R := 152.8 \text{ mm}$$

$$L = 1.067 \text{ m}$$

$$A = 1.024 \text{ m}^2$$

$$\varepsilon_{\text{cemento}} := 0.40$$

Datos para el vapor de agua:

$$\alpha_{rH_2O} := 78 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{K}} \right)$$

$$T_g = 900 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s = 850 \text{ }^\circ\text{C}$$

Datos para el anhídrido carbónico:

$$\alpha_{rCO_2} := 43 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot \text{K}} \right)$$

Desarrollo:

$$q_1 := \varepsilon_{\text{cemento}} \cdot A \cdot \alpha_{rH_2O} \cdot (T_g - T_s) = 1.858 \text{ kW}$$

$$q_2 := \varepsilon_{\text{cemento}} \cdot A \cdot \alpha_{rCO_2} \cdot (T_g - T_s) = 1.024 \text{ kW}$$

$$q_{\text{rad}} := q_1 + q_2 = 2.883 \text{ kW}$$

El calor total transferido por la radiación de los gases es de 2.883 kW.

Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor debe ser el menor posible, para de esta manera aprovechar al máximo el calor disponible dentro del gasificador y limitar el flujo de calor a través de las paredes de la cámara de combustión. El diagrama global del sistema se observa en la siguiente figura:



Figura 30. Diagrama global de resistencia térmica

Dónde:

R_1 , Convección por gases

R_2 , Conductividad del cemento refractario

R_3 , Conductividad del acero AISI 1010

R_4 , Conductividad de la fibra cerámica

R_5 , Conductividad de la fibra de vidrio

R_6 , Convección del aire

El coeficiente global de transferencia de calor se determina por medio de la siguiente fórmula:

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6} \quad (73)$$

Resistencia térmica por convección de los gases

$$R_1 = \frac{l}{h_{int}}$$

Resistencia térmica del cemento refractario

$$r_1 := r_2 - t_c = 152.8 \text{ mm}$$

$$R_2 = \frac{r_1}{k_{\text{cemento}}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Resistencia térmica del acero AISI 1010

$$r_2 := 177.8 \text{ mm}$$

$$r_3 := r_2 + t_{\text{acero}} = 181.8 \text{ mm}$$

$$R_3 = \frac{r_1}{k_{\text{acero}}} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)$$

Resistencia térmica de la fibra cerámica

$$r_4 := r_3 + t_{fc} = 258 \text{ mm}$$

$$R_4 = \frac{r_1}{k_{fc}} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)$$

Resistencia térmica de la fibra de vidrio

$$r_5 := r_4 + t_{fv} = 334.2 \text{ mm}$$

$$R_5 = \frac{r_1}{k_{fv}} \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)$$

Resistencia térmica por convección del aire

$$R_6 = \frac{r_1}{r_5} \times \frac{1}{h_{\text{ext}}}$$

Desarrollo:

$$U := \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{int}}} + \left(\frac{r_1}{k_{\text{cemento}}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right) + \left(\frac{r_1}{k_{\text{acero}}} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right) + \left(\frac{r_1}{k_{fc}} \cdot \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \right) + \left(\frac{r_1}{k_{fv}} \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right) \right) + \left(\frac{r_1}{r_5} \cdot \frac{1}{h_{\text{ext}}} \right)}$$

$$U = 0.459 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

La transferencia de calor del sistema de aislamiento térmico se determina por medio de la ecuación 74.

$$q_{cil} := U \cdot A \cdot (T_s - T_{amb}) \quad (74)$$

$$q_{cil} = 0.387 \text{ kW}$$

Calor que se disipa en el gasificador

El calor que se disipa en el gasificador es la energía que se pierde por la transferencia de calor tanto por radiación, como por conducción y convección. Este se determina por medio de la ecuación 75.

$$q := q_{cil} + q_{rad} \quad (75)$$

$$q = 3.27 \text{ kW}$$

El calor útil en el gasificador es entonces la diferencia entre la energía térmica total y las pérdidas por transferencia de calor. Se determina por medio de la ecuación 77.

$$q_T := LHV_d \cdot M_f \quad (76)$$

$$q_U := q_T - q \quad (77)$$

Dónde:

q_T , Energía térmica total (kW).

q , Energía que se disipa por transferencia de calor (kW).

q_U , Calor útil (kW).

n_g , Eficiencia del gasificador.

Desarrollo:

$$q_T = 36.517 \text{ kW}$$

$$q_U = 33.247 \text{ kW}$$

$$n_g := \frac{q_U}{q_T} \cdot 100$$

$$n_g = 91.05$$

Al tener una eficiencia del 91% en el reactor, se entiende que las pérdidas de energía por transferencia de calor representan el 9%.

El análisis físico - químico indica que la energía máxima generada por combustión en el gasificador puede llegar a los 131.2 MJ. Pero la energía térmica aprovechable para el gasificador es de 33.247 kW “kilovatios térmicos” debido a las pérdidas de calor.

Resultados

Los resultados obtenidos del estudio del gasificador se presentan para cada una de las etapas de diseño, detallando los parámetros más relevantes de cada una de ellas.

Resultados del diseño físico - químico del reactor

Tabla 36. *Resultados de la combustión*

Compuesto	Masa (kg)	Número de Moles	Tipo
$C_6H_{10}O_5$	10	61.728	Combustible
O_2	11.852	370.37	Comburente
N_2	38.993		Inerte
CO_2	16.296	370.37	Producto
H_2O	5.556	308.642	Producto

Para que se genere la combustión se necesita de 3 factores importantes que son el aire, combustible y la fricción; ya que si faltase uno de los componentes, la reacción no podría iniciarse. Por ello se puede encender el gasificador con carbón vegetal, para dar la llama de inicio al proceso.

Tabla 37. *Resultados de la reacción global de gasificación*

Compuesto	Masa (kg)	Número de Moles	Tipo
$C_6H_{10}O_5$	10	61.728	Reactante
O_2	1.975	61.728	Reactante
C	0.741	61.728	Producto
H_2	0.37	185.185	Producto

Tabla 37. *Continuación*

Compuesto	Masa (kg)	Número de Moles	Tipo
CO	1.728	61.728	Producto
CO ₂	8.148	185.185	Producto
CH ₄	0.988	61.728	Producto
H ₂ O	1	55.556	Vapor
N ₂	7.427	256.256	Inerte

De la reacción global de gasificación se comprueba que tanto la cantidad de los reactantes que ingresan, es la misma cantidad de productos que se generan. El número de moles de cada uno de los reactantes y productos son utilizadas para determinar las velocidades de conversión de cada uno de los compuestos.

Tabla 38. *Resultados de las distintas reacciones de gasificación (800°C)*

Reacción	ΔH_T^0 (kJ/mol)	S_T^0 (J/K* mol)	ΔG_T^0 (kJ/mol)	K
R1	189	192.197	-17.26	$2.085 \cdot 10^{-7}$
R2	196.9	232.485	-52.6	$3.773 \cdot 10^{-8}$
R9	-39.45	80.918	-0.58	1

Las reacciones R1 y R2 tienen una entalpia positiva ya que son reacciones endotérmicas donde se produce una cantidad considerable de energía a diferencia de la reacción R9 que es exotérmica. Todas estas reacciones describen lo ocurrido dentro del proceso de gasificación y la energía que se produce en cada una de ellas.

Tabla 39. *Resultados finales del diseño físico-químico del gasificador*

Propiedad	Valor	Unidades
Velocidad Alimentación	0.017	mol/s
Velocidad global de reacción	0.134	mol/s
Densidad real de la cascarilla	108	kg/m ³
Volumen del reactor	0.103	m ³
Temperatura de salida	300	°C
Flujo de salida de los gases	0.003	m ³ /s
Calor de combustión	131.2	MJ

Es importante recalcar de esta tabla que el flujo de salida de los gases depende del flujo de aire que ingresa y la velocidad aumentará, a medida que aumente la capacidad del gasificador.

