

ENERGÍAS RENOVABLES: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA CON MOTORES STIRLING Y TURBINAS A GAS
MEDIANTE IDEF0 Y ANÁLISIS FUNCIONAL.

ANA LISBETH GALINDO NOGUERA
LUIS SEBASTIAN MENDOZA CASTELLANOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2009

ENERGÍAS RENOVABLES: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE
GENERACIÓN ELÉCTRICA CON MOTORES STIRLING Y TURBINAS A GAS
MEDIANTE IDEFO Y ANÁLISIS FUNCIONAL.

ANA LISBETH GALINDO NOGUERA
LUIS SEBASTIAN MENDOZA CASTELLANOS

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Electricista

Director:
DR. GILBERTO CARRILLO CAICEDO

Codirector:
ING. ALVARO ALYAMANÍ TRIANA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2009

A Dios todo poderoso por iluminarme y darme la fortaleza para cumplir mis metas.

A mi madre por su cariño y apoyo incondicional han hecho de mí lo que soy.

A mis hermanos que siempre han estado conmigo.

A mis sobrinos que siempre han creído en mí.

*A mis demás familiares y amigos que siempre han estado pendientes de mi formación
profesional.*

A la alma de mi padre que siempre me ha acompañado.

*A mi compañero, mi amigo, mi media mitad Sebastián por estar conmigo en este
proceso.*

Ana Lisbeth

*D*edico este proyecto y toda mi carrera universitaria a Dios y la virgen por ser quienes han estado a mi lado en todo momento. A mi nona María de Jesús porque sé que siempre estuvo acompañándome desde el cielo, A mi madre Cecilia Castellanos y mi hermana Paola Mendoza ya que gracias a ellos soy quien soy hoy en día, también quiero agradecer de forma muy especial a mis tíos Carlos Julio y Julia Esperanza Carrillo de Vargas y mi primo Juan Carlos, por que los considero como mis padres y sé que sin su ayuda y paciencia no habría podido lograr este objetivo, a mis tías, Rosario y Leonor Castellanos que fueron los que me dieron ese cariño y calor humano necesario, a mi padre José Mendoza que más que un papa es un amigo, a la tía Carmen Alicia que siempre ha estado para darme palabras de aliento, a don Gilberto Carrillo que fue la voz de la experiencia y apoyo incondicional, a mi codirector Álvaro Alyamani porque encontré un nuevo amigo en este camino tan difícil, a mis primos Carlos Augusto y John Freddy porque han compartido todos esos secretos y aventuras que solo se pueden vivir entre hermanos, a la señora Ana Noguera porque siempre nos acompañó con sus oraciones a Argemiro Galindo porque sus consejos y aportes fueron muy valiosos en este proceso.

También les agradezco a mis amigos más cercanos, a esos amigos que siempre me han acompañado y con los cuales he contado desde que los conocí.

Un especial agradecimiento a mi compañera, amiga y novia de este proyecto Anita Galindo por aguantarme hasta el final de este camino tan difícil.

Sebastián Mendoza Castellanos.

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros y profundos agradecimientos al: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo por la oportunidad, confianza y orientación para desarrollar este proyecto.

Ing. Álvaro Alyamaní Triana Ramírez por su aporte y participación activa en el desarrollo de este proyecto.

Universidad Industrial de Santander, y en su nombre la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones y todos quienes la integran.

Compañero de trabajo Argemiro Galindo Noguera autor del trabajo de grado “AGROENERGÍA: CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS ASOCIADOS A LA PALMA AFRICANA, LA HIGUERILLA Y EL PIÑÓN MEDIANTE ANÁLISIS FUNCIONAL E IDEF0.”

Muchas Gracias y Dios los bendiga.

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCION | 1 |
| 1. PRELIMINARES..... | 3 |
| 1.1 BIOMASA | 3 |
| 1.2 BENEFICIOS DE LA BIOMASA | 3 |
| 1.3 CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA..... | 4 |
| 1.4 FUENTES DE BIOMASA..... | 6 |
| 1.5 CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA | 6 |
| 1.6 APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA | 7 |
| 1.6.1 <i>Biocombustibles</i> | 8 |
| 1.6.2 <i>Producción eléctrica</i> | 8 |
| 1.6.3 <i>Calor y Vapor</i> | 8 |
| 1.6.4 <i>Gas Combustible</i> | 8 |
| 1.6.5 <i>Cogeneración</i> | 9 |
| 1.6.6 <i>Energía mecánica</i> | 9 |
| 1.7 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO..... | 10 |
| 1.8 PROCESO DE CONVERSIÓN DE LA BIOMASA | 11 |
| 2. ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN | 13 |
| 2.1 CARACTERÍSTICAS DEL GAS COMBUSTIBLE | 13 |
| 2.2 CONTAMINANTES | 16 |
| 2.3 PRE-TRATAMIENTO DE LA BIOMASA | 18 |
| 2.3.1 <i>Astillado</i> | 18 |
| 2.3.2 <i>Secado Natural</i> | 19 |
| 2.3.3 <i>Secado Forzado</i> | 20 |
| 2.3.4 <i>Molienda</i> | 22 |
| 2.3.5 <i>Tamizado</i> | 23 |
| 2.3.6 <i>Densificación</i> | 23 |
| 2.4 GASIFICACIÓN | 26 |
| 2.5 ALIMENTACIÓN DEL GASIFICADOR | 29 |
| 2.6 TIPOS DE GASIFICADORES | 29 |
| 2.6.1 <i>Gasificadores de corriente ascendente o tiro directo (updraft)</i> | 30 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.6.2 | <i>Gasificadores de corriente descendente o tiro invertido (Downdraft)</i> | 31 |
| 2.6.3 | <i>Gasificadores de lecho fluidizado</i> | 32 |
| 2.6.4 | <i>Gasificador de horno rotativo</i> | 34 |
| 2.6.5 | <i>Gasificador de flujo cruzado</i> | 36 |
| 2.7 | EFICIENCIA DEL GASIFICADOR..... | 36 |
| 2.8 | CARACTERÍSTICAS DE LOS DIVERSOS GASIFICADORES | 37 |
| 2.9 | AGENTES GASIFICANTE..... | 39 |
| 2.10 | FACTORES DE OPERACIÓN | 41 |
| 2.11 | LIMPIEZA Y ACONDICIONAMIENTO DEL GAS | 42 |
| 2.11.1 | <i>Sistemas de enfriamiento</i> | 44 |
| 2.11.2 | <i>Eliminación de partículas sólidas</i> | 45 |
| 2.11.3 | <i>Filtración de cenizas volantes</i> | 50 |
| 2.11.4 | <i>Lavado de gases ácidos</i> | 51 |
| 2.11.5 | <i>Eliminación de Alquitranes</i> | 51 |
| 2.11.6 | <i>Secado</i> | 52 |
| 3. | TECNOLOGÍAS IMPLEMENTADAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍAS | 53 |
| 3.1 | TURBINA DE GAS | 53 |
| 3.1.1 | <i>Tipos de turbinas de gas</i> | 53 |
| 3.1.2 | <i>Tipos de ciclo termodinámico</i> | 54 |
| 3.1.3 | <i>Suministro de energía al ciclo</i> | 54 |
| 3.1.4 | <i>Disposiciones mecánicas</i> | 56 |
| 3.1.4.1 | Turbinas de un solo eje..... | 56 |
| 3.1.4.2 | Turbina de eje partido o doble eje..... | 57 |
| 3.1.5 | <i>Ciclo Brayton</i> | 58 |
| 3.1.6 | <i>Compresor</i> | 61 |
| 3.1.6.1 | Compresor centrífugo..... | 62 |
| 3.1.6.2 | Compresor axial..... | 62 |
| 3.1.7 | <i>Cámara de combustión</i> | 62 |
| 3.1.8 | <i>Análisis del Proceso de Combustión</i> | 63 |
| 3.1.9 | <i>Arranque de la turbina de gas</i> | 64 |
| 3.1.10 | <i>Turbina</i> | 65 |
| 3.1.10.1 | Turbina de flujo radial..... | 65 |
| 3.1.10.2 | Turbina de flujo axial | 66 |
| 3.2 | MOTOR STIRLING..... | 66 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.1 | <i>Funcionamiento ideal del motor Stirling</i> | 67 |
| 3.2.2 | <i>Ciclo Stirling</i> | 68 |
| 3.2.3 | <i>Descripción del ciclo Stirling</i> | 71 |
| 3.2.4 | <i>Rendimiento del ciclo Stirling</i> | 75 |
| 3.2.5 | <i>Análisis del ciclo Stirling</i> | 76 |
| 3.2.6 | <i>Regenerador</i> | 79 |
| 3.2.6.1 | Análisis de la regeneración..... | 79 |
| 3.2.6.2 | Acoplamiento de los émbolos y extracción de potencia..... | 80 |
| 3.2.6.3 | Características de los elementos mecánicos..... | 80 |
| 3.2.6.4 | Elementos térmicos..... | 80 |
| 3.2.6.5 | Calentadores..... | 82 |
| 3.2.6.6 | Refrigeradores..... | 83 |
| 3.2.6.7 | Fluidos de trabajo..... | 83 |
| 3.2.7 | <i>Contaminación y ruido</i> | 84 |
| 3.2.8 | <i>Sistema de control</i> | 86 |
| 3.2.8.1 | Variación de temperatura..... | 87 |
| 3.2.8.2 | Variación de la amplitud de la presión..... | 87 |
| 3.2.8.3 | Variación del ángulo de fase..... | 88 |
| 4. | PROCESO DE COGENERACIÓN | 89 |
| 4.1 | COGENERACIÓN CON GASIFICACIÓN A PARTIR DE BIOMASA..... | 89 |
| 4.2 | RECUPERACIÓN ENERGÉTICA / CONVERSIÓN EN ENERGÍA MECÁNICA..... | 89 |
| 4.3 | COGENERACIÓN..... | 89 |
| 4.3.1 | <i>Funcionamiento de un proceso de cogeneración</i> | 90 |
| 4.3.2 | <i>Ventajas principales de la cogeneración</i> | 91 |
| 4.3.3 | <i>Tecnologías de cogeneración</i> | 92 |
| 4.3.3.1 | Cogeneración con turbinas de gas..... | 93 |
| 4.3.3.2 | Cogeneración con micro turbinas..... | 95 |
| 4.3.3.3 | Cogeneración con motor Stirling..... | 95 |
| 4.3.3.4 | Calderas de recuperación de calor..... | 96 |
| 4.3.3.5 | Generador Eléctrico..... | 96 |
| 4.3.4 | <i>Caracterización de instalaciones de cogeneración</i> | 97 |
| 4.3.4.1 | Rendimientos..... | 97 |
| 4.3.4.2 | Coeficiente para caracterizar las instalaciones de cogeneración..... | 98 |

| | |
|---|------------|
| 5. METODOLOGÍA IDEF0 | 100 |
| 5.1 COMPONENTES DEL IDEF0..... | 100 |
| 5.2 SINTAXIS Y REGLAS DE IDEF0 | 103 |
| 5.3 PAUTAS PARA CREAR DIAGRAMAS DE PROCESOS..... | 104 |
| 5.4 DIAGRAMA DEL PROCESO GENERAL | 105 |
| 6. ANÁLISIS FUNCIONAL | 111 |
| 6.1 PRINCIPIOS GENERALES DEL ANÁLISIS FUNCIONAL | 111 |
| 6.2 MAPA FUNCIONAL | 112 |
| 6.3 REGLAS PARA ELABORAR EL MAPA FUNCIONAL | 113 |
| 6.4 TÉRMINOS DEL ANÁLISIS FUNCIONAL..... | 114 |
| 6.5 DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE FUNCIONAL | 114 |
| 6.6 TABLAS DE HACERES Y SABERES | 117 |
| 6.7 FORMATOS DE UNIDAD DE COMPETENCIA | 118 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 154 |
| GLOSARIO | 158 |
| BIBLIOGRAFIA | 162 |
| ANEXOS..... | 172 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE BIOMASA..... | 4 |
| FIGURA 2. APLICACIONES DE LA BIOMASA..... | 7 |
| FIGURA 3. GASIFICACIÓN DE CORRIENTE ASCENDENTE (UPDRAFT)..... | 30 |
| FIGURA 4. GASIFICACIÓN DE CORRIENTE DESCENDENTE O DE TIRO INVERTIDO. | 32 |
| FIGURA 5. GASIFICADOR DE LECHO FLUIZADO. | 33 |
| FIGURA 6. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN CON AIRE. | 39 |
| FIGURA 7. ESQUEMA CONCEPTUAL DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN CON OXIGENO..... | 39 |
| FIGURA 8. PROCESO DE LIMPIEZA DEL GAS. | 43 |
| FIGURA 9. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS CICLONES..... | 46 |
| FIGURA 10. FILTRO DE MANGAS..... | 48 |
| FIGURA 11. PRECIPITADOR ELECTROESTÁTICO. | 49 |
| FIGURA 12. TURBINA DE CICLO ABIERTO. | 55 |
| FIGURA 13. TURBINA DE CICLO CERRADO..... | 55 |
| FIGURA 14. TURBINA DE UN SOLO EJE..... | 56 |
| FIGURA 15. TURBINA DE EJE PARTIDO..... | 58 |
| FIGURA 16. DIAGRAMA T-S Y P-V DEL CICLO BRAYTON..... | 59 |
| FIGURA 17. EL CICLO IDEAL (I), REAL (R) DE UNA TURBINA DE GAS..... | 61 |
| FIGURA 18. ESQUEMA DEL MOTOR STIRLING..... | 68 |
| FIGURA 19. CICLO Y ESQUEMAS DE UN MOTOR DE AIRE CALIENTE STIRLING..... | 68 |
| FIGURA 20. VOLUMEN MÁXIMO DEL FLUIDO EN LA CÁMARA FRÍA DEL MOTOR..... | 71 |
| FIGURA 21. VOLUMEN MÍNIMO DEL FLUIDO EN LA CÁMARA FRÍA DEL MOTOR..... | 72 |
| FIGURA 22. VOLUMEN MÍNIMO DEL FLUIDO EN LA CÁMARA CALIENTE DEL MOTOR..... | 73 |
| FIGURA 23. VOLUMEN MÁXIMO DEL FLUIDO EN LA CÁMARA CALIENTE DEL MOTOR..... | 73 |
| FIGURA 24. VOLUMEN MÁXIMO DEL FLUIDO EN LA CÁMARA FRÍA DEL MOTOR..... | 74 |
| FIGURA 25. RENDIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN EN EL CICLO STIRLING (100 BAR, 100CM ³)..... | 76 |
| FIGURA 26. TRABAJO EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN EN EL CICLO STIRLING (100 BAR, 100CM ³)..... | 77 |
| FIGURA 27. P-V Y T-S DEL CICLO REGENERATIVO ISOTÉRMICO DE RALLIS..... | 78 |
| FIGURA 28. DIAGRAMA DE FLUJO DE ENERGÍAS..... | 90 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 29. DIAGRAMA DEL CICLO DE CABECERA. | 92 |
| FIGURA 30. DIAGRAMA DEL CICLO DE COLA..... | 93 |
| FIGURA 31. ESQUEMA DE COGENERACIÓN CON TURBINA A GAS. | 94 |
| FIGURA 32. BALANCE DE ENERGÍA EN UN SISTEMA COGENERATIVO..... | 97 |
| FIGURA 33. DIAGRAMA PADRE..... | 102 |
| FIGURA 34. DIAGRAMA DE DESCOMPOSICIÓN. | 103 |
| FIGURA 35. MAPA FUNCIONAL. | 112 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1. TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES OBTENIDOS DE LA BIOMASA..... | 9 |
| TABLA 2. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO EN FUNCIÓN DEL TIPO DE RECURSO DISPONIBLE.. | 10 |
| TABLA 3. DIFERENTES ETAPAS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA BIOMASA. | 11 |
| TABLA 4. PROMEDIOS DE LOS VALORES CALORÍFICOS INFERIORES. | 14 |
| TABLA 5. REACCIONES DE LA GASIFICACIÓN. | 28 |
| TABLA 6. TIPOS DE GASIFICADORES. | 37 |
| TABLA 7. CARACTERÍSTICAS DE LOS GASIFICADORES MÁS IMPORTANTES. | 38 |
| TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGENTES GASIFICANTES..... | 40 |
| TABLA 9. COMPOSICIÓN MEDIA DEL GAS PARA DIVERSOS AGENTES GASIFICANTES..... | 41 |
| TABLA 10. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINATES EN EL GAS SEGÚN EL TIPO DE GASIFICADOR. | 42 |
| TABLA 11. LIMPIEZA EN LOS SISTEMAS DE GASIFICACIÓN..... | 43 |
| TABLA 12. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LOS CICLONES. | 46 |
| TABLA 13. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LOS FILTROS DE MANGAS..... | 48 |
| TABLA 14. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PRECIPITADORES ELECTROESTÁTICOS. | 50 |
| TABLA 15. EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE ALQUITRÁN CON DIFERENTES TECNOLOGÍAS..... | 52 |
| TABLA 16. EXPRESIONES PARA EL CÁLCULO EN CADA PUNTO DEL CICLO. | 70 |
| TABLA 17. NOMENCLATURA Y FUNCIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR. | 81 |
| TABLA 18. PRINCIPALES PÉRDIDAS DE POTENCIA Y RENDIMIENTO EN LOS MOTORES STIRLING. | 85 |