La velocidad global de reacción es un parámetro que determina cuantas moles por segundo se gasifican en un reactor de flujo continuo; es decir que depende en gran parte de la velocidad de alimentación.

Resultados del diseño mecánico del reactor

Tabla 40. *Resultados finales del diseño mecánico del gasificador*

Propiedad	Valor	Unidades
Presión de operación	14.696	psi
Presión de diseño	44.696	psi
Factor de corrosión (CA)	3	mm
Espesor de las tapas	5	mm
Espesor del cuerpo del reactor	4	mm
Flujo volumétrico de aire a la entrada	2.2	m ³ /min

(Continúa)

Tabla 40. *Continuación*

Propiedad	Valor	Unidades
Potencia del motor	0.15	kW
Relación de reducción	111.61	
Factor de servicio (f.s)	2.2	
Torque (mín.)	220.3	Nm
Torque (máx.)	480	Nm
Velocidad del transportador	3	rpm

Tabla 41. *Materiales utilizados para el reactor*

Función	Material	Norma
Cuerpo del cilindro	Acero laminado en frío	AISI 1010
Tapa del cilindro	Acero laminado en frío	AISI 1010
Eje de transmisión	Acero de transmisión	AISI 1018
Tornillo helicoidal	Acero laminado en caliente	AISI 1010
Eje tubular del helicoidal	Tubo de acero SCH 40	ASTM A513
Cubierta plana	Acero galvanizado	ASTM A653
Canal de alimentación	Acero galvanizado	ASTM A653
Tubería de ingreso de aire	Tubería sin costura SCH 40	ASTM A53 GR B
Tubería de salida de gases	Tubería sin costura SCH 40	ASTM A53 GR B

El acero AISI 1010 laminado en frío tiene gran resistencia a la tracción y a las altas temperaturas; pero su selección se debe al bajo costo y a su alta disponibilidad en el mercado.

El ASTM A513 se utiliza para tubería mecánica estructural debido a sus buenas propiedades mecánicas como son alta resistencia, fácil soldadura y disponibilidad en el mercado.

Para las cubiertas un acero galvanizado garantiza resistencia a la corrosión, ya que está en contacto directo con la humedad del ambiente, así como de la biomasa que es transportada hacia el gasificador.

Y finalmente para la salida de los gases del reactor, se selecciona tubería negra sin costura ASTM A53 que es idónea para la conducción de fluidos o gases a altas temperaturas.

Resultados del diseño térmico del reactor

Tabla 42. *Resultados finales del diseño térmico del gasificador*

Propiedad	Valor	Unidades
Calor transferido por radiación de los gases	2.883	kW
Coefficiente de convección (gases)	8.95	W/m ² K
Coefficiente de convección (aire)	13.774	W/m ² K
Espesor del cemento refractario	25	mm
Espesor del cilindro	4	mm
Espesor de la fibra cerámica	76.2	mm
Espesor de la fibra de vidrio	76.2	mm
Coefficiente global de transferencia de calor	0.459	W/m ² K
Calor disipado	3.27	kW
Calor útil	33.247	kW
Eficiencia	91	%

Tabla 43. *Radio térmico de aislamiento y temperatura de los materiales*

Material	Radio (mm)	Temperatura (K)
Gases	0	900
Pared interna	157.8	850
Cemento Kruzite	177.8	846.14
Acero AISI 1010	181.8	846.11
Fibra cerámica STD	258	461.54
Fibra de vidrio AW	334.2	75.17
Aire	334.2	25

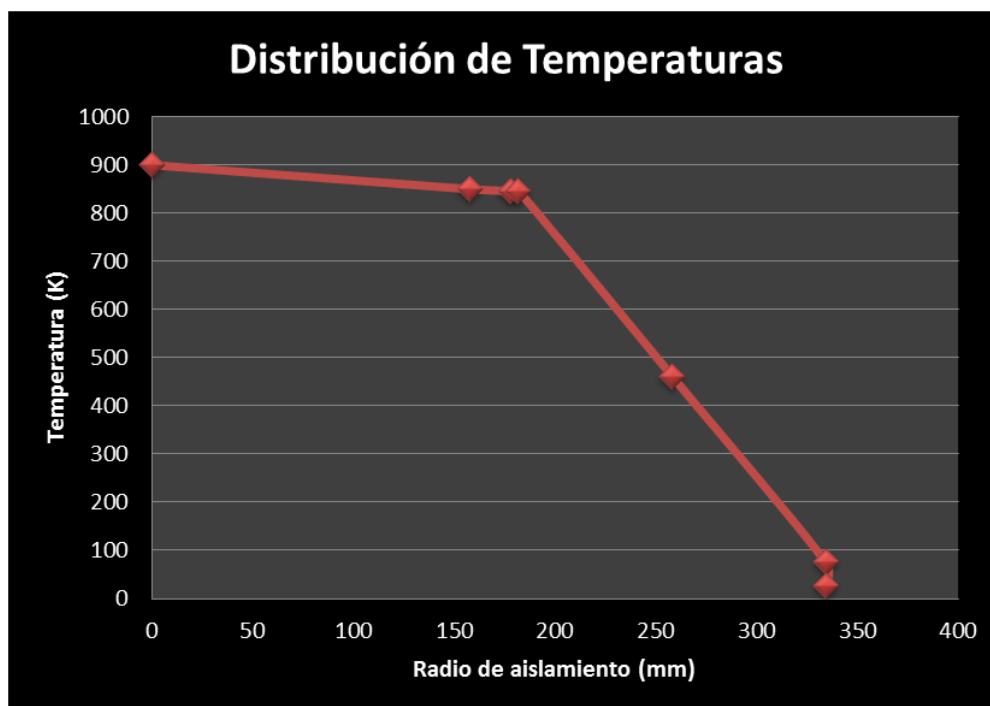


Figura 27. Distribución de temperaturas del sistema de aislamiento

Los resultados del diseño térmico indican que los materiales seleccionados como aislantes logran disipar el calor que se genera internamente en el reactor. Pero para conseguir un proceso más eficiente, se debe lograr aislar la temperatura de pared externa hasta 60 °C.

Discusión

Conclusiones

- Se utilizó como combustible cascarilla de arroz debido a su fácil obtención, excelentes propiedades físico-químicas y poder calorífico.
- Los gasificadores de biomasa no manejan altas presiones, sino temperaturas y se comprueba por medio del número de Reynolds, debido a la baja velocidad con que ingresa el agente gasificante no generará fricción ni turbulencia.
- La baja temperatura de salida de los gases en el gasificador representa una ventaja frente a otros equipos.
- Los materiales seleccionados para el gasificador son de bajo costo en el mercado
- La eficiencia del reactor es de 91%, lo cual se ajusta dentro de la categoría de los gasificadores tipo updraft, debido a que tienen eficiencias que van del 80 al 95%
- Mientras mayor contenido de humedad tenga la biomasa, menor será el poder calorífico y por tanto la energía térmica aprovechable de la misma.
- El uso que se le puede dar al gas de síntesis, producto de la gasificación es ilimitado y no corresponde al alcance de este proyecto.
- Se pueden diseñar distintos sistemas de alimentación para la biomasa que ingresa en el gasificador. Pero el sistema con transportador helicoidal, presenta ventajas respecto al control, facilidad constructiva y garantía en el funcionamiento.