LISTA DE DIAGRAMAS

| | |
|--|-----|
| DIAGRAMA 1. GENERAL A-0, PRINCIPAL PARA LA TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA. | 106 |
| DIAGRAMA 2. DESCOMPOSICIÓN PARA A-0 DE LA TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA. | 107 |
| DIAGRAMA 3. DESCOMPOSICIÓN A-1, TRATAMIENTO DE LA BIOMASA | 108 |
| DIAGRAMA 4. DESCOMPOSICIÓN A-3, LIMPIEZA DEL GAS..... | 109 |
| DIAGRAMA 5. DESCOMPOSICIÓN A-4, PROCESO DE COGENERACIÓN..... | 110 |
| DIAGRAMA 6. MAPA FUNCIONAL PARA LA PREPARACIÓN DE LA BIOMASA..... | 115 |
| DIAGRAMA 7. MAPA FUNCIONAL DE LA OBTENCIÓN DEL GAS | 116 |
| DIAGRAMA 8. MAPA FUNCIONAL DE LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA | 117 |

RESUMEN

TÍTULO: ENERGÍAS RENOVABLES: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON MOTORES STIRLING Y TURBINAS A GAS MEDIANTE IDEF0 Y ANÁLISIS FUNCIONAL *.

AUTORES: Ana Lisbeth Galindo Noguera, Luis Sebastián Mendoza Castellanos **.

PALABRAS CLAVES: Biomasa, Gasificador, Limpieza del gas, Motor Stirling, Turbina a Gas, Cogeneración, IDEF0, Análisis funcional.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto está encaminado a la descripción y caracterización del proceso de generación de energías (eléctrica, mecánica, térmica), iniciando con la preparación de la biomasa, para ser transformada en gas, después de ser sometida a un proceso de gasificación; el gas obtenido es sometido a un proceso de limpieza para ser utilizado en un proceso de cogeneración con motores Stirling y turbinas de gas.

Para proporcionar una clara idea del proceso, se documenta mediante la metodología IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling) que permite describir y analizar mediante mapas de procesos, los individuos que intervienen y las funciones que realizan, representando además lo que se hace, lo que se controla, en qué trabaja, los medios que se utilizan para realizar sus funciones y lo que se produce al final del proceso.

Adicionalmente, con el fin de garantizar la calidad y eficiencia de los procesos, se debe establecer los conocimientos, destrezas y habilidades que deben cumplir las personas que realizan el proceso.

Esta metodología permite estructurar un modelo metodológicamente fuerte para alinear y organizar información del proceso de generación de energía mediante la gasificación, enfocados a la utilización de energías renovables, obteniendo así las tablas de haceres y saberes descritas en los formatos usados para las normas de competencias laborales.

El desarrollo de este trabajo permitió obtener componentes normativos de desempeño laboral que debe tener el personal, para llevar a cabo el proceso de generación de energía, utilizando motor Stirling y turbina de gas a partir de la gasificación de la biomasa.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Ingeniería Eléctrica. Director: Dr Gilberto Carrillo Caicedo. Codirector: Ing. Alvaro Alyamani Triana.

ABSTRACT

TITLE: RENEWABLE ENERGIES: CHARACTERIZATION OF THE ELECTRICAL GENERATION PROCESS WITH STIRLING ENGINES AND GAS TURBINES USING IDFO AND FUNCTIONAL ANALYSIS *.

AUTHORS: Ana Lisbeth Galindo Noguera, Luis Sebastian Mendoza Castellanos**.

KEYWORDS: Biomass, gasifier, gas cleaning, Stirling engine, gas turbine, cogeneration, IDFO, functional analysis.

DESCRIPTION:

This project is aimed to the description and characterization of the energies generation process (electrical, mechanical and thermal), beginning with the biomass preparation to be turned into gas, after undergoing a gasification process. The gas obtained undergoes a process of cleaning to be used in a cogeneration process with Stirling engines and gas turbines.

To provide a clear idea of the process, it is documented by means of IDEF0 methodology (Integration Definition for Function Modeling) that allows to describe and analyze by means of process maps, the individuals involved and the functions they carry out, also representing what is done, what is controlled, how it works, the means used to realize its functions, and what is produced at the end of the process.

Additionally, in order to guarantee the quality and efficiency of the processes, it must be established the knowledge, cleverness and skills that must be met by the people who carry out the process.

This methodology allows structuring a methodologically-strong model to align and organize of information of the energy-generation process through gasification, focused on utilization of renewable energies, obtaining consequently the tables' doings and knowledge described in forms using for the occupational-competency standards.

The development of this paper allowed achieving normative components of labor performance that the staff must meet to carry out the energy-generation process, using Stirling engine and gas turbine from biomass gasification.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Ingeniería Eléctrica. Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo. Codirector: Ing. Alvaro Alyamani Triana.

INTRODUCCION

El interés de aprovechar las fuentes de energías renovables, toma cada día más fuerza debido a la preocupación que tiene la comunidad científica, respecto a los problemas asociados a la utilización de combustibles de origen fósil y la deforestación indiscriminada.

Existen varias tecnologías en desarrollo para la generación de energía limpia, entre las se encuentra, en particular, el proceso de gasificación que permite obtener un gas, para alimentar una turbina a gas o un motor Stirling.

En este proyecto se caracterizan los procesos tecnológicos en la generación de energía eléctrica con turbinas a gas y motores Stirling a partir de la gasificación de la biomasa. Modelar estos procesos en IDEF0 y análisis funcional, permite definir una base para las competencias laborales necesarias para estructurar el correcto desempeño del personal involucrado en los diferentes actividades, asociadas a la generación de energía.

En el primer capítulo se exponen aspectos teóricos de la biomasa tales como clasificación, fuentes, caracterización, procesos de conversión, aplicación y aprovechamiento energético. En el segundo capítulo se describe el proceso de transformación termoquímica de la gasificación, en el que se incluyen características del gas, pre-tratamiento de la biomasa, gasificación, limpieza y acondicionamiento del gas producto.

En el tercer capítulo se describen las tecnologías para la generación de energía, como lo son la turbina de gas y el motor Stirling. En él se detalla el principio de funcionamiento termodinámico de estas tecnologías.

El cuarto capítulo se refiere al proceso de conversión energética de la biomasa en energía mecánica, térmica y eléctrica denominado cogeneración. En el quinto capítulo, con base en la metodología IDEF0, se presentan los mapas, los mecanismos y las tareas o funciones necesarios para el desarrollo de los distintos procesos.

En el sexto capítulo, la aplicación del análisis funcional permite la identificación de las unidades de competencia y sus respectivos elementos como funciones productivas representadas gráficamente por los diagramas funcionales; se muestra las tablas de hacereres y saberes, base de la pre-norma de competencia. Finalmente el séptimo capítulo contiene las conclusiones del proyecto.

1. PRELIMINARES

1.1 Biomasa

La biomasa es un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza, incluyendo materiales procedentes de transformación natural o artificial: plantas, microorganismos o animales.

En los procesos de transformación de la materia orgánica, se generan residuos que muchas veces no tienen valor para la cadena nutritiva o no sirven para la fabricación de productos que demanda el mercado, pero si se pueden utilizar como combustible en el aprovechamiento energético. Para comprender la ventaja del uso de la biomasa como fuente alternativa de energía es importante comprender el ciclo del carbono.

En el proceso de la fotosíntesis, las plantas captan CO_2 y fijan carbono; pero al mismo tiempo los árboles en su respiración eliminan CO_2 , cuando los árboles mueren o se talan y se dejan a la intemperie sufren un proceso de descomposición que genera CH_4 y CO_2 , si el material producido por fotosíntesis se emplea como combustible genera CO_2 cuando la combustión es completa, pero cuando la combustión es incompleta los gases de escape tienen un alto grado de CO y CH_4 (De Juana, José M^a 2002).

1.2 Beneficios de la biomasa

La biomasa se considera una fuente de energía limpia por su papel en la lucha contra el cambio climático, su menor impacto ambiental y su contribución a la mejora de la competitividad, empleo y desarrollo regional.

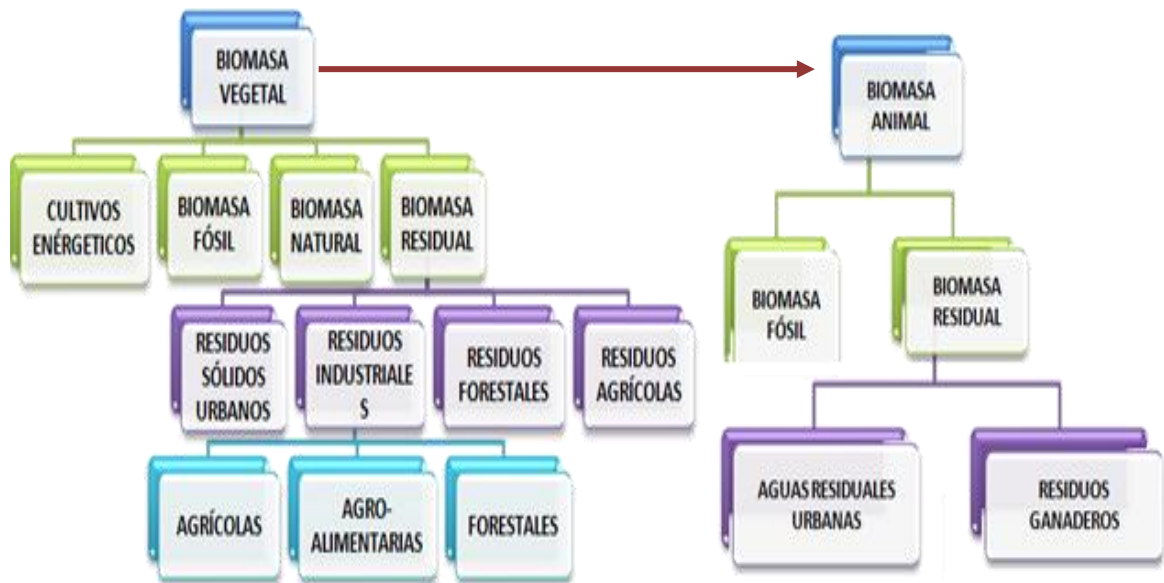
En concreto el uso de la biomasa aporta las siguientes ventajas (Beaumont Roveda 1987):

- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados.
- Una parte de la biomasa para fines energéticos, procede de materiales residuales que es necesario eliminar y que en este uso produce energía.

- La producción de biomasa es totalmente descentralizada, basada en un recurso disperso en el territorio, que puede tener gran incidencia social y económica en el mundo rural.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles. La tecnología para su aprovechamiento cuenta con un buen grado de desarrollo tecnológico para muchas aplicaciones.
- La implantación de cultivos energéticos en tierras abandonadas evita la erosión y degradación del suelo.
- El aprovechamiento de algunos tipos de biomasa contribuyen a la creación de puestos de trabajo y mejora socioeconómica del medio rural.

1.3 Clasificación de la Biomasa

Figura 1. Clasificación de las fuentes de biomasa.



Fuente: [Calero-Carta-Padrón]

Según su origen, la Biomasa puede ser primaria, secundaria y terciaria (*Posluszny, 2004*).

- **Biomasa primaria:** Materia orgánica formada directamente por los seres fotosintéticos (biomasa vegetal, residuos agrícolas y forestales).
- **Biomasa Secundaria:** Producida por los seres heterótrofos que se nutren de biomasa primaria (la biomasa ha sufrido una transformación biológica, de modo que tiene distinta naturaleza a la inicial). Dentro de este grupo están la carne y las deyecciones de los animales herbívoros.
- **Biomasa terciaria:** Es la producida por los animales que se alimentan de la biomasa secundaria, como son los carnívoros.