Recomendaciones

- Utilizar planchas de acero inoxidable o tubería negra sin costura para el cuerpo del cilindro, ya que presentan mayor resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas.
- Seleccionar materiales de menor conductividad térmica para mejorar el sistema de aislamiento.
- Diseñar un sistema de distribución de aire para mejorar la combustión en el reactor.
- Emplear un filtro separador de partículas “ciclón” para eliminar los alquitranes que contiene el gas a la salida.
- Se puede mejorar el diseño por medio de un sistema de control con PLCs, que regule la cantidad de aire que necesita el reactor o la velocidad de ingreso del combustible, así como también para asegurar una obtención de datos más precisa de presión y temperatura.
- Se recomienda instalar un sistema de ignición de llama para poder controlar de mejor manera el proceso de combustión, en lugar de recurrir a métodos tradicionales de encendido manual por fricción.
- Para un mejor transporte y aprovechamiento energético, se recomienda el uso de pellets de biomasa, ya que su forma granular compactada y menor contenido de humedad favorecen en el rendimiento del proceso.

Anexos

Anexo A

Reacciones típicas de gasificación a 25 °C. Fuente: Basu (2010).

Reaction Type	Reaction
Carbon Reactions	
R1 (Boudouard)	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 172 \text{ kJ/mol}^1$
R2 (water-gas or steam)	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 + 131 \text{ kJ/mol}^2$
R3 (hydrogasification)	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4 - 74.8 \text{ kJ/mol}^2$
R4	$C + 0.5 O_2 \rightarrow CO - 111 \text{ kJ/mol}^1$
Oxidation Reactions	
R5	$C + O_2 \rightarrow CO_2 - 394 \text{ kJ/mol}^2$
R6	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2 - 284 \text{ kJ/mol}^4$
R7	$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O - 803 \text{ kJ/mol}^3$
R8	$H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O - 242 \text{ kJ/mol}^4$
Shift Reaction	
R9	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 - 41.2 \text{ kJ/mol}^4$
Methanation Reactions	
R10	$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2 - 247 \text{ kJ/mol}^4$
R11	$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O - 206 \text{ kJ/mol}^4$
R14	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O - 165 \text{ kJ/mol}^2$
Steam-Reforming Reactions	
R12	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 + 206 \text{ kJ/mol}^3$
R13	$CH_4 + 0.5 O_2 \rightarrow CO + 2H_2 - 36 \text{ kJ/mol}^3$

Anexo B

Descripción electrodo 7018. Fuente: Indura

INDURA 7018-RH	Clasificación AWS: E-7018 / E-4918
<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo para acero al carbono • Revestimiento bajo hidrógeno con hierro en polvo. Color gris • Toda posición 	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente continua, electrodo positivo • Certificado anualmente por American Bureau of Shipping, Lloyd's Register of Shipping, Germanischer Lloyd y Nippon Kaiji Kyokai

Descripción

El electrodo 7018-RH es de bajo contenido de hidrógeno y resistente a la humedad.

Está especialmente diseñado para soldaduras que requieren severos controles radiográficos en toda posición.

Su arco es suave y la pérdida por salpicadura es baja.

Usos

El 7018-RH es recomendado para trabajos donde se requiere alta calidad radiográfica, particularmente en calderas y cañerías.

Sus buenas propiedades físicas son ideales para ser usado en astilleros.

Aplicaciones típicas

- Aceros Cor-Ten, Mayari-R
- Lukens 45 y 50
- Yolo y otros aceros estructurales de baja aleación

Procedimiento para soldar

Para soldaduras de filetes horizontales y trabajo de soldadura en sentido vertical descendente, debe usarse un arco corto. No se recomienda la técnica de arrastre.

En la soldadura en posición sobrecabeza debe usarse un arco corto con ligero movimiento oscilatorio en la dirección de avance. Debe evitarse la oscilación brusca del electrodo.

Para mayores detalles ver página 33. Observe las recomendaciones para almacenaje de los electrodos, página 20.

Anexo C

Código de clasificación de materiales para transporte. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

CATEGORY: MATERIAL CHARACTERISTICS	CODE DESIGNATION
Density:	
Bulk Density	avg. lbs/CF
Size:	
Very Fine — 100 mesh and under	A
Fine — 1/8" mesh and under	B
Granular — 1/2" mesh and under	C
Lumpy — containing lumps over 1/2"	D
Irregular — fibrous, stringy, etc	E
Flowability:	
Very free flowing	1
Free flowing	2
Average flowability	3
Sluggish	4
Abrasiveness:	
Mildly abrasive	5
Moderately abrasive	6
Extremely abrasive	7
Other Characteristics:	
Builds up & hardens	F
Generates static electricity	G
Decomposes — deteriorates in storage	H
Flammability	J
Becomes plastic or tends to soften	K
Very dusty	L
Aerates and becomes fluid	M
Explosiveness	N
Stickiness-adhesion	O
Contaminable, affecting use	P
Degradable, affecting use	Q
Gives off harmful or toxic gas or fumes	R
Highly corrosive	S
Mildly corrosive	T
Hygroscopic	U
Interlocks, mats or agglomerates	V
Oils present	W
Packs under pressure	X
Very light and fluffy — may be windswept	Y
Elevated temperature	Z

Anexo D

Factores de capacidad para tornillos helicoidales. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>




SPECIAL SCREW PITCH CAPACITY FACTOR CF_1		
PITCH	DESCRIPTION	CF_1
Standard (full)	Pitch = Diameter of screw	1.00
Short	Pitch = $\frac{3}{4}$ Diameter of screw	1.50
Half	Pitch = $\frac{1}{2}$ Diameter of screw	2.00
Long	Pitch = $1\frac{1}{2}$ Diameter of screw	0.67

SPECIAL SCREW FLIGHT MODIFICATION CAPACITY FACTOR CF_2			
TYPE OF FLIGHT	CONVEYOR LOADING		
	15%	30%	45%
Standard	1.00	1.00	1.00
Cut	1.95	1.57	1.43
Cut & Folded	not rec.	3.75	2.54
Ribbon	1.04	1.37	1.62

SPECIAL SCREW MIXING PADDLE CAPACITY FACTOR CF_3				
STD PADDLES PER PITCH SET AT 45° REVERSE PITCH				
NONE	1	2	3	4
1.00	1.08	1.16	1.24	1.32

Anexo E

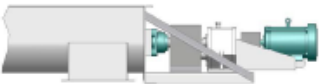
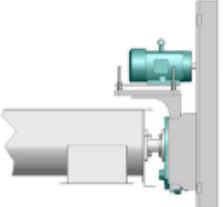
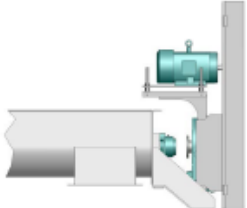
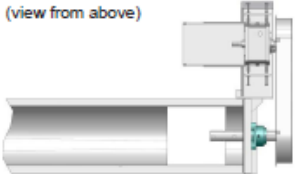
Capacidades de transporte. Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

PERCENT TROUGH LOAD	SCREW DIAMETER	MAXIMUM RECOMMENDED RPM	CAPACITY (FT ³ /HR) at MAX RPM	CAPACITY (FT ³ /HR) per RPM
15% 	6	60	45	0.8
	9	55	150	2.7
	12	50	325	6.5
	14	50	520	10.4
	16	45	700	15.6
	18	45	1,010	22.5
	20	40	1,250	31.2
	24	40	2,180	54.6
	30	30	3,152	105.0
	36	20	3,597	184.0
30% A 	6	120	180	1.5
	9	100	545	5.5
	12	90	1,160	12.9
	14	85	1,770	20.8
	16	80	2,500	31.2
	18	75	3,380	45.0
	20	70	4,370	62.5
	24	65	7,100	109.0
	30	50	10,506	210.0
	36	35	12,593	369.0
30% B 	6	60	90	1.5
	9	55	295	5.7
	12	50	646	12.9
	14	47	696	14.8
	16	44	1,382	31.4
	18	41	1,834	44.7
	20	38	2,361	62.1
	24	36	3,928	109.1
	30	27	5,673	210.0
	36	19	6,836	360.0

Anexo F

Eficiencias mecánicas (conjunto de transmisión). Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

TABLE G1*: Mechanical Efficiencies (typical complete drive arrangements)			APPROX. EFFICIENCY "e"*
Direct Coupled In-line Drive		Motor, reducer & conveyor drive shaft are mounted in-line and direct-coupled together. Typically supported by drive base attached to floor or conveyor end plate. Best configuration for longer component life of larger conveyors.	0.94
"Screw Conveyor" Drive		Reducer is mounted on trough end and has its own drive shaft which is directly connected to conveyor screw. Reducer includes integral thrust bearing and seal. Separate drive shaft, end bearing, and seal are not required. Motor is connected via V-belt and may be mounted at top, either side or below.	0.88
Shaft Mount Drive		Similar to "Screw Conveyor" drive above except bearing, seal and drive shaft are not included with reducer. Rather, reducer mounts onto extended version of standard conveyor drive shaft. This allows for use of a variety of bearings and seals.	0.88
Gear Motor Reducer or Helical Reducer with Chain & Sprockets	(view from above) 	Integral motor-reducer or scoop mount motor with chain drive to conveyor drive shaft. Usually mounted to side of trough by means of an adapter plate.	0.85

Anexo G

Eficiencias mecánicas (componentes individuales). Fuente:

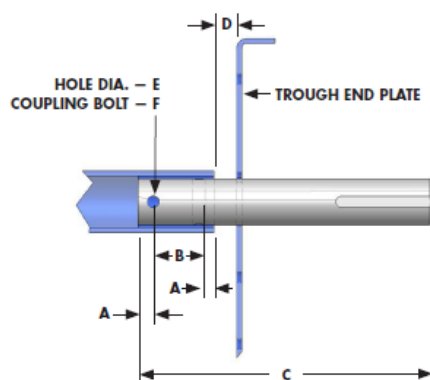
<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

TABLE G2*: Mechanical Efficiencies (individual components)	APPROX. EFFICIENCY "e"*
V-belts and Sheaves	0.94
Precision Roller Chain on Cut Tooth Sprockets, Open Guard	0.93
Precision Roller Chain on Cut Tooth Sprockets, Oil Tight Casing	0.94
Single Reduction Helical Gear Shaft Mounted Speed Reducers and Screw Conveyor Drives	0.95
Double Reduction Helical Gear Shaft Mounted Speed Reducers and Screw Conveyor Drives	0.94
Triple Reduction Helical Gear Shaft Mounted Speed Reducers and Screw Conveyor Drives	0.93
Low Ratio (up to 20:1 range) Enclosed Worm Gear Speed Reducers	0.90
Medium Ratio (20:1 to 60:1 range) Enclosed Worm Gear Speed Reducers	0.70
High Ratio (over 60:1 to 100:1 range) Enclosed Worm Gear Speed Reducers	0.50
Cut Tooth Miter or Bevel Gear, Enclosed Countershaft Box Ends	0.93
Cut Tooth Spur Gears, Enclosed, for Each Reduction	0.93
Cut Tooth Miter or Bevel Gear Open Type Countershaft Box Ends	0.90
Cut Tooth Spur Gears, Open for Each Reduction	0.90
Cast Tooth Spur Gears, Open for Each Reduction	0.85

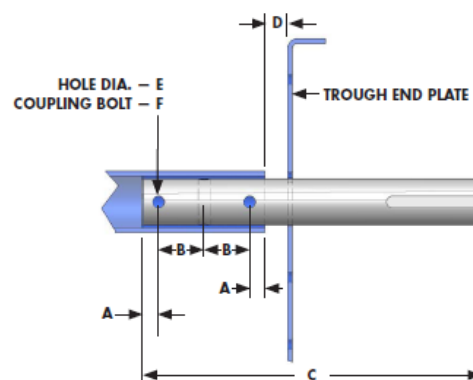
Anexo H

Acoplamiento del eje transmisor. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>



2-BOLT DRIVE SHAFT



3-BOLT DRIVE SHAFT

SHAFT DIA	2-BOLT PART #	3-BOLT PART #	A	B	KEYWAY LENGTH	KEYWAY WIDTH	KEYWAY DEPTH
1 1/2	CDS112	CDS112-3B	7/8	3	3 1/4	3/8	3/16
2	CDS2	CDS2-3B	7/8	3	4 1/2	1/2	1/4
2 7/16	CDS2716	CDS2716-3B	1 5/16	3	5 1/2	5/8	5/16
3	CDS3	CDS3-3B	1	3	6 1/4	3/4	3/8
3 7/16	CDS3716	CDS3716-3B	1 1/2	4	7 1/4	7/8	7/16
3 15/16	-	CDS31516-3B	1 3/4	4	8 5/8	1	1/2
4 7/16	-	CDS4716-3B	1 7/8	4	9 7/8	1	1/2
4 15/16	-	CDS41516-3B	2 1/4	4	9 7/8	1 1/4	5/8
5 7/16	-	CDS5716-3B	2 1/2	5	9 7/8	1 1/4	5/8

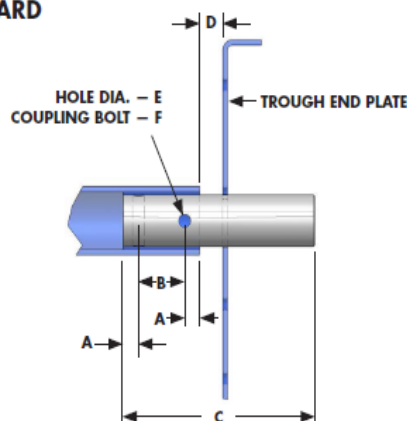
SHAFT DIA	C 2-BOLT*	C 3-BOLT*	D	E HOLE DIA	F CPLG. BOLT	2-BOLT WEIGHT	3-BOLT WEIGHT
1 1/2	14	17	1	17/32	1/2	6.8	8.2
2	15 1/4	18 1/4	1	21/32	5/8	13.0	15.5
2 7/16	17 3/4	20 3/4	1 1/2	21/32	5/8	22.7	26.5
3	19 1/4	22 1/4	1 1/2	25/32	3/4	37.3	42.9
3 7/16	23 1/4	27 1/4	2	29/32	7/8	59.1	69.1
3 15/16	-	30 1/8	2	1 3/16	1 1/8	-	99.2
4 7/16	-	32 7/8	2 1/2	1 5/16	1 1/4	-	137.8
4 15/16	-	*	2 1/2	1 9/16	1 1/2	-	*
5 7/16	-	*	3	1 13/16	1 3/4	-	*

Anexo I

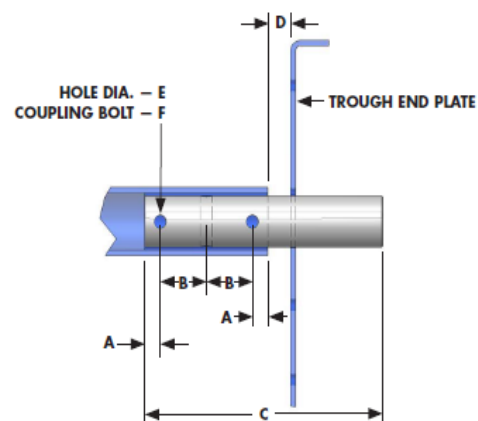
Acoplamiento del eje conducido. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