En cuanto a su composición, la Biomasa se clasifica en:

- **Biomasa lignocelulósica:** Los hidratos de carbono que predominan en su composición son las celulosas (hemicelulosa y holocelulosa) y la lignina. Pertenecen a este grupo la paja, la madera y la leña (*Enciso, 2007*).
- **Biomasa amilácea:** Los hidratos de carbono se encuentran en forma de polisacáridos de reserva tales como almidón o inulina, principalmente. Ejemplos de este tipo de biomasa son los cereales y las papas (*Enciso, 2007*).
- **Biomasa azucarada:** Contiene azúcares, ya sean monosacáridos (glucosa o fructosa principalmente) o disacáridos (sacarosa). La remolacha o el tallo de la caña de azúcar son ejemplos de este tipo de biomasa (*Enciso, 2007*).
- **Biomasa oleaginosa:** Posee abundante contenido en aceite; por ejemplo las pepas de girasol (*Enciso, 2007*).
- **Biomasa laticífera:** Contiene predominantemente hidrocarburos y esteroides como productos específicos de su metabolismo (látex) (*Enciso, 2007*).

1.4 Fuentes de biomasa

Considerando la biomasa como cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico, distinguimos dos tipos principales de fuentes: la biomasa directamente producida “biomasa natural” y la biomasa residual (*De Juana, José M^a 2002, Beaumont Roveda 1987*).

- **Biomasa natural:** “Se produce espontáneamente en las tierras no cultivadas sin la intervención del hombre, por lo que no es la más adecuada para su aprovechamiento energético masivo, ya que podría originar la rápida degradación de los ecosistemas naturales. Sin embargo, sí se podrían aprovechar los residuos de partes muertas, restos de podas, respetando el equilibrio del ecosistema y evitando además el riesgo de incendios y de propagación de plagas y enfermedades”. (*De Juana, José M^a 2002, Beaumont Roveda 1987*).
- **Biomasa residual:** “Se genera debido a la actividad humana, en los procesos productivos de los sectores sólidos, forestal o ganadero, en los núcleos urbanos dando lugar a residuos urbanos y aguas residuales. Dentro del grupo de tipos de residuos se encuentran” (*De Juana, José M^a 2002, Beaumont Roveda 1987*):
 - ✓ Residuos sólidos urbanos.
 - ✓ Residuos industriales.
 - ✓ Residuos agrícolas (pajas, bagazo de caña, etc.).
 - ✓ Residuos animales.

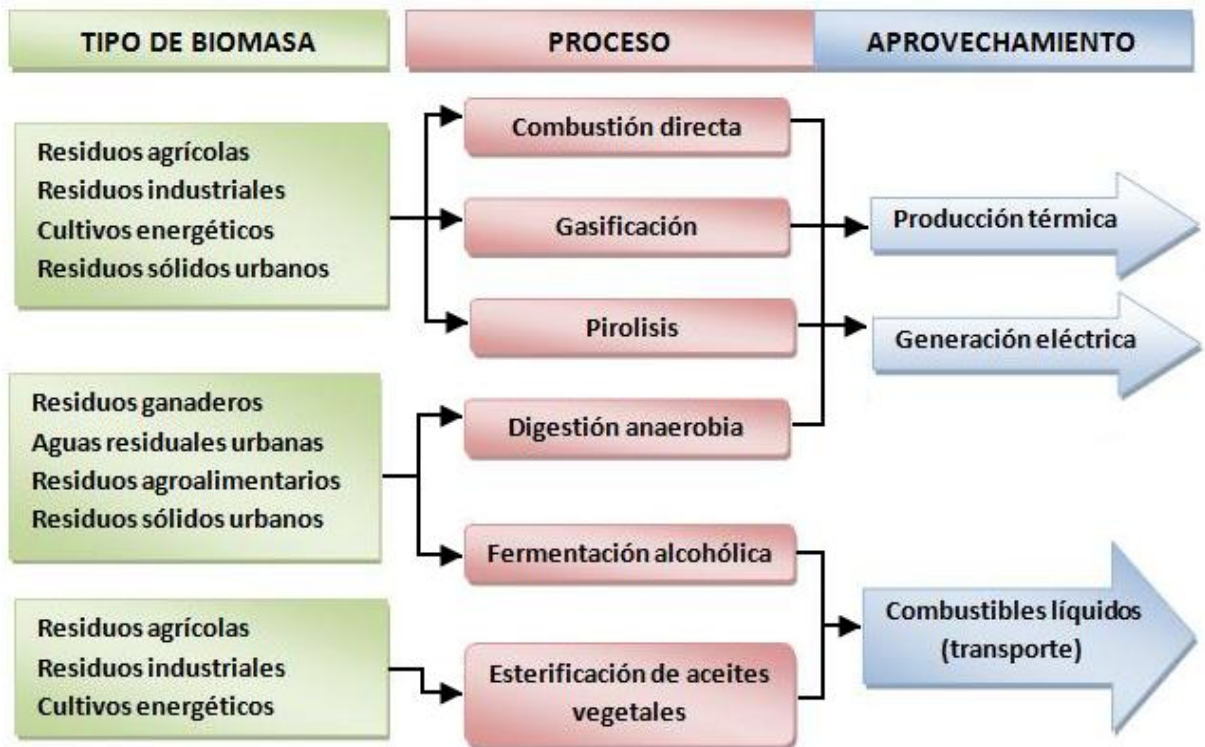
1.5 Características y aplicaciones energéticas de la Biomasa

En muchas ocasiones, la biomasa se elimina por dificultar las labores agrarias o ganaderas. Cuando esto ocurre se está desperdiciando una fuente de energía importante, ya que un kilogramo de biomasa permite obtener 3.500 [kcal] (*Senovilla & Antolin*). Habitualmente, el contenido energético de la biomasa se mide en función del poder calorífico del recurso, aunque para algunos de ellos, como es el caso de

la biomasa residual húmeda o de los biocarburantes, se determina en función del poder calorífico del producto energético obtenido en su tratamiento (*Energías alternativas*).

En la figura 2 se muestra el proceso aplicado a los diferentes tipos de biomasa para su transformación en energía.

Figura 2. Aplicaciones de la biomasa.



Fuente: [Calero-Carta-Padrón]

1.6 Aplicaciones energéticas de la biomasa

Dentro las aplicaciones energéticas de la biomasa se encuentran los siguientes productos:

1.6.1 Biocombustibles

“La producción de biocombustibles tales como el etanol y el biodiesel tiene el potencial de sustituir cantidades significativas de combustibles fósiles en varias aplicaciones de transporte. El uso extenso del etanol en Brasil ha demostrado que los biocombustibles son técnicamente factibles en gran escala. La producción de biocombustibles en los EE.UU. y Europa (etanol y biodiesel) está aumentando, siendo la mayoría de los productos utilizados en combustible mezcla, por ejemplo E20 está compuesto por 20% de etanol y 80% de gasolina y se ha descubierto que es eficaz en la mayoría de los motores de ignición sin ninguna modificación” (Martínez 2008).

1.6.2 Producción eléctrica

La electricidad puede ser generada a partir de un número de fuentes de biomasa, que dependiendo del tipo y cantidad de biomasa disponible, varia la tecnología a emplear, pudiéndose tratar de una turbina de vapor, una turbina a gas un motor alternativo y actualmente en evolución el empleo del motor Stirling (Fernández 2002).

1.6.3 Calor y Vapor

“La combustión de la biomasa o de biogás puede utilizarse para generar calor y vapor. El calor puede ser el producto principal, en usos tales como calefacción de hogares o puede ser un subproducto de la producción eléctrica en centrales combinadas de calor y energía. El vapor generado por la biomasa puede utilizarse para accionar turbinas de vapor para la producción eléctrica, utilizarse como calor de proceso en una fábrica o planta de procesamiento, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente” (Fernández 2002).

1.6.4 Gas Combustible

“El biogás producido de la digestión o de la pirolisis anaerobia, pueden ser utilizados en motores de combustión interna para accionar turbinas en la producción eléctrica, producción calorífica, en necesidades comerciales y

domésticas y en vehículos especialmente modificados para emplear este combustible” (Fernández 2002).

1.6.5 Cogeneración

“Cuando una entidad presenta consumos térmicos y eléctricos importantes se puede plantear la instalación de un sistema de cogeneración, consistente en la producción conjunta de energía térmica y eléctrica. Esta tecnología presenta como gran ventaja la consecución de rendimientos superiores a los sistemas de producción de energía térmica o eléctrica por separado” (Fernández 2002).

1.6.6 Energía mecánica

Los biocarburantes pueden ser empleados en los motores alternativos de los vehículos sustituyendo total o parcialmente a los combustibles fósiles. La utilización de biocarburantes es especialmente interesante, en industrias agrarias que dispongan de una adecuada materia prima para su producción (aceites reciclados, colza, girasol, maíz, trigo, etc.) y que puedan auto consumirlos (por ejemplo en tractores), llegando a suponer importantes ahorros (Fernández 2002).

En la tabla 1 se encuentran los diferentes tipos de biocombustibles, para fines térmicos mecánicos o para la producción de energía eléctrica.

Tabla 1. Tipos de Biocombustibles obtenidos de la biomasa.

| TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES OBTENIDOS DE LA BIOMASA | | |
|---|--|-----------------|
| Sólidos | Líquidos | Gaseosos |
| Paja | Alcoholes | Gas de gasógeno |
| Leña sin procesar | Biohidrocarburos | Biogás |
| Astillas | Aceites vegetales y esteres derivados de ellos | Hidrogeno |
| Briquetas y pellets | Aceites de pirolisis | |
| Carbón vegetal | | |

Fuente: [Fernández 2002].

1.7 Aprovechamiento energético

Para generar energía con biomasa se opta por diferentes tecnologías. La elección depende de las características de los recursos, de la cuantía disponible y del tipo de demanda energética requerida. En general, los sistemas comerciales existentes en el mercado para utilizar la biomasa residual seca se pueden clasificar en función de la combustión o gasificación. Los que aprovechan el contenido energético de la biomasa residual húmeda están basados en su digestión anaerobia. Para ambos tipos de recursos existen tecnologías que posibilitan la obtención de biocarburantes. En la tabla 2 se presenta sistemas tecnológicos para hacerles transformación (Faaij, A. P. C. (1997)).

Tabla 2. Aprovechamiento energético en función del tipo de recurso disponible.

| TIPO DE RECURSO | SISTEMA DE APROVECHAMIENTO | PRODUCTO OBTENIDO |
|-------------------------|---|---|
| Biomasa residual seca | Combustión del recurso | <ul style="list-style-type: none"> • Vapor • Aceite térmico • Agua caliente • Aire caliente |
| | Gasificación del recurso | <ul style="list-style-type: none"> • Gas combustible³ • Gas de síntesis³ |
| | Producción de biocarburantes | <ul style="list-style-type: none"> • Aceite vegetal⁴ • Biodiesel⁴ • Etanol⁴ • ETBE |
| Biomasa residual húmeda | <ul style="list-style-type: none"> • Compostaje • Digestión anaerobia • Combustión del recurso | <ul style="list-style-type: none"> • Compost • Biogás³ |
| Cultivos energéticos | <ul style="list-style-type: none"> • Gasificación del recurso • Producción de biocarburantes | <ul style="list-style-type: none"> • Aceite vegetal⁴ • Biodiesel⁴ • Etanol⁴ • ETBE⁴ |

Fuente: [Nogués- Herrer 2002].

³ Estos productos se pueden emplear para producir energía térmica o mecánica en un eje

⁴ Estos productos se pueden emplear para generar energía mecánica en un eje (motor de combustión interna)

1.8 Proceso de conversión de la biomasa

Los procesos de transformación física de la fitomasa residual en general, y especialmente el proceso de compactación, suponen un reto tanto técnico como económico para el aprovechamiento energético de estos materiales de naturaleza heterogénea. Entre los procesos de conversión se encuentran:

- **Físicos:** Son los asociados a las fases primarias de transformación, triturado, astillado, compactado e incluso secado (*Energías alternativas*).
- **Termoquímicos:** Están basados en la transformación química de la biomasa, al someterla a altas temperaturas (300° C- 1500° C). Cuando se calienta la biomasa provoca un proceso con las siguientes fases mostrados en la tabla 3 (*Energías alternativas*):
 1. Secado y evaporación de sus componentes volátiles.
 2. Reacciones de craqueo o descomposición de sus moléculas.
 3. Reacciones en la que los productos resultantes de la primera fase reaccionan entre sí y con los componentes de la atmósfera en la que tenga lugar la reacción.

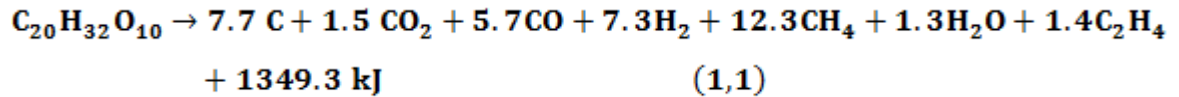
Tabla 3. Diferentes etapas del tratamiento térmico de la biomasa.

| ETAPAS DEL PROCESO | TRATAMIENTO TÉRMICO | | | |
|--------------------|---------------------|-----------|--------------|--------------|
| | SECADO | PIROLISIS | GASIFICACIÓN | COMBUSTIÓN |
| ETAPA 1 | secado | Secado | Secado | Secado |
| ETAPA 2 | | pirolisis | Pirolisis | Pirolisis |
| ETAPA 3 | | | Oxidación | Oxidación |
| ETAPA 4 | | | Gasificación | Gasificación |
| ETAPA 5 | | | | Combustión |

Fuente [Autores]

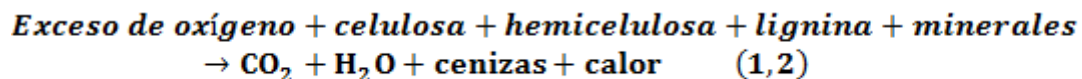
- a. Pirolisis:** Es el proceso de descomposición de la materia orgánica, por la acción del calor y ausencia de oxígeno. La descomposición térmica de estos materiales biomásicos se produce a través de una serie compleja de

reacciones químicas (ecuación 1,1), ya que influyen variables como condiciones de operación o tipo de biomasa empleado (*Energías alternativas*).



b. Gasificación: La gasificación es un proceso térmico que permite la conversión de un combustible sólido, en un gas con un moderado poder calorífico, mediante un proceso de oxidación parcial. Esta oxidación parcial se puede llevar a cabo utilizando aire, oxígeno, vapor o una mezcla de éstos (*Energías alternativas*).

b. Combustión: Es el proceso de conversión en el cual se produce la oxidación completa del combustible. La combustión de la biomasa puede caracterizarse por la siguiente reacción química:



La energía obtenida en forma de calor (producto primario del proceso), se utiliza en calderas para la producción de vapor y como calor de proceso en diversas aplicaciones (doméstico, industrial, calefacción, etc.).