END / TAIL SHAFTS - STANDARD



2-BOLT END SHAFT



3-BOLT END SHAFT

SHAFT DIA	2-BOLT PART #	3-BOLT PART #	A	B	C 2 BOLT*	C 3 BOLT*	D	E HOLE DIA	F CPLG BOLT	2-BOLT WT	3-BOLT WT
1 1/2	CES112	CES112-3B	7/8	3	10 1/2	-	1	17/32	1/2	5.1	-
2	CES2	CES2-3B	7/8	3	10 1/2	13 1/2	1	21/32	5/8	9.0	11.5
2 7/16	CES2716	CES2716-3B	15/16	3	11 3/4	14 3/4	1 1/2	21/32	5/8	15.1	18.8
3	CES3	CES3-3B	1	3	12 1/2	15 1/2	1 1/2	25/32	3/4	24.3	29.9
3 7/16	CES3716	CES3716-3B	1 1/2	4	15 3/4	19 3/4	2	29/32	7/8	40.2	50.1
3 15/16	-	CES31516-3B	1 3/4	4	-	23 5/8	2	1 3/16	1 1/8	-	78.0
4 7/16	-	CES4716-3B	1 7/8	4	-	24 1/2	2 1/2	1 5/16	1 1/4	-	102.5
4 15/16	-	CES41516-3B	2 1/4	4	-	*	2 1/2	1 9/16	1 1/2	-	*
5 7/16	-	CES5716-3B	2 1/2	5	-	*	3	1 13/16	1 3/4	-	*

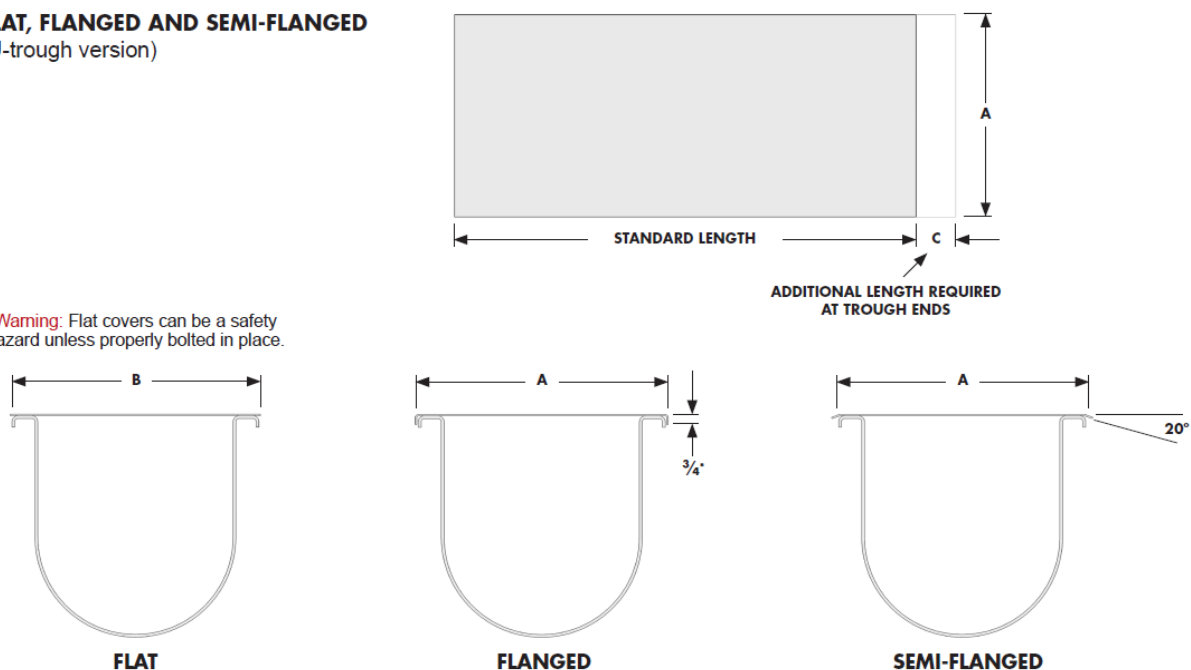
Anexo J

Cubiertas planas y con pestaña. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

FLAT, FLANGED AND SEMI-FLANGED
(U-trough version)

Warning: Flat covers can be a safety hazard unless properly bolted in place.

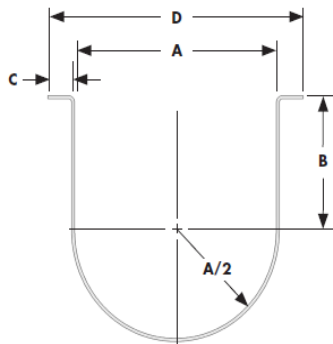


SCREW DIA	COVER THICKNESS	STD FLAT PART #	WEIGHT STD LENGTH	STD FLANGE PART #	WEIGHT STD LENGTH	SEMI-FLANGED PART #	WEIGHT STD LENGTH	A*	B	C	STD LENGTH
6	14 ga	CTC614	26	CTC614-F	31	CTC614-S	31	10 ¼	9 ⅞	1 ½	10'-0
6	12 ga	CTC612	36	CTC612-F	43	CTC612-S	43	10 ¼	9 ⅞	1 ½	10'-0
9	14 ga	CTC914	35	CTC914-F	40	CTC914-S	40	14	13 ½	1 ⅝	10'-0
9	12 ga	CTC912	49	CTC912-F	56	CTC912-S	56	14	13 ½	1 ⅝	10'-0
10	14 ga	CTC1014	38	CTC1014-F	43	CTC1014-S	43	15	14 ½	1 ¾	10'-0
10	12 ga	CTC1012	53	CTC1012-F	60	CTC1012-S	60	15	14 ½	1 ¾	10'-0
12	14 ga	CTC1214	55	CTC1214-F	61	CTC1214-S	61	17 ¾	17 ½	2	12'-0
12	12 ga	CTC1212	77	CTC1212-F	85	CTC1212-S	85	17 ¾	17 ½	2	12'-0
12	10 ga	CTC1210	99	CTC1210-F	109	CTC1210-S	109	17 ¾	17 ½	2	12'-0