La eficiencia de estos sistemas está limitado por materiales de construcción de la tecnología y por los ciclos termodinámicos (Rankine, ciclo vapor, etc.), aunque se han llegado a alcanzar niveles de eficiencia altos en plantas de escala por encima de 20 [Mwe], la eficiencia térmica del proceso es baja, y a pesar de que se emplean excesos de aire de combustión, los rendimientos de recuperación energética oscilan entre el 20% y el 22% (*Fernández 2002*).

2. ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN

En el análisis teórico del proceso de gasificación se describe cuales son las variables, las características y las ventajas que tiene cada tipo de gasificador, ya que del estudio de esta forma de generar energía proporciona una alternativa limpia y viable para nuestro medio global.

En este capítulo se documenta el funcionamiento de cada tipo de gasificador para obtener un gas con características específicas para la generación.

2.1 Características del gas combustible

Dentro de los diferentes tipos de biomasa se encuentra el carbón vegetal, la madera, los residuos de madera y también múltiples residuos agrícolas siendo estos los más populares. Como estos combustibles difieren mucho en sus propiedades físicas, químicas y morfológicas, tienen exigencias diferentes en cuanto al método de gasificación y en consecuencia requieren diferentes diseños del reactor e incluso distintas tecnologías de gasificación.

La variedad de diseños incluye los reactores de tiro directo, tiro invertido, tiro transversal, lecho fluidizado etc. Todos estos sistemas presentan ventajas e inconvenientes respecto al tipo de combustible, aplicación y sencillez de funcionamiento. Cada tipo de gasificador entonces; debe funcionar respecto a estabilidad, calidad del gas, eficiencia y pérdidas de presión, para condiciones particulares las propiedades del combustible se describen a continuación (*Pirolisis 2009*):

- **Contenido energético:** Cuando el gas se emplea para fines de combustión directa, unos valores caloríficos bajos pueden ser tolerables. En la tabla 4 se dan los promedios de los valores caloríficos inferiores, de la madera, el carbón vegetal y la turba (FAO 1993).

Tabla 4. Promedios de los valores caloríficos inferiores.

| COMBUSTIBLE | CONTENIDO DE HUMEDAD (%) | VALOR CALORÍFICO INFERIOR (KJ/KG) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Madera | 20 - 25 | 13,000 – 15,000 |
| Carbón vegetal | 2 - 7 | 29,000 – 30,000 |
| Turba | 35 - 50 | 12,000 – 14,000 |

Fuente: [FAO, 1993]

La única forma realista de presentar los valores caloríficos de un combustible, para la gasificación, es dar los valores caloríficos inferiores (excluyendo el calor de condensación del agua producida) sobre la base de incluir las cenizas y con referencia específica al contenido real de humedad del combustible.

- **Contenido de humedad:** El uso de combustibles con contenidos de humedad hasta de un 40 a un 50%, es viable, especialmente cuando se emplean gasificadores de tiro directo. En los gasificadores de tiro invertido, un alto contenido de humedad, da lugar no sólo a unos bajos valores caloríficos del gas, sino también a unas bajas temperaturas en la zona de oxidación, lo que puede ocasionar una capacidad insuficiente de transformación de los alquitranes, si el gas se emplea para motores (FAO 1993).

El contenido de humedad se puede determinar sobre base seca o sobre base húmeda. Se empleara el contenido de humedad (C.H.) sobre base seca y se define del siguiente modo (FAO 1993):

$$C.H_{seco} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso seco}} \times 100(\%) \quad (2,1)$$

El contenido de humedad sobre base húmeda se define:

$$C.H_{húmedo} = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso seco}}{\text{peso húmedo}} \times 100(\%) \quad (2,2)$$

Las transformaciones de uno a otro se pueden obtener del modo siguiente:

$$C.H_{seco} = \frac{100 * C.H_{h\u00famedo}}{100 - C.H_{h\u00famedo}} \quad (2,3)$$

$$C.H_{h\u00famedo} = \frac{100 * C.H_{seco}}{100 - C.H_{seco}} \quad (2,4)$$

- **Tamaño de las partículas y distribución por tamaño:** Los gasificadores de tiro directo y de tiro invertido tienen limitaciones en cuanto al rango aceptable del tamaño del combustible contenido en el material de alimentación. Un material de alimentación de grano fino o blando, puede ocasionar problemas de circulación en la sección del depósito del gasificador y también por una caída inadmisibles de presión encima de la zona de reducción y por una alta proporción de polvo en el gas. Un tamaño excesivo de las partículas, da lugar a una menor reactividad del combustible, lo que se traduce en problemas de arranque y mala calidad del gas. Los tamaños excesivamente grandes de las partículas pueden ocasionar problemas de canalización del gas, especialmente en los gasificadores de tiro directo. En general, los gasificadores de madera funcionan con pedazos de madera y astillas cuya dimensión varía de 8 x 4 x 4 [cm] a 1 x 0.5 x 0.5 [cm]. Los gasificadores de carbón vegetal generalmente se abastecen con pedazos de carbón cuya dimensión varía entre 1 x 1 x 1 [cm] y 3 x 3 x 3 [cm]. Los gasificadores de lecho fluidizado normalmente pueden funcionar con combustibles cuyos diámetros de partículas varían entre 0.1 y 20 [mm] (*Fernández 2002*).
- **Reactividad:** Es un factor importante que determina el coeficiente de reducción, en un gasificador, del dióxido de carbono en monóxido de carbono. influyendo en el diseño del reactor, porque impone la altura necesaria de la zona de reducción. La reactividad depende, en primer lugar, del tipo de combustible. Por ejemplo, se ha observado que combustibles

como la madera, el carbón vegetal y la turba, son mucho más reactivos que el carbón mineral (*Pirolisis 2009*):

- **Densidad aparente:** Los combustibles de alta densidad aparente tienen ventajas porque representan un alto valor de energía por volumen. Consecuentemente, estos combustibles necesitan menos espacio de depósito para un tiempo dado de recarga. Los combustibles de baja densidad aparente dan lugar a veces a un caudal insuficiente de gas lo que se traduce en valores caloríficos del gas reducido (*Pirolisis 2009*):

2.2 Contaminantes

Los principales contaminantes generados en la gasificación son las partículas, los componentes alcalinos, alquitranes, componentes nitrogenados y pequeñas moléculas hidrocarbonadas (Metano, etano, etc.). Los hidrocarburos son beneficiosos para los gases combustibles ya que incrementan el poder calorífico del producto (*Aguillon-Gamino-Masera 2005*).

- **Materias volátiles:** Si el combustible contiene más del 10% de materias volátiles, debe emplearse en gasógenos de tiro invertido. La cantidad de volátiles en el material de alimentación determina la necesidad de medidas especiales, como la extracción de los alquitranes del gas producido. En la práctica, el único combustible de biomasa que no necesita esta atención especial es el carbón vegetal de buena calidad (*Aguillon-Gamino-Masera 2005*).
- **Contenido de cenizas y composición química:** La formación de escoria, depende del contenido y características de fusión de las cenizas, y de la distribución de la temperatura en el gasificador. Las cenizas pueden causar problemas en los gasificadores de tiro directo o de tiro invertido, debido a la formación de escoria en el reactor, ocasionando la formación excesiva de alquitranes y el bloqueo total del reactor, existiendo la posibilidad de que se

produzcan fugas de aire, aumentando el riesgo de explosión, especialmente en los gasificadores de tiro directo (*Aguillon-Gamino-Masera 2005*).

Si el contenido de cenizas está por debajo del 5 o 6% no hay formación de escorias, pero si el contenido es mayor del 12% son muy propensos a la formación de escorias. Hay algunos combustibles con contenidos de cenizas entre el 6 y el 12%, donde no se observa la formación de escorias ya que dependen en gran medida de la temperatura de fusión de las cenizas (*Aguillon-Gamino-Masera 2005*).

Los gasificadores de tiro directo y de tiro invertido pueden funcionar con combustibles que producen escoria, si se modifican las parrillas estáticas a parrillas en movimiento continuo. Los gasificadores de tiro transversal que trabajan a temperaturas muy elevadas, de 1500 °C y más, necesitan precauciones especiales al respecto del contenido de cenizas del combustible (*Aguillon-Gamino-Masera 2005*).

- **Formación de alquitranes y fenoles:** Los alquitranes y los fenoles producidos en el gasificador son tóxicos, estos aparecen en la combustión parcial de la materia prima, encontrándose en el flujo caliente del gas. Tienen a condensarse a temperaturas bajas (200 y 600°C) de refrigeración, generando coque que daña los equipos.

La composición actual del alquitrán que se produce es muy compleja y depende de las condiciones de la reacción, incluyendo la temperatura de gasificación, y el tiempo de residencia en el reactor. Los alquitranes se forman cuando se calienta la materia prima, sufriendo la deshidratación, condensación y reacciones poliméricas (*Aguillon-Gamino-Masera 2005*).

Cuando el alquitrán se condensa en la zona inferior del gasificador que se encuentra más fría, produce un taponamiento en los tubos, pipas y resto del

equipo, presentando un problema de limpieza, de gran costo y peligro para el sistema (Martínez, 2008).

- **Formación de NH_4 y NO_x :** El amoníaco está formado por proteínas y otros contenidos de nitrógeno provenientes de la materia prima. El NO_x se forma a partir de las reacciones del nitrógeno o de moléculas nitrogenadas con el oxígeno a elevadas temperaturas. Las bajas temperaturas en la gasificación serán las que limiten la producción de este compuesto. A pesar de producir bajos contenidos en NO_x , se deben examinar las emisiones del sistema en su conjunto. Cuando el gas limpio se quema, el NO_x aparecerá, y esto sucede en la mayoría de los sistemas de combustión. El uso de gas en vez de la biomasa sólida como combustible proporciona un mejor control de emisiones, por tanto disminuirá las concentraciones de NO_x . Sin embargo, este compuesto puede aparecer cuando se queme el gas, así que será apropiado controlarlo y eliminarlo (Martínez 2008).

2.3 Pre-tratamiento de la Biomasa

Para evaluar la factibilidad técnica de un proceso de conversión de biomasa en energía, es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que la caracterizan. De este modo se determina el proceso de conversión más adecuado dentro de los que se encuentran el astillado, secado, molienda y densificación que permite realizar proyecciones de los beneficios económicos y ambientales esperados.

2.3.1 Astillado

El proceso de astillado consiste en la primera etapa de reducción granulométrica, permitiendo obtener astillas (chips) con un tamaño máximo que posibilita el manejo, almacenaje, carga y transporte de los residuos de una forma técnicamente viable.

Los equipos de astillados constan de las siguientes partes (Bionergia, 2007):

1. **Sistema de alimentación:** Consiste en la llegada de residuos hasta la boca de la máquina de astillado, pudiendo ser manual o automática (banda transportadora).
2. **Rodillos de sujeción:** Su superficie está dotada de dientes afilados, que funcionan con un sistema hidráulico de presión variable.
3. **Sistema de corte:** Consiste en una serie de cuchillas metálicas, de las cuales depende el tamaño, la forma y la calidad de las astillas. Se puede encontrar diferentes tipos como son:
 - Cuchillas sobre volantes de inercia.
 - Cuchillas sobre tambor rotatorio.
 - Cuchillas especiales de forma helicoidal.
4. **Sistema de extracción de astillas:** Las astillas se depositan alrededor de la máquina, debido a que son impulsadas por la propia inercia de los sistemas de trituración. Existen diferentes tipos de equipos de astillado:
 - Astilladoras estáticas.
 - Astilladoras móviles o remolcadas.
 - Astilladoras autopropulsadas.

2.3.2 Secado Natural

El secado natural es utilizado para facilitar la deshidratación de los residuos a través de condiciones ambientales naturales, para obtener niveles de humedad que permitan rendimientos aceptables en el proceso de conversión energética.

En el secado natural puede ocurrir la existencia de organismos patógenos, hongos o insectos, que pueden proliferar y desarrollarse, afectando al resto de la masa forestal, debido a que producen fermentaciones parcialmente anaerobias en las zonas interiores, produciendo un incremento de temperatura que por encima del límite de los 60°C, ocasiona degradación química (Ortiz – 1994).

El auto combustión se fomenta cuando se hacen montones de astillas demasiado grandes, donde las condiciones de anaerobiosis en el interior de las pilas son importantes. Por este motivo, se recomienda hacer montones que no rebasen los 40-50 [m³] de producto almacenado (Ortiz – 1994).

2.3.3 Secado Forzado

El secado forzado ayuda a reducir el contenido de humedad hasta valores del orden del 20 al 30%, permitiendo la deshidratación. Para realizarlo se emplean secaderos neumáticos, rotatorios, de corrientes paralelas, secaderos a contracorriente y sistemas combinados (Ortiz – 1994).

- **Secador neumático:** “Está basado en el arrastre de los residuos mediante un flujo térmico, que durante el recorrido extrae la humedad de los sólidos. Suele utilizarse cuando el producto es de granulometría fina y/o se requiere una deshidratación ligera, conformadas por” (Ortiz – 1994):
 - ✓ Un foco de calor (hogar donde se queman combustibles convencionales, o parte de la propia biomasa previamente secada, para generar el flujo térmico deshidratador).
 - ✓ Canal de secado (conducto de diámetro y longitud variable según diseño, donde el flujo térmico generado arrastra los sólidos en suspensión, al tiempo que provoca la evacuación del agua contenida en los mismos).
 - ✓ Sistema de succión (aspirador ciclónico que produce una depresión que posibilita el movimiento del sistema).

- **Secador rotatorio de tipo Trommel:** Se utiliza en materiales muy húmedos y/o de granulometría gruesa. Fundamentalmente consta de las mismas partes que el caso anterior; en estos equipos el canal de circulación es un cilindro de sección y longitud variable (en función de diseños), que gira con velocidad variable, facilitando un contacto íntimo entre los sólidos y el flujo secante. La pendiente interior junto con el giro produce el avance de los

sólidos a una velocidad controlable. El tambor está dotado interiormente de aspas, paletas o tornillos sinfín, que permiten regular el flujo de sólidos y garantizar una adecuada exposición de la superficie de la biomasa al flujo térmico (Ortiz – 1994).

Finalmente, en ambos casos se procede a la segregación de los sólidos mediante un ciclón decantador donde el flujo pierde velocidad y precipitan los sólidos secos por gravedad, separándose del aire cargado de humedad.