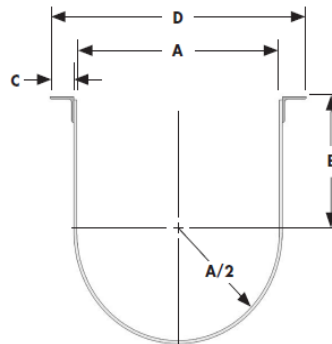
Anexo K

Canal de alimentación. Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

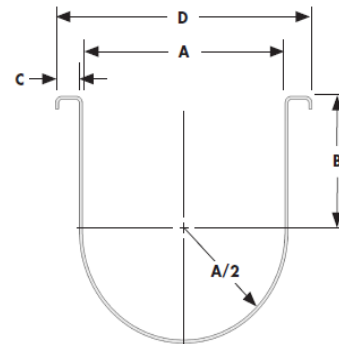
U-TROUGHS



FORMED FLANGE



ANGLE FLANGE



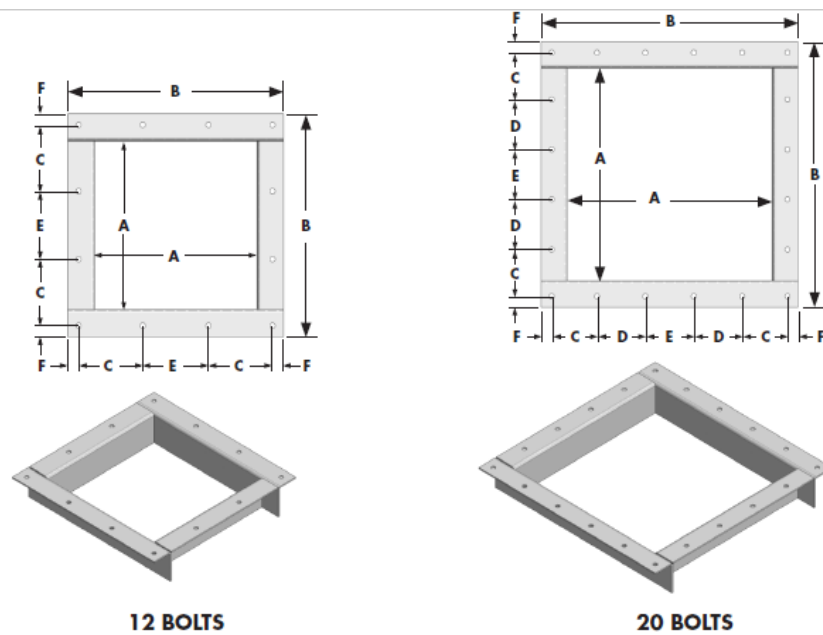
DOUBLE FORMED FLANGE

SCREW DIA	TROUGH THICKNESS	FORMED FLANGED PART #	WEIGHT STD LENGTH	ANGLE FLANGE PART #	WEIGHT STD LENGTH	DOUBLE FORMED PART #	WEIGHT STD LENGTH	A	B	C	D	STD LENGTH
6	14 ga	CTF614	62	CTA614	84	CTDF614	64	7	4 1/2	1 1/4	9 11/16	10'-0"
6	12 ga	CTF612	86	CTA612	105	CTDF612	85	7	4 1/2	1 1/4	9 3/4	10'-0"
6	10 ga	CTF610	109	CTA610	126	CTDF610	112	7	4 1/2	1 1/4	9 13/16	10'-0"
6	3/16	CTF67	163	CTA67	174	CTDF67	168	7	4 1/2	1 1/4	9 7/8	10'-0"
9	12 ga	CTF912	118	CTA912	142	CTDF912	123	10	6 1/8	1 1/2	13 1/4	10'-0"
9	10 ga	CTF910	151	CTA910	172	CTDF910	156	10	6 1/8	1 1/2	13 5/16	10'-0"
9	3/16	CTF97	226	CTA97	239	CTDF97	234	10	6 1/8	1 1/2	13 3/8	10'-0"

Anexo L

Alimentación estándar para canales en U. Fuente:

<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

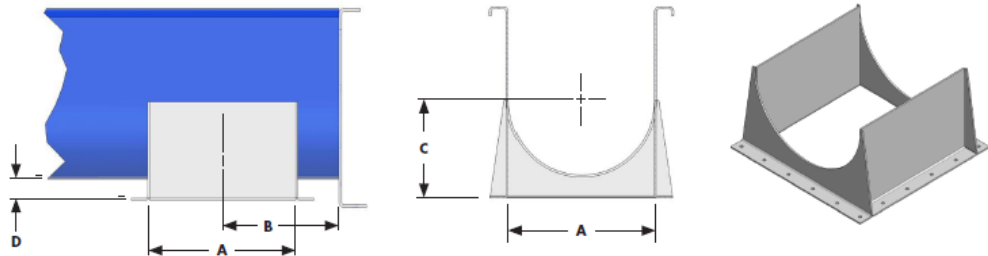
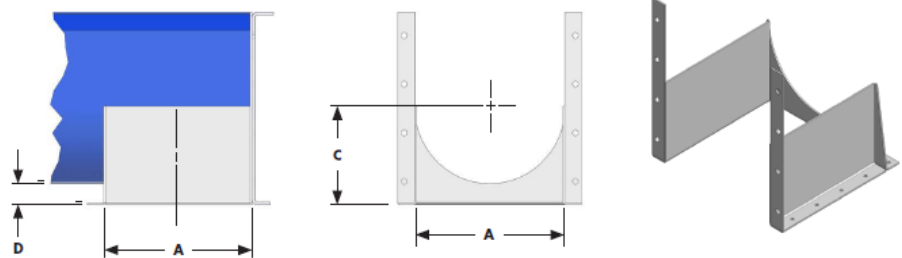


SIZE	INLET PART #	DISCH. PART #	A	B	C	D	E	F	HEIGHT	THICKNESS	# HOLES	BOLT DIA	STD WT
6	CI6	CSD6	7	10	2 13/16	-	3	1 1/16	3	12 ga	12	3/8	4.3
9	CI9	CSD9	10	13	4	-	4	1 1/2	3	10 ga	12	3/8	7.4
10	CI10	CSD10	11	14 1/4	4 5/16	-	4 3/8	5/8	3	10 ga	12	3/8	8.3
12	CI12	CSD12	13	17 1/4	5 1/8	-	5 1/4	7/8	3	10 ga	12	3/8	11.2
14	CI14	CSD14	15	19 1/4	3 1/2	3 1/2	3 1/2	7/8	3	10 ga	20	3/8	12.6
16	CI16	CSD16	17	21 1/4	3 3/4	4	4	7/8	3	10 ga	20	3/8	14.1
18	CI18	CSD18	19	24 1/4	4 7/16	4 3/8	4 3/8	1 1/8	3	10 ga	20	1/2	17.5

Anexo M

Descarga estándar para canales en U. Fuente:

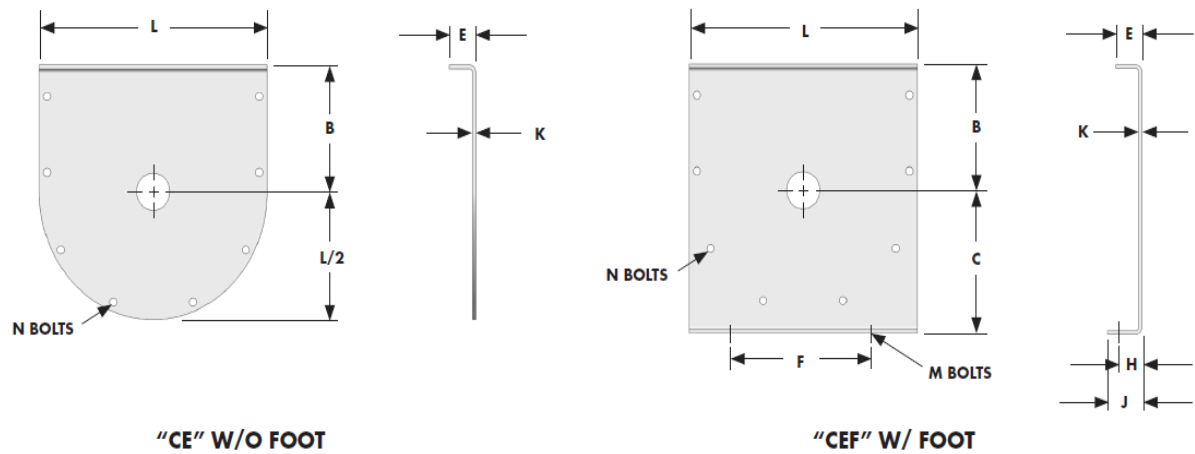
<http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>

STD. DISCHARGE**FLUSH END DISCHARGE**

SCREW SIZE	STANDARD PART #	FLUSH END PART #	DISCHARGE THICKNESS	A	B (MIN)	C	TROUGH THICKNESS	D	STD. WEIGHT	FLUSH END WEIGHT
6	CSD612	CSD612-F	12 ga	7	6	5	12 ga 10 ga	1 3/8 1 3/8	6.1	5.9
9	CSD910	CSD910-F	10 ga	10	8	7 1/8	12 ga 10 ga	2 2	10.9	14.6
9	CSD97	CSD97-F	3/16	10	8	7 1/8	3/16	1 15/16	14.9	13.7