- **Secador de corrientes paralelas:** “El flujo de gas y de sólidos circula en el mismo sentido. En este caso, el gas se va cargando de humedad durante todo el recorrido, por lo que al final del secadero, el gas puede llegar a estar saturado de agua, con lo que la eficacia de secado disminuye. Sin embargo, se trata de un sistema más seguro en cuanto a riesgo de incendios” (Ortiz – 1994).
- **Secador a contracorriente:** “Los flujos de gas y sólidos viajan en sentidos distintos. De esta manera los sólidos a medida que avanzan van encontrando un ambiente cada vez más seco y de mayor temperatura, con lo que la deshidratación es más eficaz y constante ya que cuanto menor es el contenido de agua en la biomasa más energía térmica se requiere para extraer la misma cantidad de agua. Se trata de un sistema que presenta un mayor riesgo de ignición de los sólidos y, por tanto, de incendios. Las temperaturas de entrada de gases son de unos 200 a 500 °C y las de salida suelen oscilar entre los 80 y 120 °C (para evitar condensaciones y pérdidas de calor en chimenea)” (Ortiz – 1994).
- **Sistemas combinados:** “Consisten en la inyección de gases recalentados en la cámara de molienda de un equipo de reducción granulométrica de biomasa. Simultáneamente a la trituración de los residuos se consigue el secado, con lo que se reduce considerablemente el espacio ocupado por la maquinaria. Generalmente, se procede a la recirculación de las fracciones de

residuo más húmedas, hasta que se alcanza el contenido de humedad deseada. Existen unidades con capacidades de procesado entre los 200 y 20.000 [kg/h]" (Ortiz – 1994).

En las pilas de secado se produce el efecto chimenea que consiste, en la entrada de aire en las pilas desde la superficie, enfriándolas al tiempo que se recalientan conforme avanza hacia el centro. La corriente de aire arrastra el agua contenida en los residuos, produciéndose así un flujo de aire húmedo y cálido desde el interior de los montones hacia la cumbrera, produciendo así una salida de vapor a la atmosfera debido al recalentamiento que es favorecido por la acumulación de microorganismos con lo que se acelera el incremento de población microbiológica y por tanto la actividad termo genésica (Ortiz – 1994).

En una pila de residuos pueden distinguirse 3 zonas:

1. **Capa superficial:** De espesor variable susceptible de modificaciones en el contenido de humedad, debido a la influencia atmosférica directa.
2. **Zona interior:** Aquí se produce un secado lento y sostenido, al no haber influencia atmosférica directa, sino un flujo de aire que va arrastrando el agua progresivamente y un calentamiento que acelera el secado hasta estabilizarse la humedad en cierto entorno.
3. **Cumbrera:** zona donde se acumula agua arrastrada desde el interior y la aportada por la atmosfera, obteniéndose en esta zona los mayores porcentajes de humedad.

2.3.4 Molienda

Cuando se desea obtener combustibles de mayor calidad, la molienda es lo más recomendable, debido a que algunos equipos de conversión energética están diseñados para manejar productos más finos que las astillas (inyectores, hornos

especiales, gasificadores, etc.). También es necesario cuando se trata de fabricar combustibles densificados como las briquetas y los pellets (*Ortiz – 1994*).

2.3.5 Tamizado

La clasificación por tamaños de las partículas provenientes de residuos resulta importante, para la eliminación de las fracciones indeseables y el aprovechamiento diferencial de las distintas fracciones granulométricas presentes. También puede resultar útil separar algunas fracciones de material que ya reúnen determinados requisitos en cuanto a tamaño máximo de partícula, para evitar que pasen a una fase de molienda donde sólo ocasionarían una reducción del rendimiento del molino.

Por otra parte, las partículas separadas mediante este sistema suelen ser de forma más alargada y fibrosa que las generadas en un molino (utilizando el mismo calibre de luz de malla), por lo que debe tenerse en cuenta este aspecto a la hora de diseñar los sistemas de transporte y almacenamiento de este tipo de productos (*Ortiz – 1994*).

2.3.6 Densificación

Otra posibilidad dentro de los procesos de transformación física de los residuos, consiste en la compactación de los mismos para obtener productos combustibles densificados utilizables como sustitutivos energéticos, entre ellos como producto final se encuentran las briquetas, pellets y gránulos con una alta calidad energética (*Ortiz – 1994*).

- 1. Briquetas:** Son elementos de forma cilíndrica con diámetros comprendidos entre 5 y 10 cm, poseen una gran densidad para facilitar el transporte y almacenaje, y son productos con características más homogéneas, más limpias y fáciles de manejar. Existen diferentes distintas tecnologías de briquetado (*Bioenergía,2007*):

- ✓ **Densificación por impacto - briquetadoras de pistón:** La compactación del material se consigue mediante el golpeteo, producido sobre la biomasa por un pistón accionado a través de un volante de inercia, especialmente si se utilizan sistemas dotados de "manto caliente" para la regulación y control de la temperatura de pre compactación, las densidades obtenidas suelen ser de 1000 y 1200 kg/m³ (*Bioenergía, 2007*).

 - ✓ **Densificador por extrusión - briquetadoras de tornillo:** Se basa en la presión ejercida por un tornillo sinfín especial, que hace avanzar el material hasta una cámara que se estrecha progresivamente (forma cónica). Este equipo permite realizar briquetas con orificios interiores que favorecen su combustión. las densidades obtenidas suelen ser de 1300 y 1400 kg/m³ (*Bioenergía, 2007*).

 - ✓ **Briquetadoras hidráulicas o neumáticas:** La presión es producida por uno o varios cilindros accionados por sistemas hidráulicos o neumáticos, utilizados cuando los residuos son de muy mala calidad, o están húmedos y no se requiere una gran calidad de la briqueta final. las densidades obtenidas suelen ser de 700 y 900 kg/m³ (*Bioenergía, 2007*).
- 2. Pellets:** Los pellets son biocombustibles estandarizados desarrollados para aprovechar los residuos orgánicos (*Bioenergía,2007*):
- a. Características específicas de los pellets:**
- ✓ **Forma y tamaño:** La forma del péllet es siempre cilíndrica. Así, el diámetro del péllet oscila entre 12 y 20 mm, la longitud del péllet es variable, y puede oscilar entre 1 y 7cm (*Bioenergía, 2007*).

 - ✓ **Aspecto y color:** El color como el aspecto exterior del péllet depende de la materia prima que lo componga. Los pellets procedentes de material leñoso tienen un color de madera ligeramente ennegrecida y satinada.

- ✓ **Densidad:** La densidad del pellet depende de la materia prima empleada, debido a que si es mayor la densidad de esta mayor será la densidad del producto final, también influye el proceso de fabricación del pellet.

En los pellets, deben tenerse en cuenta tanto la densidad real que es aproximadamente de unos 1.200 kg/ m^3 como la densidad aparente a granel que es del orden de 800 kg/ m^3 (*Bionergia, 2007*).

- ✓ **Humedad:** La humedad del pellet es función de la forma en que se suministre el producto (humedad menor del 12% en base húmeda) además, en el mismo proceso (densificado) se seca aún más la partícula (8 o 10% a la salida de la prensa) (*Bionergia, 2007*).
- ✓ **Friabilidad:** La friabilidad es lo opuesto a la resistencia al golpeteo sin desmenuzarse, y es una variable muy importante en los pellets, pues éstos están manipulándose continuamente y chocando unos con otros. El proceso de enfriamiento de los pellets, una vez salidos de la matriz, es tan crucial que su friabilidad se puede ver seriamente afectada (*Bionergia, 2007*).
- ✓ **Composición química:** La composición química de los pellets depende del material utilizado. Pero al emplearse aditivos pueden favorecer al proceso de obtención del pellet y proporcionan mayor cohesión al producto final, con lo que se mejora su resistencia al golpeo. Sin embargo, también aparecen algunos inconvenientes, como el encarecimiento del producto, o el hecho de que puedan resultar contaminantes (*Bionergia, 2007*).
- ✓ **Poder calorífico:** El poder calorífico dependerá de la materia prima empleada para fabricar el pellet. Cuando se mezclen en el pellet restos de residuos sólidos urbanos, su poder calorífico será menor, su calidad inferior y su cohesión menor (*Bionergia, 2007*).

En cuanto al poder calorífico volumétrico (kcal/ dm^3), el pellet tiene grandes ventajas frente a otros combustibles como las astillas, pues su densidad es mucho mayor.

- ✓ **Potencia calorífica:** Debido a que el p ellet es m as pequeño que la briqueta, éste arde m as deprisa, por lo que su potencia calorífica es mayor que la de la briqueta de igual composición química. Esto se debe a que los pellets presentan mayor superficie específica que las briquetas (*Bionergia, 2007*).
 - ✓ **Combustibilidad:** La temperatura de combustión es superior en los pellets que en otros combustibles como pueden ser las astillas. El motivo de este aumento de temperatura es que la composición química de la superficie lateral del p ellet es distinta a la de la madera, ya que en el proceso de pelletizado esta superficie se calienta y sufre una combustión incompleta formándose una fina película carbonosa que le da un color negruzco a la superficie y en la que el coeficiente de conductividad térmica es inferior al de la madera (*Bionergia, 2007*).
- b. Proceso de obtención de pellets:** El proceso consiste en alimentar una gran prensa cilíndrica de extensión. El émbolo de la prensa empuja el material compactado contra una matriz (normalmente cilíndrica) en la que hay unos orificios circulares por donde salen los pellets. Estos orificios circulares de la matriz pueden estar situados o bien en el fondo del cilindro de prensado, o bien en sus paredes laterales, por este motivo existirán pelletizadoras de matriz plana y pelletizadoras de matriz anular (*Bionergia, 2007*).

2.4 Gasificación

Son susceptibles de ser gasificados aquellos materiales con un alto contenido en carbono, como lo son: carbón, biomasa y residuos orgánicos.

El gas obtenido contiene monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂), metano (CH₄), pequeñas cantidades de otros hidrocarburos más pesados, agua (H₂O), nitrógeno (N₂) y diversos contaminantes como pequeñas partículas carbonosas, cenizas, alquitranes y aceites. El CO y el H₂ confieren poder calorífico al gas, ya que pueden reaccionar con oxígeno (combustión en

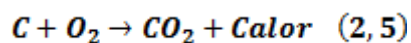
caldera, motor o turbina), pero el CH₄ es el responsable de gran parte del contenido energético, aunque se forme en pequeñas cantidades.

Si se emplea como agente gasificante el aire, el gas producido en la gasificación posee un bajo poder calórico, del orden de [4 a 7 MJ/m³], como resultado de los efectos de disolución del nitrógeno. Cuando se usa O₂ puro es posible obtener un gas de alrededor de [10 a 20 MJ/m³] (Wyman et al, 1992).

Los factores que afectan el desempeño de la gasificación del sistema son: el “ratio equivalente (ER)”, la temperatura de operación, el tipo de agente gasificante, la presión, el tiempo de residencia, la calidad de biomasa en términos físico-químicos y energéticos, y el uso de catalizadores (Wyman et al, 1992).

La gasificación de residuos orgánicos tiene lugar en cuatro etapas:

- **Secado:** Evaporación de la humedad contenida en el sólido, dependiendo del gasificador es más conveniente tener un porcentaje de humedad determinado (Energías alternativas).
- **Pirólisis:** Descomposición térmica en ausencia de oxígeno. Ocurre a unos 300-500°C. Se desprenden los componentes más volátiles. Debido a que la cantidad de oxígeno en el interior del reactor es insuficiente, algunos de estos volátiles no se podrán quemar, dando lugar a alquitranes contaminantes (Energías alternativas).
- **Combustión:** Se produce en presencia de oxígeno, a una temperatura entre 1.000 - 1.100° C. La combustión del oxígeno con las cenizas, alquitrán y biomasa producidos en la pirolisis, genera el calor que se utiliza en dicha pirolisis. El aire comburente entra en la zona de combustión a través del conducto, de forma que los hidrocarburos se transforman en gas. La combustión es prácticamente (Energías alternativas):



- **Gasificación propiamente dicha:** oxidación parcial del carbono que ha quedado tras la pirólisis. Ocurre a unos 600-1100°C.

El proceso descrito anteriormente es endotérmico, por lo que hace falta aportar energía al sistema. Esto puede hacerse de dos formas: o bien mediante una fuente externa o mediante la combustión de una parte del sólido a gasificar. En este último caso, en el interior del reactor se dan reacciones tanto endotérmicas como exotérmicas, por lo tanto es importante controlar la relación (sólido / aire), para conseguir que el calor aportado por unas sea igual al absorbido por las otras, manteniéndose la temperatura de reactor constante (*Energías alternativas*).

Las reacciones básicas se muestran en la Tabla 5. Donde las reacciones de calor con signo positivo son exotérmicas (la energía química es convertida en calor sensible), las reacciones de signo negativos son endotérmicas (el calor se consume a favor de la energía química) (*Energías alternativas*).

Tabla 5. Reacciones de la gasificación.

| ESTADO DE GASIFICACIÓN | ECUACIÓN QUÍMICA | (NÚMERO DE LA REACCIÓN) / TIPO DE REACCIÓN | CALOR DE REACCIÓN (KJ/KMOL) ^o |
|--|--|--|--|
| Oxidación y otras reacciones exotérmicas | $C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$ | (1) Oxidación parcial | +110700 |
| | $CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$ | (2) Oxidación CO | +283000 |
| | $C + O_2 \rightarrow CO_2$ | (3) Oxidación total | +393000 |
| | $C_6H_{10}O_5 \rightarrow XCO_2 + yH_2O$ | (4) Oxidación total | >>0 |
| | $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ | (5) Oxidación del Hidrógeno | +241820 |
| | $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ | (6) Reacción de shift | +41170 |
| | $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ | (7) Metanación | +206300 |
| Pirólisis | $C_6H_{10}O_5 \rightarrow C_xH_z + CO$ | (8) Pirólisis | < 0 |
| | $C_6H_{10}O_5 \rightarrow C_nH_mO_y$ | (9) Pirólisis | < 0 |
| Gasificación (reducción) | $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ | (10) Hidrogasificación | -131400 |
| | $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ | (11) Reacción de Boudouard | -172580 |
| | $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$ | (12) Reacción inversa de shift | -41170 |
| | $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ | (13) Hidrogenación | +74900 |

Fuente: [Enciso, 2007]

La materia prima en presencia de oxígeno tenderá a hacer combustión (reacción 3). Como el oxígeno introducido en el reactor es insuficiente, se favorece la presencia de CO por combustión incompleta (reacción 1). El exceso de materia orgánica reacciona con los gases presentes (principalmente CO₂ y H₂O, reacciones 11 y 10). Las reacciones 10 y 12 están favorecidas por la presencia de vapor de agua en el agente oxidante, por lo que la presencia de vapor favorece la producción de H₂. La formación de metano (reacción 7), está favorecida por las altas presiones (*Enciso, 2007*).