Anexo N

Placas para canales en U. Fuente: <http://www.conveyoreng.com/products/standard-screw-conveyors/>



SIZE	SHAFT DIA	PART # (W/O FOOT)	PART # (W/ FOOT)	B	C	E	F	H	J	K	L	M (BOLT)	N (BOLT)	"CE" WT	"CEF" WT
6	1 1/2	CE6112	CEF6112	4 1/2	5 5/8	1 1/2	8 1/8	1	1 3/4	3/8	9 7/8	3/8	3/8	5	7
9	1 1/2	CE9112	CEF9112	6 1/8	7 7/8	1 5/8	9 3/8	1 1/2	2 5/8	1/4	13 1/2	1/2	3/8	12	17
9	2	CE92	CEF92	6 1/8	7 7/8	1 5/8	9 3/8	1 1/2	2 5/8	1/4	13 1/2	1/2	3/8	12	17
10	1 1/2	CE10112	CEF10112	6 3/8	8 7/8	1 3/4	9 1/2	1 3/4	2 7/8	1/4	14 1/2	1/2	3/8	14	20
10	2	CE102	CEF102	6 3/8	8 7/8	1 3/4	9 1/2	1 3/4	2 7/8	1/4	14 1/2	1/2	3/8	14	20
12	2	CE122	CEF122	7 3/4	9 5/8	2	12 1/4	1 5/8	2 3/4	1/4	17 1/2	5/8	1/2	20	26

Anexo O

Planchas laminadas en frío AISI 1010. Fuente: DIPAC.

**PLANCHAS
LAMINADAS AL FRIO**

Especificaciones Generales

Norma	ASTM A366 JIS 3141 SPCC SAE 1008 SAE 1010
Espesores	0,40 a 1,90
Rollos	X 1219
Planchas	4 X 8 y medidas especiales



CALIDAD	DESIGNACION	CARBON	MANGANESO	FOSFORO	AZUFRE	ALUMINIO
Calidad Comercial	CS TIPO A	0,10	0,8	0,03	0,035	
	CS TIPO B	0,02 a 0,15	0,8	0,03	0,035	
	CS TIPO C	0,08	0,8	0,10	0,035	
Embutido leve	FS TIPO A	0,10	0,5	0,02	0,035	
	FS TIPO B	0,02 to 0,10	0,5	0,02	0,030	
Embutido profundo	DDS	0,06	0,5	0,02	0,025	0,01
	EDDS	0,02	0,4	0,02	0,020	0,01
Estructural SS Grd	30 (230)	0,20		0,040	0,040	
	37 (255)	0,20		0,10	0,040	
	40(275)	0,25		0,10	0,040	
	50(340)	0,40		0,20	0,040	
	50(340)	0,50		0,040	0,040	
	80 (550)	0,20		0,040	0,040	

Anexo P

Eje de transmisión AISI 1018. Fuente: SUMITEC S.A.

ACERO AISI-SAE 1018 (UNS G10180)

1. Descripción: este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

2. Normas involucradas: ASTM A 108

3. Propiedades mecánicas: Dureza 126 HB (71 HRb)
Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53700 PSI)
Esfuerzo máximo 440 MPa (63800 PSI)
Elongación máxima 15% (en 50 mm)
Reducción de área 40%
Modulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)
Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.15 – 0.20 % C
0.60 – 0.90 % Mn
0.04 % P máx
0.05 % S máx

6. Usos: se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina

Anexo Q

Eje tubular del helicoidal ASTM A513. Fuente: DIPAC.

TUBO MECANICO REDONDO

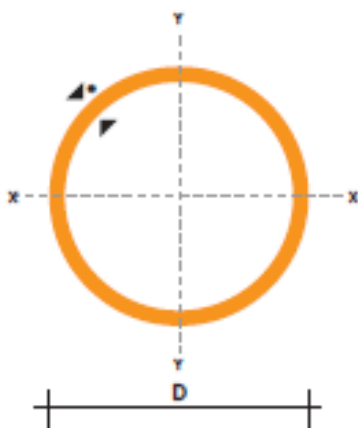
Especificaciones Generales

Norma	ASTM A 513
Recubrimiento	Negro o galvanizado
Largo Normal	6 mts
Otros largos	Prevía consulta
dimensiones	Desde 1/2" a 2 1/2"
Espesor	Desde 0,6 mm a 1,5 mm



NOMENCLATURA

A	=	Area de la selección transversal del tubo, cm ²
I	=	Momento de inercia de la sección, cm ⁴
W	=	Módulo resistente de la sección, cm ³
r	=	Radio de giro de la sección cm



		ESPESOR		PESO	PROPIEDADES		
DIAMETRO EXTERIOR (D)		e	P	A	I	W	r
Pulg	mm	mm	kg/6m	cm	cm ⁴	cm ³	cm
1/2	12.70	0.60	1.14	0.23	0.04	0.07	0.43
		0.75	1.44	0.28	0.05	0.08	0.42
		0.95	1.86	0.35	0.06	0.09	0.41
		1.10	2.10	0.40	0.07	0.11	0.41
		1.50	2.82	0.53	0.08	0.13	0.39
5/8	15.88	0.60	1.44	0.29	0.08	0.11	0.54
		0.75	1.86	0.36	0.10	0.13	0.53
		0.95	2.28	0.44	0.12	0.15	0.51
		1.10	2.64	0.51	0.14	0.18	0.52
		1.50	3.54	0.68	0.18	0.22	0.51
3/4	19.05	0.60	1.74	0.35	0.15	0.16	0.65
		0.75	2.16	0.43	0.19	0.19	0.65
		0.95	2.70	0.54	0.22	0.23	0.64
		1.10	3.18	0.62	0.25	0.26	0.63
		1.50	4.20	0.83	0.32	0.34	0.62
7/8	22.22	0.60	2.04	0.41	0.24	0.21	0.76
		0.75	2.52	0.50	0.29	0.26	0.76
		0.95	3.18	0.63	0.36	0.32	0.75
		1.10	3.66	0.73	0.41	0.37	0.75
		1.50	4.92	0.98	0.53	0.47	0.74
1	25.40	0.60	2.28	0.47	0.36	0.28	0.88
		0.75	2.88	0.58	0.44	0.35	0.87
		0.95	3.60	0.73	0.55	0.43	0.87
		1.10	4.20	0.84	0.62	0.49	0.86
		1.50	5.64	1.13	0.81	0.64	0.85
1 1/4	31.75	0.95	4.50	0.92	1.09	0.69	1.18
		1.10	5.22	1.06	1.24	0.78	1.08
		1.50	7.08	1.43	1.63	1.03	1.07
1 1/2	38.10	0.95	5.40	1.11	1.91	1.00	1.31
		1.10	6.24	1.28	2.19	1.15	1.31
		1.50	8.46	1.72	2.89	1.52	1.30
1 3/4	44.45	0.95	6.24	1.30	3.07	1.38	1.54
		1.10	7.26	1.50	3.52	1.66	1.53
		1.50	9.84	2.02	4.67	2.10	1.52
1 7/8	47.63	0.95	6.78	1.40	3.80	1.60	1.65
		1.10	7.80	1.61	4.35	1.83	1.64
		1.50	10.26	2.17	5.79	2.43	1.63
2	50.80	0.95	7.20	1.49	4.62	1.82	1.76
		1.10	8.34	1.72	5.30	2.09	1.76
		1.50	10.80	2.32	7.06	2.78	1.74
2 3/8	60.33	1.50	13.20	2.77	12.00	3.98	2.08
2 1/2	63.50	1.50	14.04	2.92	14.05	4.42	2.19

Anexo R

Tubería de acero negro sin costura cedula 40. Fuente: DIPAC.

TUBERIA PARA VAPOR TUBERIA SIN COSTURA Y ACCESORIOS CEDULA 40

Especificaciones Generales

Norma	ASTM A 53 GR B para conducción de fluidos
Recubrimiento	Negro o galvanizado
Largo normal	6,00 m.
Otros largos	Previa Consulta
Acabado	Natural
Otro acabado	Previa Consulta

Resistencia Mecánica

Resistencia a la tracción	60000 psi (42,2 Kg F/mm2)
Límite de elasticidad	35000 psi (24,6 Kg F/mm2)
Alargamiento	0.5%



DIAMETRO			ESPESOR		PRESION/PRUEBA		PESO
NOMINAL	EXTERIOR		e	pulg	kg/cm2	lb/pulg2	kg/mt
	mm	pulg	mm				
1/4"	13.70	0.54	2.24	0.08	49	700	0.63
3/8"	17.10	0.37	2.81	0.09	49	700	0.85
1/2"	21.30	0.84	2.77	0.10	49	700	1.27
3/4"	26.70	1.05	2.87	0.11	49	700	1.68
1"	33.40	1.31	3.38	0.13	49	700	2.50
1 1/4"	42.20	1.66	3.56	0.14	91	1300	3.38
1 1/2"	48.30	1.90	3.68	0.14	91	1300	4.05
2"	60.30	2.37	3.91	0.15	176	2500	5.44
2 1/2"	73.00	2.87	5.16	0.20	176	2500	8.62
3"	88.90	3.50	5.49	0.21	176	2500	11.29
4"	114.30	4.50	6.02	0.23	155	2210	16.07
5"	141.30	5.56	6.55	0.25	137	1950	21.78
6"	168.30	6.62	7.11	0.28	125	1780	28.26
8"	219.10	8.62	8.18	0.32	110	1570	42.53
10"	273.00	10.75	9.27	0.36	101	1430	60.29
12"	323.80	12.75	10.31	0.40	94	1340	79.65

Anexo S

Planchas galvanizadas ASTM A653. Fuente: DIPAC.

PLANCHAS GALVANIZADAS

Especificaciones Generales

Acero base	Calidad Comercial o según tabla de Laminado al Frío
Norma	ASTM A 653 (Norma de recubrimiento)
Espesores	0,30 a 2,90
Rollos	X 1219 y flejes
Planchas	4 X 8 y medidas especiales
Flor	Regular Mínima Zero



RECUBRIMIENTO (TOTAL AMBAS CARAS)		
TIPO	oz / pie ²	gr / m ²
G-40	40	120
G-60	60	180
G-90	90	270

PRODUCTO/ MERCADO	COMERCIAL, CONSTRUCCION Y EDIFICIOS	INDUSTRIAL	LINEA BLANCA	AUTOMOTRIZ
Lámina Galvanizada	Techos y paredes, perfilería y tubería en general, polines, soportes de cielo falso, ductos de aire, silos para almacenar granos, accesorios para construcción, cortinas metálicas, señalizaciones de carretera, estructuras, techos y soportes de establecimientos.	Aire acondicionado, ventiladores de techo y ventana, tapas, extractores de humo, casas móviles, ductos, bisagras, recipientes, cajas eléctricas, pizarrones electrónicos, motores, laines, etc.	Respaldo de refrigeradores, estufas y lavadoras, soportes, bases, uniones, esquineros y accesorios de fijación y otras partes no expuestas,	Moflers, uniones, soportes, pisos, carter, guanteras, portaestéreos, cinchos y otras partes no expuestas, etc.

Anexo T

Planos mecánicos del gasificador

- DYM-2015-07-001 Ensamble del gasificador
- DYM-2015-07-002 Sistema de alimentación
- DYM-2015-07-003 Boquillas de descarga
- DYM-2015-07-004 Tapas del gasificador
- DYM-2015-07-005 Cuerpo del gasificador
- DYM-2015-07-006 Cono inferior
- DYM-2015-07-007 Cámara de aire
- DYM-2015-07-008 Cámara de cenizas
- DYM-2015-07-009 Rejilla cenizas
- DYM-2015-07-010 Puerta corrediza y cejas de apoyo
- DYM-2015-07-011 Soportes y refuerzos
- DYM-2015-07-012 Cubierta alimentación
- DYM-2015-07-013 Tornillo helicoidal
- DYM-2015-07-014 Eje y bushing
- DYM-2015-07-015 Chumacera
- DYM-2015-07-016 Tapas laterales
- DYM-2015-07-017 Canaleta de transporte

Referencias Bibliográficas

Dahlquist, Erik (2013). Technologies for Converting Biomass to Useful Energy: Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation. Recuperado de <http://www.ebilib.co>

Gräbner, Martin (2014). Industrial Coal Gasification Technologies Covering Baseline and High-Ash Coal. Recuperado de <http://www.ebilib.com>

Nikrityuk, Petr A.; Meyer, Bernd (2014). Gasification Processes: Modeling and Simulation. Recuperado de <http://www.ebilib.com>

Basu, Prabir (2010). Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory.

Fogler, Scott (2008). Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. Pearson educación.

González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., & Gil, M. A. C. (2009). Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables. Uned.

P.W. Atkins. "Química - Física 6ta Edición", Ediciones Omega S.A, Madrid 1998.

Peter Quaak; Harrie Knoef; Hubert E. Stassen (1999). Energy from biomass: A review of Combustion and Gasification Technologies.

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2003). Termodinámica. México: McGraw-Hill.

Çengel, Y. A., Pérez, J. H., & Fernández, Á. H. (2004). Transferencia de calor. McGraw-hill.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. Pearson Educación.

Torreguitar, R., & Weiss, A. (1975). Combustión y generación de vapor. Buenos Aires: Mellor-Goodwin S.A.C.

Megyesy, E. F., & Buthod, P. (2001). Pressure vessel handbook. Pressure Vessel Publishing.

Estrada, J. M. L. (1997). Diseño y cálculo de recipientes a presión.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). “Biomasa: Gasificación”. Madrid, Octubre de 2007

Sonia Rincón; Alexander Gómez; Wolfgang Klose. Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial. Kassel, Alemania 2011.

Luis E. García. “Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo”. Bogotá, D.C., Colombia 2011.

Sarchi, T., & Eduardo, L. (2012). Caracterización de los productos de combustión de la cascarilla de arroz utilizando un sistema térmico con capacidad de 60000 Kcal/h.

Echeverría Cruz, M. A., & López Mena, O. A. (2010). Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica.

SENPLADES (2015). Objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir. Recuperado de: <http://plan.senplades.gob.ec/>

CIEMAT. (2014). <http://www.sovenci.com/tipos-de-biomasa/>.

Hemisferios, I. U. (Marzo de 2008). <http://investiga.ide.edu.ec/index.php/component/content/article/114-marzo2008/625-las>.

Licuado, A. C. (17 de 05 de 2015). <http://www.glpchile.cl/>. Obtenido de <http://www.glpchile.cl/el-glp/usos-del-glp>

Renovable, M. d. (2015). <http://www.ecuadorcambia.com/home.php?op=info>. Obtenido de <http://www.ecuadorcambia.com/preguntas-frecuentes/>

La Biomasa: Concepto y Clasificación (2014). Obtenido de http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/Concepto_y_clasificacion.asp#