2.5 Alimentación del gasificador

Para alimentar un reactor correctamente, se debe tener en cuenta el sistema de alimentación de la biomasa y del aire necesario en el gasificador. Para efectuar el proceso de carga del gasificador se debe disponer de una cinta transportadora, alimentada por una tolva situada en su base y que a su vez alimenta otra pequeña tolva situada en la parte superior del gasificador. Esta última alimenta un cilindro de recarga cerrado por arriba y por abajo por sendas válvulas de cierre de tipo tajadera, activadas mediante electroválvulas neumáticas. En dicho cilindro se dispone de un medidor de nivel de paletas, similar a otro que se encuentra situado dentro del propio gasificador (*Senovilla-Antolin*).

El óptimo desempeño del proceso de gasificación, depende de las proporciones de alimentación del agente gasificante (aire, oxígeno, nitrógeno, etc.) y el combustible (pellets o briquetas) a intervalos regulares de tiempo, comprobando el nivel del caudal del gasificador. Si por ejemplo el agente utilizado es aire se utiliza un regulador de frecuencia que proporciona el soplate. Para ello se dispone de un sensor que proporciona una salida proporcional a dicho caudal (*Senovilla-Antolin*).

2.6 Tipos de gasificadores

Los tipos de reactores (gasificadores) que pueden ser utilizados en la gasificación de biomasa son los de lecho móvil (en contracorriente y corrientes paralelas), de

lecho fluidizado y de transporte. Cada uno de estos reactores presenta una serie de ventajas e inconvenientes, lo que hace que su elección dependa de varios factores.

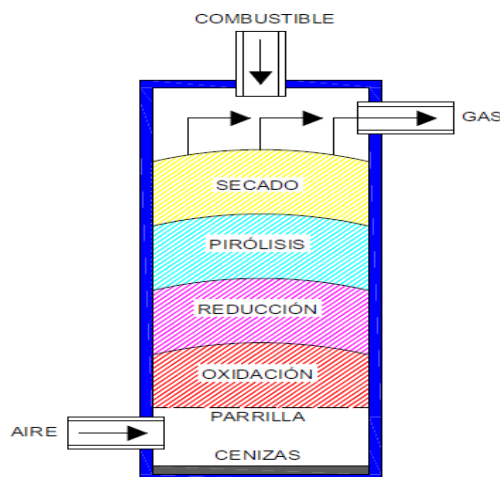
Los principales criterios de elección son:

- El tamaño y la densidad del residuo biomásico a procesar.
- La capacidad del procesamiento.
- La calidad deseada para el producto gaseoso a obtener.
- La cantidad de energía que se desea obtener (ONUDI, 2007).

2.6.1 Gasificadores de corriente ascendente o tiro directo (updraft)

Son de construcción simple, el sólido combustible es introducido por la parte superior y desciende lentamente en contracorriente con la corriente de gas generada por la introducción de los agentes gasificantes (aire, oxígeno y vapor) por el fondo del gasificador. Según desciende el sólido, es calentado por la corriente ascendente del gas hasta llegar a la zona de combustión donde se alcanza la máxima temperatura, sufriendo un enfriamiento posterior (Gomez-2008).

Figura 3. Gasificación de corriente ascendente (Updraft).



Fuente: [Gomez-2008]

Con esta tecnología se obtiene un gas bastante contaminado de alquitranes y sus ventajas e inconvenientes son:

Ventajas:

- Construcción simple y robusta
- Alta eficiencia energética
- Aceptan biomasa muy húmeda (hasta 50%).
- Gas producto a relativamente baja T^a

Inconvenientes:

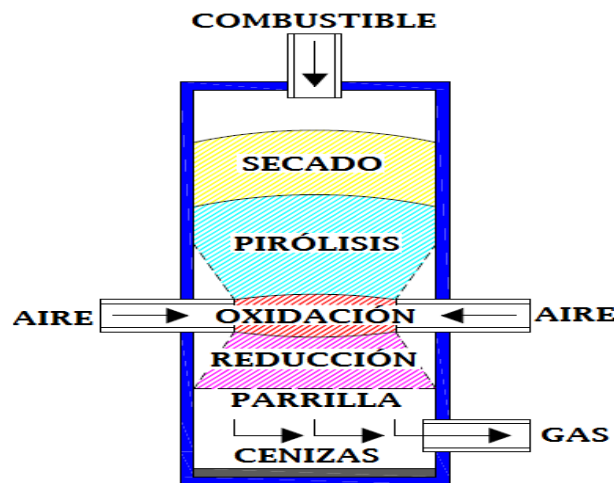
- La posibilidad de que se produzcan chimeneas en el equipo lo que puede motivar la salida de oxígeno y situaciones explosivas peligrosas.
- La necesidad de instalar parrillas de movimiento automático.
- Elevado contenido de contaminantes en los gases (char, alquitranes, etc.)
- Los problemas relacionados con la eliminación de líquidos condensados que contienen alquitranes, resultantes de las operaciones de depuración del gas, esto tiene poca importancia si el gas se emplea para aplicaciones directas del calor, en cuyo caso los alquitranes simplemente se queman
(*Pirolisis 2009*):

2.6.2 Gasificadores de corriente descendente o tiro invertido (Downdraft)

El sólido entra por la parte superior, experimentando sucesivamente los procesos de secado y pirólisis al ser sometido a un aumento progresivo de la temperatura. Este perfil de temperaturas se debe al hecho que la conducción del calor (y radiación a temperaturas suficientemente elevadas) tiene lugar desde la parte inferior, donde se está generando calor mediante combustión parcial (el oxígeno está por defecto) de los productos que llegan hasta allí. En su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de carbón vegetal y se transforman en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano. Además de las tres regiones (secado, pirolisis y oxidación)

en este gasificador, se presenta una cuarta región (reducción) en el que tienen lugar reacciones con vapor de H_2O y CO_2 que permiten obtener gases con mayor contenido energético que el gasificador en contracorriente, pero aun así, sigue teniendo baja calidad energética, pero con la ventaja de tener un contenido bajo de alquitranes (Gomez-2008).

Figura 4. Gasificación de corriente descendente o de tiro invertido.



Fuente: [Gomez-2008]

Ventajas:

- Son Simples, confiables y probados para ciertos combustibles.
- Poseen bajos contaminantes y menor necesidad de limpieza de gases.
- Son los preferidos para pequeña generación eléctrica.

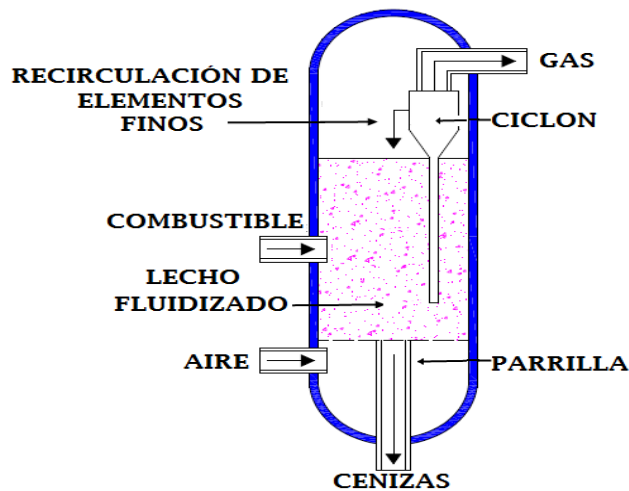
2.6.3 Gasificadores de lecho fluidizado

El agente gasificante se introduce en el gasificador a través de un lecho de partículas sólidas con el objeto de que estas se mantengan en suspensión. La biomasa se introduce por la parte inferior del gasificador, se mezcla con el lecho calentándose hasta alcanzar la temperatura del lecho. Como consecuencia, la biomasa se piroliza obteniéndose una mezcla elevada en gases. En la siguiente fase se produce una nueva gasificación y reacciones para la transformación de los alquitranes producidos previamente. Se suele disponer de un ciclón que mediante

su acción centrífuga separa las partículas suspendidas en el gas reduciendo el escape de alquitrán (*Senovilla-Antolin*).

En el gasificador de lecho fluidizado no se producen variaciones internas de temperatura evitando la formación de productos líquidos, se obtiene un gas con pocas impurezas y con una composición de salida controlada.

Figura 5. Gasificador de lecho fluidizado.



Fuente: [Gomez-2008]

El gasificador de lecho fluido se considera el más apropiado y reúne ventajas para su utilización en aprovechamientos de biomasa para la generación de energía eléctrica, y sobre todo, en producción a gran escala (varios [Mw]). Atendiendo a la velocidad de fluidización se puede clasificar en:

- Gasificador de lecho de fluido burbujeante (Velocidad de fluidización en el rango de 1 a 2 m/s).
- Gasificador de lecho fluido circulante (Velocidad de fluidización mayor de 5 m/s).

Ventajas:

- Permite gran cantidad de biomasa.
- Fácil control de temperatura.

- Realiza simultáneamente todos los procesos TQ sin zonas preferentes
- Se realizan los procesos de forma simultánea y continua
- Permiten obtener gas a mayor temperatura
- Se aporta una mayor homogeneidad a los procesos
- tiene altos tiempos de residencia → mayor conversión del carbono.

Inconvenientes:

- Alta generación de alquitrán.
- Mala respuesta a los cambios de carga.
- Solo aplicables en rangos de potencia alta.
- Mayor complejidad de los sistemas.
- Contenido de char relativamente alto → necesidad de limpieza exhaustiva del gas.

2.6.4 Gasificador de horno rotativo

El funcionamiento de este tipo de reactor presenta similitudes con los gasificadores de lecho móvil pero tiene sus propias características, sobre todo en la parte mecánica que facilita el desplazamiento de los sólidos, lo que hace más fácil el funcionamiento en continuo, del sistema. En el horno rotativo el gas puede circular en contracorriente o en corriente con el sólido, teniendo cada caso sus ventajas e inconvenientes, pudiendo establecerse en algunos casos una analogía con el “Updraft” y el “Downdraft” (*Pirolisis 2009*):

Los principales componentes del horno cilíndrico rotativo donde circulan los sólidos junto con aire y gases son:

- Una tolva para la carga de los Residuos.
- Un alimentador del horno.
- Una cámara de carga.
- El horno rotativo propiamente dicho.
- La cámara de descarga.

El proceso que siguen los sólidos dentro del horno se ilustra aquí para el funcionamiento en contracorriente, con lo cual, podemos dividir en cuatro etapas las transformaciones que durante el flujo de los sólidos tienen lugar:

- 1. Alimentación de los sólidos:** Los sólidos se descargan en la tolva de entrada, cayendo a través de un conducto vertical hasta el alimentador, donde son empujados por un pistón hidráulico para ser introducidos en el horno, encontrándose con el flujo de gases calientes que salen del horn del horno (*Gomez-200*).
- 2. Calentamiento inicial de los sólidos:** En un primer paso dentro del horno se produce un intercambio térmico entre los residuos y los gases, calentándose y secándose los primeros, y enfriándose los segundos. La temperatura en esta primera sección no supera los 400 °C. El volteo de los residuos facilita la mezcla con el flujo saliente de gases mejorando el intercambio térmico y la retención de partículas en suspensión en los gases (*Gomez-200*).
- 3. Carbonización y formación de gas combustible:** Los residuos están calientes y a medida que avanzan por el horno los gases que se encuentran están más calientes. Los residuos empiezan entonces a descomponerse por el calor formándose una mezcla de gases combustibles y una fracción sólida similar al carbón vegetal. La mezcla de gases carece de oxígeno por lo que no puede arder. La fase sólida restante se encuentra a una temperatura muy alta (*Gomez-200*).
- 4. Combustión de la fracción sólida:** En el sector final del horno, el carbón caliente se encuentra con un flujo de aire, con lo que se inflama y arde. Esta combustión permite mantener la temperatura necesaria para que continúe el proceso. La totalidad del oxígeno del aire que entra por el extremo caliente del horno es consumido en el proceso de combustión. Esto permite que el gas que sale por el otro extremo del horno tenga una

composición carente de oxígeno, y rica en gases combustibles. Otra consecuencia es que el volumen de gas combustible producido es mínimo, lo que facilita su tratamiento de cara a realizar una combustión más limpia (Gomez-200).

2.6.5 Gasificador de flujo cruzado

Los gasificadores de flujo cruzado o tiro transversal son una adaptación de los gasificadores de lecho móvil para el empleo de carbón vegetal. La gasificación de carbón vegetal produce temperaturas muy elevadas (superiores a 1500 °C) en la zona de oxidación que pueden producir problemas en los materiales. En este tipo de gasificadores el propio combustible sirve de aislamiento contra estas altas temperaturas [Martínez 2008].

2.7 Eficiencia del Gasificador

Un factor importante que determina el funcionamiento técnico real y la viabilidad económica de utilizar un sistema de gasificador, es la eficiencia de la gasificación. Una definición apropiada de la eficiencia de la gasificación si se emplea el gas para aplicaciones de motores es (Martínez 2008).

$$\eta_m = \frac{H_g \cdot Q_g}{H_s \cdot M_s} \times 100 (\%) \quad (2,6)$$

Donde:

η_m = Eficiencia de la gasificación (%) (Mecánica).

H_g = Valor calorífico del gas [kJ/m³].

Q_g = Flujo en volumen de gas [m³/s].

H_s = Valor calorífico inferior del combustible del gasificador.

M_s = Consumo de combustible sólido del gasificador [kg/s].

Dependiendo del tipo y diseño del gasificador y también de las características del combustible el rendimiento se establece entre el 60 y el 75%.

2.8 Características de los diversos gasificadores

Tabla 6. Tipos de Gasificadores.

| | Lecho fijo | | Lecho fluido | |
|-------------------------------------|---|---|--|------------------------------------|
| | Corriente descendente (downdraft) | Corriente ascendente (updraft) | Lecho burbujeante | Lecho circulante |
| Circulación del combustible | Descendente | Descendente | Contenido en el lecho | |
| Circulación del gas | Descendente | Ascendente | Ascendente | |
| Temperatura de reacción | 1000 °C | 1000 °C | Buen control de temperatura | 850 °C |
| Temperatura salida del gas | 800 °C | 250 °C | | Alta temperatura 850 °C |
| Distribución de temperaturas | Mala distribución | | Buena distribución | |
| Transferencia de calor | Mala transferencia de calor | | Muy buena transferencia de calor | |
| Velocidad del gas | | | baja | Alta recirculación sólidos inertes |
| Tiempo de residencia | Para sólidos: horas o días Para gases: segundos | | Para sólidos: minutos a segundos Para gases: segundos | |
| Perdida de carga | Baja | | Mayor que en el lecho fijo | |
| Arranque | Buen arranque | Arranque limitado | Arranca y para fácilmente | |
| Alquitranes | Poco alquitrán en el gas | Gas con contenido de alquitranes, fenoles y amoníaco. | Poco alquitrán en el gas. | |
| Alimentación del residuo. | Tamaño de la alimentación estricta, pellets (8 a 50 [mm]) lo más uniforme posible | | Partículas de tamaño diverso, distribución de partículas de 0,02 a 50 [mm] | |

Fuente: [Lleo-2008]

Principales requerimientos de un gasificador (Lleo-2008):

- El gas producido deberá estar libre de alquitrán, polvo y cenizas.
- Las pérdidas de energía deben ser relativamente bajas.
- El modo de operación será simple y adaptable a diferentes tipos de alimentación.
- Para evitar puntos fríos en la zona de oxidación, por donde pudieran "pasar" alquitranes sin craquearse, deben elegirse adecuadamente la velocidad del medio gasificante y la geometría de esta zona del gasificador.
- El tiempo de residencia de la biomasa en la zona de pirolisis debe ser suficiente para conseguir la máxima volatilización posible.
- Elección de los materiales de construcción para prever el efecto de altas temperaturas, corrosión, abrasión, etc.
- El movimiento de la biomasa y los gases. Debe ser estacionario, sin taponamientos ni zonas muertas.

En el siguiente cuadro se muestran las principales características de los tipos de reactores más utilizados.

Tabla 7. Características de los gasificadores más importantes.

| TIPO DE REACTOR | LECHO MÓVIL | LECHO MÓVIL | LECHO FLUIDIZADO | LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE |
|-----------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------------------|
| Modo de operación | Contracorriente | Corrientes paralelas | | Corrientes paralelas |
| Tamaño de partícula adecuado [mm] | 2-50 | 20-100 | 0-20 | 0,1 |
| Estado de las cenizas eliminadas | Sólido o líquido | Sólido | Sólido | líquido |
| Presión de trabajo [atm] | 1-30 | 1 | 1-70 | 1-70 |
| Capacidad de procesamiento [kg/h] | 100-500 | 100-800 | 600-6000 | |

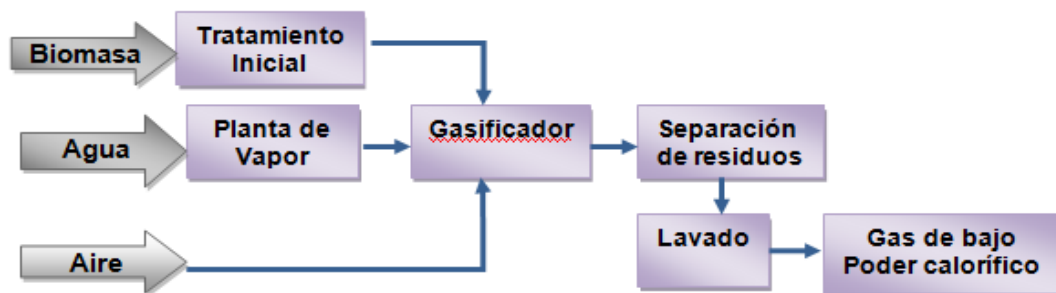
Fuente: [Aragón, 2009]

2.9 Agentes gasificante

Se denomina agente gasificante al gas que se utiliza en el proceso termoquímico de gasificación, para producir gas combustible a partir de un sustrato carbonoso. El agente gasificantes puede ser aire, oxígeno, vapor de agua o hidrogeno (Energías, 2009)..

- **Gasificación con aire:** El gas obtenido tendrá un contenido energético bajo debido a que está diluido con el N_2 del aire.

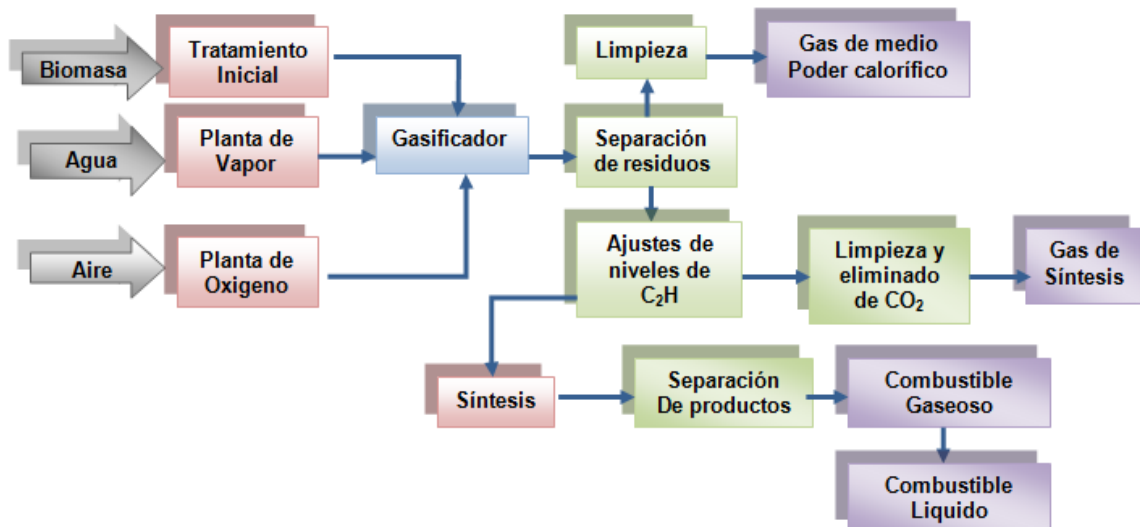
Figura 6. Esquema conceptual del proceso de gasificación con aire.



Fuente: (Energías, 2009).

- **Gasificación con oxígeno:** Tiene un contenido energético medio puesto que no se encuentra diluido en N_2 como el caso anterior.

Figura 7. Esquema conceptual del proceso de gasificación con oxígeno.



Fuente: (Energías, 2009).

- **Gasificación con aire / oxígeno + vapor de agua:** Se obtiene un gas enriquecido en H₂ y CO, por lo que aumenta el contenido energético del gas (Energías, 2009).
- **Gasificación con aire / oxígeno + catalizadores:** Aumentan el rendimiento de la conversión, aunque todavía se encuentran en fase de experimentación y tienen un tiempo de vida dentro del reactor demasiado corto (Energías, 2009).

En la tabla 8 se muestra las principales características de los agentes gasificantes.

Tabla 8. Características de los agentes gasificantes.

| AGENTE GASIFICANTE | VENTAJAS | DIFICULTADES TECNICAS |
|---------------------------|---|--|
| AIRE | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo costo. ✓ Combustión parcial de la biomasa que suministra la energía necesaria para el proceso. ✓ El contenido de partículas de alquitrán dependen del tipo de gasificador. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo poder calorífico del gas. ✓ El N₂ afecta la selectividad para el compuesto C₅ ✓ Dificultad en la determinación del factor de aire, un parámetro que determina el rendimiento. |
| VAPOR | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto poder calorífico del gas ✓ Altos niveles de los receptores H₂ de gas. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Requiere el suministro de calor extremo (caldera). ✓ Alta contenido de alquitrán en el gas, necesidad de utilizar catalizadores para la limpieza. |
| OXIGENO | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Falta de alquitrán y partículas en el gas como consecuencia de las altas temperaturas de operación. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Necesidad de la planta de separación de aire. ✓ Las altas temperaturas de gasificación. |
| DIÓXIDO DE CARBONO | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto poder calorífico del gas. ✓ Los valores altos de H₂ y CO en el gas | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Requiere calor indirecto. ✓ Requiere limpieza catalítica de gas. |

Fuente [Beaumont, 1987].

En la tabla 9 se muestra un comparativo de la composición media del gas obtenido cuando se emplean los diversos tipos de gasificantes:

Tabla 9. Composición media del gas para diversos agentes gasificantes.

| Agente gasificante | Poder calorífico superior (MJ/m ³) | Composición del gas (%) | | | | | | USO |
|--------------------|--|-------------------------|----|-----------------|-----------------|----------------|---|-----------------|
| | | H ₂ | CO | CO ₂ | CH ₄ | N ₂ | C | |
| Aire | Menor de 6 | 16 | 20 | 12 | 2 | 50 | | Combustible |
| Oxígeno | 10-20 | 32 | 48 | 15 | 2 | 3 | | Gas de síntesis |
| Vapor de agua | 10-21 | 50 | 20 | 22 | 6 | | 2 | Gas de síntesis |
| Hidrógeno | Mayor de 30 | | | | | | | Sustituto de |

Fuente [Aragón, 2009]

2.10 Factores de operación

Los factores de operación que influyen en el proceso de gasificación son los siguientes:

- **Temperatura:** La temperatura es un parámetro importante en todas las etapas, y por tanto en el rendimiento final del proceso. Las proporciones entre char y gas en los productos de pirólisis dependen estrechamente de la velocidad de calentamiento y de la temperatura final alcanzada. Como idea general puede decirse que a altas velocidades de calentamiento y alta temperatura final se produce gas, mientras que a temperaturas finales y velocidades de calentamiento menores se producen líquidos o sólidos.

En la etapa de gasificación, dada la reversibilidad de la mayoría de las reacciones, la temperatura influye en los equilibrios de reacción. En general para distintos combustibles puede decirse que el aumento de temperatura favorece el aumento del contenido en el gas producto de H₂ y CO en detrimento del CH₄ y del H₂O (EDAR, 2008).

- **Presión:** En general el aumento de presión desfavorece las reacciones de gasificación, aumentando las proporciones de hidrocarburos y alquitranes. Los gasificadores de lecho móvil suelen trabajar a presión atmosférica y los

de lecho fluidizado suelen trabajar a presión, alcanzándose hasta los 30 bars en algunos casos (EDAR, 2008).

- **Proporción Equivalente (ER):** Se define como el cociente entre la relación de agente gasificante y biomasa introducida en el reactor. Es uno de los parámetros más importantes en la gasificación, especialmente cuando está se autoabastece energéticamente mediante la oxidación parcial, con aire u oxígeno del residuo tratado.

Valores excesivamente bajos de este parámetro pueden no generar la cantidad suficiente de energía para mantener el proceso en las condiciones adecuadas, produciéndose una disminución del rendimiento. Por otro lado, cuando el agente gasificante es aire, existe además un efecto de dilución por parte del N₂. Por ello hay un valor óptimo de la relación gasificante/residuo para cada proceso, que depende básicamente de la composición del residuo gasificado (EDAR, 2008).

2.11 Limpieza y acondicionamiento del gas

El nivel de contaminantes presentes en el gas depende del proceso de gasificación y del tipo de biomasa utilizada. Los procedimientos de limpieza del gas deben aplicarse en función de las características y la calidad del gas con respecto al uso final del mismo. La concentración de impurezas en el gas varía de acuerdo al tipo de gasificador, como se muestra en la tabla 10 (Térmicos, 2009).

Tabla 10. Concentración de contaminates en el gas según el tipo de gasificador.

| TIPO DE GASIFICADOR | ALQUITRÁN (mg/m ³) | PARTÍCULAS SÓLIDAS (mg/m ³) |
|-------------------------------------|--------------------------------|---|
| Lecho móvil en contracorriente | 10000 -100000 | 100 -1000 |
| Lecho móvil en corrientes paralelas | 40 - 300 | 100 - 6000 |
| Lecho fluidizado y de transporte | 2000 -10000 | 10000 - 100000 |

Fuente: [Térmicos, 2009]

La elección del sistema para la limpieza de los gases depende de una serie de factores, tales como: la eficiencia de remoción, los gastos operacionales y de inversión, el espacio disponible, la temperatura, las características del gas, el tamaño de las partículas de la biomasa, entre otros.

En la tabla 11 se muestra la clave para eliminar las impurezas en estos procesos.

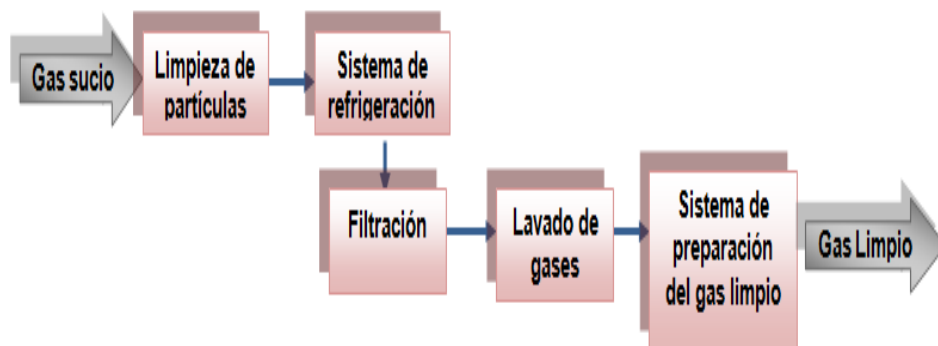
Tabla 11. Limpieza en los sistemas de gasificación.

| IMPUREZA, CONTAMINANTE | EJEMPLOS | SOLUCION, TECNOLOGIA |
|------------------------------|---------------------------------------|--|
| Tar | Aromáticos refractarios | Craqueamiento (catalítico y térmico) y remoción |
| Partículas solidas | Cenizas, carbono, material de la cama | Ciclones y filtros (de alta y baja temperatura) |
| Metales alcalinos | Compuesto de Na y K | Control de la temperatura de condensación, filtro |
| Nitrógeno del combustible | Amoniaco y HCN | Lavar |
| Compuestos de azufre y cloro | HCL Y H ₂ S | Capturas (CaCO ₃ , MgCO ₃) y lavado |

Fuente: (Adaptado de Bridgwater, 2007)

El gas obtenido debe ser acondicionado para su posterior uso, en la figura 8 se muestra el proceso al que es sometido el gas para retirar o eliminar los contaminantes, que pudieron haber sido arrastrados en el proceso de gasificación.

Figura 8. Proceso de limpieza del gas.



Fuente: Autores.

2.11.1 Sistemas de enfriamiento

A la salida de la cámara de reacción la temperatura del gas se sitúa en torno a 1550°C. Dado que los sistemas de limpieza del gas trabajan a baja temperatura, es necesario su enfriamiento. El enfriamiento se produce en tres etapas (Martínez 2008):

- 1550 – 800 °C. Se realiza por mezcla directa con un gas de recirculación (gas de quench) a 235 °C. La temperatura de 800 °C asegura que las cenizas volantes ya se encuentran en estado sólido, evitando así su condensación sobre las superficies de intercambiador de calor.
- 800 – 400 °C. Caldera de convección, generando vapor de alta presión.
- 400 – 235 °C. Segunda caldera de convección, generando vapor de media presión

Los refrigeradores del gas corresponden a tres categorías:

- Refrigeradores de convección natural.
- Refrigeradores de convección forzada.
- Refrigeradores de agua.

Los refrigeradores de convección natural consisten simplemente en una cierta longitud del tubo. Son sencillos de emplear y limpiar, no requieren aporte adicional de energía. Mientras que los refrigeradores de convección forzada van equipados con un ventilador que fuerza la circulación del aire refrigerado alrededor de los tubos de gas (Martínez 2008).

Hay refrigeradores de agua de dos tipos, el lavador de gases y el intercambiador de calor, independientemente de que se utilice uno u otro, el objetivo es generalmente enfriar y limpiar el gas en una sola operación (Martínez 2008).

Existen lavadores de gases de tipos muy diferentes, pero el principio siempre es el mismo: se lleva el gas en contacto directo con un medio fluido (generalmente

agua) que se rocía en la corriente de gas por medio de un dispositivo de inyección apropiado (Martínez 2008).

2.11.2 Eliminación de partículas sólidas

Las partículas sólidas que puedan haber sido arrastradas con el gas deben ser retiradas inmediatamente, para proteger los demás equipos de la erosión y la corrosión. Los sistemas de eliminación de partículas sólidas más usuales son: los ciclones, los filtros de mangas y los filtros electrostáticos (Martínez 2008).

- a) **Los ciclones:** Se utilizan para la eliminación de las partículas de mayor tamaño, es decir partículas con diámetro superior a 5 [μm], utilizándose como un proceso de prefiltrado.

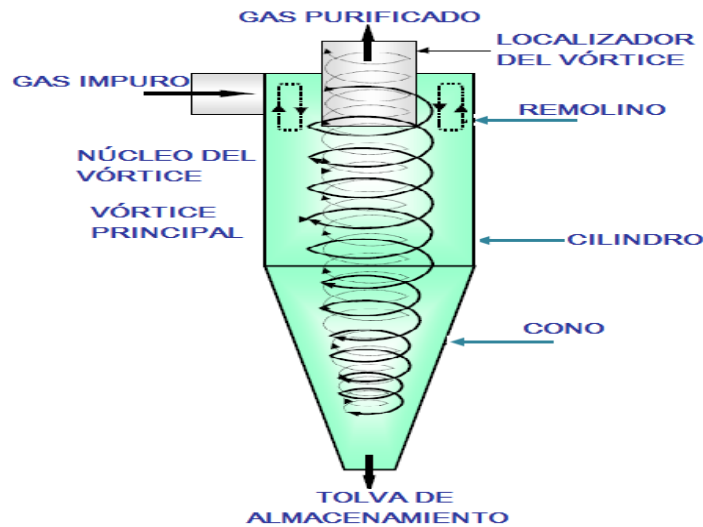
La corriente gaseosa cargada con partículas sólidas se introduce tangencialmente en el recipiente cilíndrico a velocidades de aproximadamente 30[m/s], saliendo gas limpio a través de una abertura central situada en la parte superior (Martínez 2008).

A través de la rápida rotación del flujo de aire, las partículas son desplazadas por acción de la fuerza centrífuga hacia las paredes del ciclón, lo que permite que las partículas más pesadas se desprendan del flujo de aire siendo impulsadas hacia la pared donde se juntan entre sí y forman aglomerados que sedimentan y son eliminados por el punto de salida inferior del ciclón (Figura 9). En la base del ciclón, el gas se vuelve moviéndose en espiral hacia arriba y saliendo por la parte superior del equipo (Martínez 2008).

La eficiencia de un ciclón está determinada en gran medida por su tamaño. Se ha comprobado que los ciclones de menor diámetro son los que proporcionan mejores eficacias en la separación de partículas. Según este criterio se consideran los siguientes tipos (Martínez 2008):

- Muy eficientes (98 - 99%).
- Moderadamente eficientes (70- 80%).
- Baja eficiencia (50%).

Figura 9. Esquema de funcionamiento de los ciclones.



Fuente: [Gruber Hermanos S.A]

Tabla 12. Ventajas y desventajas del uso de los ciclones.

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajos costes de inversión. ✓ Ausencia de partes móviles: <ul style="list-style-type: none"> ➢ Mantenimiento reducido ➢ Bajos costes de operación ✓ Facilidad de operación. ✓ Aplicable tanto a líquidos como a polvos. ✓ Capaz de trabajar con elevadas cargas de polvo ($[kg/m^3]$). ✓ Relativamente baja caída de presión (5-15 cm de H_2O) en comparación con la cantidad de PM recogida. ✓ Las limitaciones en la presión y la temperatura dependen únicamente de los materiales de construcción. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Eficacias de captación de PM relativamente pequeñas, especialmente para partículas inferiores a $10 [\mu m]$. ✓ Incapacidad para manejar materiales húmedos o pegajosos. ✓ Las unidades de alta eficacia presentan elevadas caídas de presión. |

Fuente: [Partículas, 2009].

b) Los filtros de mangas: Se emplean para eliminación de partículas más pequeñas. La separación del sólido se efectúa haciendo pasar el aire con partículas en suspensión mediante un ventilador, a través de la tela que forma la bolsa, de esa forma las partículas quedan retenidas entre los intersticios de la tela formando una torta filtrante, de esta manera la torta va engrosando con lo que aumenta la pérdida de carga del sistema (*Emison, 2009*).

- **Operación de filtración**

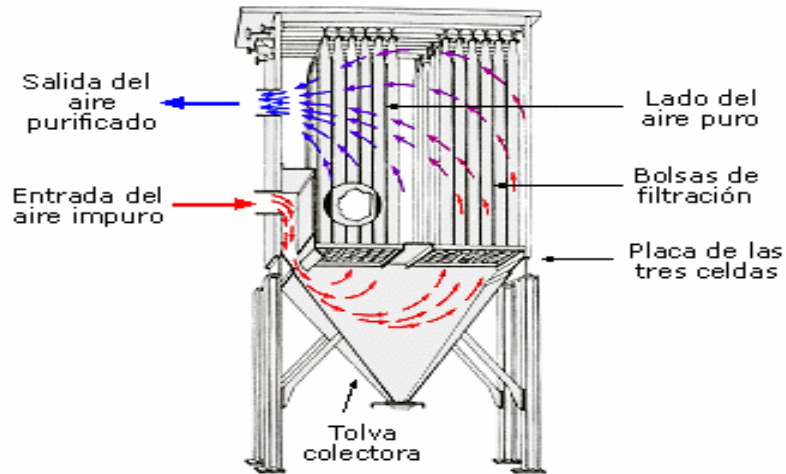
- ✓ Una corriente de gas cargado entra al equipo, choca contra una serie de paneles y se divide en varias corrientes.
- ✓ Las partículas más gruesas se depositan directamente en el fondo de la tolva cuando chocan contra dichos paneles.
- ✓ Las partículas finas se depositan en la superficie del tejido cuando el gas pasa a través de la bolsa.
- ✓ Una vez que el gas ha sido filtrado, este fluye (ya limpio) a través de la salida (*Emison, 2009*).

- **Operación de limpieza**

- ✓ Las partículas depositadas en la superficie de la bolsa se sacuden durante un breve periodo de tiempo por medio de aire comprimido inyectado desde una tobera hacia la bolsa, o bien de manera mecánica.
- ✓ El chorro de propulsión actúa periódicamente mediante un controlador automático de secuencia.
- ✓ El polvo recogido en el fondo de la tolva se descarga mediante un transportador de tronillo helicoidal y una válvula rotativa (*Emison, 2009*).

En la figura 10 se muestra el funcionamiento del filtro de mangas.

Figura 10. Filtro de mangas.



Fuente: [Partículas, 2009]

Tabla 13. Ventajas y desventajas del uso de los filtros de mangas.

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta eficacia de recolección en un amplio intervalo de tamaños de partículas. ✓ Elevada flexibilidad de diseño por la disponibilidad de distintos medios filtrantes y sistemas de limpieza. ✓ Amplio intervalo de capacidades de tratamiento: desde 3 [m³/min] hasta 140.000 [m³/min]. ✓ Caídas de presión y requisitos de potencia razonables. ✓ El material se recupera en seco para usos posteriores o eliminación final. ✓ Posibilidad de recirculación del aire filtrado. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Posibilidad de incendio o explosión por chispas en las proximidades del filtro. ✓ Necesidades de mantenimiento (reposición de las mangas). ✓ Incapacidad para manejar materiales húmedos por problemas de limpieza de las mangas. |

Fuente: [Partículas, 2009]

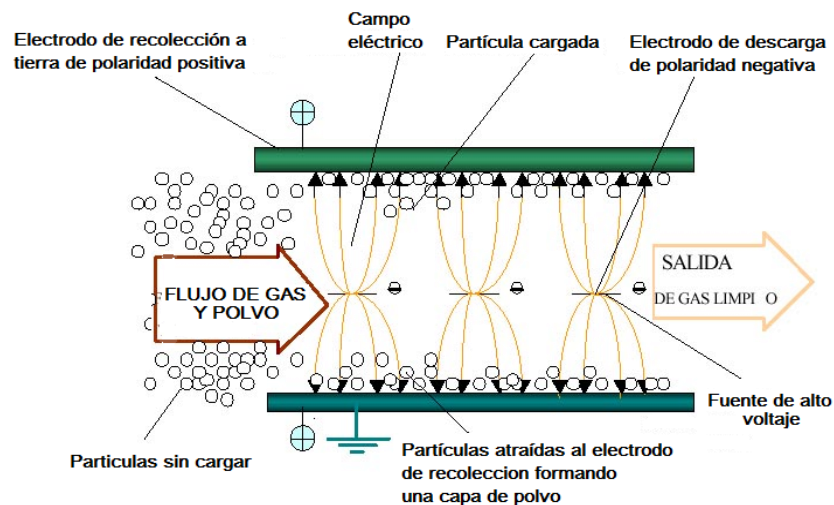
c) Precipitadores electrostáticos: Son equipos de recolección de partículas de polvo y gotas mediante la acción de un campo eléctrico intenso sobre las partículas previamente cargadas. El proceso de precipitación consta de tres etapas fundamentales (Treviño-2009):

- a. Carga electrostática de las partículas.
- b. Recolección de partículas sobre las placas del precipitador.
- c. Evacuación del material recolectado.

Los precipitadores electrostáticos están especialmente indicados en los casos que requieran una elevada eficacia de tratamiento de grandes caudales de gases con partículas pequeñas en su seno y con temperaturas elevadas (hasta 700 °C). La pérdida de carga de la corriente gaseosa es muy pequeña en comparación con la de otros equipos, situándose en torno a 2-12 [mm] de columna de agua (Treviño-2009).

En la siguiente figura se muestra el funcionamiento de los precipitadores electrostáticos

Figura 11. Precipitador Electroestático.



Fuente: [Partículas, 2009]

Los gases sucios pasan a través de un campo eléctrico de polaridades opuestas. El precipitador consta de dos sistemas de electrodos: el electrodo de emisión (o de descarga) y el de precipitación. El electrodo de emisión está unido al polo negativo de un rectificador, mientras que el electrodo de precipitación está conectado eléctricamente a tierra, cerrando el circuito.

Estos electrodos se sitúan en el interior de un tubo cilíndrico o entre placas que constituyen el electrodo de precipitación. Al aplicar una corriente continua de alto voltaje sobre el fino alambre se producen descargas eléctricas locales. Los electrones libres dotados de una gran energía eléctrica chocan con las moléculas de gas, produciendo numerosos iones positivos y negativos en esta zona (Treviño-2009).

Tabla 14. Ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos.

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevada eficacia de recolección (mayor 99.9%) en partículas de todos los tamaños, incluyendo submicrones. ✓ Elevada versatilidad: funcionamiento eficaz en casi todos los procesos industriales. ✓ Pequeña pérdida de presión. Reducida potencia del ventilador. ✓ Caída de presión constante y funcionamiento variable. ✓ Adaptabilidad: tolera fluctuaciones en las condiciones de operación, incluso temperatura extrema. ✓ Mantenimiento normal de las partes internas durante paradas programadas. ✓ Elevada durabilidad. Efectos de abrasión insignificantes. ✓ Consumo de energía de 20 – 60 Kw/100.000 pie³ de gas. | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Pueden no operar a la eficacia de su diseño original. ✓ Operación compleja. Personal especializado. ✓ Inversión elevada. ✓ Eficacia altamente dependiente de las propiedades de la corriente a tratar. Diseño complejo. |

Fuente: [Partículas, 2009]

2.11.3 Filtración de cenizas volantes

El gas tras ser enfriado, pasa por los filtros que reducen al mínimo su contenido en partículas.

A la salida de los filtros, parte del caudal de gas (235.000 – 325.000 [Nm³/h]) se comprime en un compresor centrífugo, y se recicla al gasificador como gas de enfriamiento (Treviño-2009).

2.11.4 Lavado de gases ácidos

El lavado físico con agua del gas bruto restante es un dispositivo tipo venturi, permite retener compuesto contaminantes (HCl, HF, NH₃, HCN y parcialmente H₂S y CO₂), así como las partículas solidas no extraídas en caso de fallo en los filtros. El control del pH del proceso de lavado se realiza con una solución acuosa de NaOH al 15%. Los posibles sólidos presentes en el agua de lavado se podrían separar en unos filtros de control de sólidos (*Treviño-2009*).

El agua arrastrada en el lavado es recirculado a través de un separador. Para evitar un aumento continuo del contenido en contaminantes de dicha agua, una parte es extraída del circuito y sometida a un tratamiento de limpieza mediante desorción de gases en condiciones de baja presión. El sistema de desorción consiste en una columna acida, para separar CO₂, H₂S y HCN, y una columna básica para separar NH₃. Los gases se envían a la planta Claus de recuperación de azufre, y el agua pasa a la planta de tratamiento de efluentes para su depuración final (*Treviño-2009*).

2.11.5 Eliminación de Alquitranes

Los alquitranes son los compuestos orgánicos de carácter aromático presentes en el gas de gasificación (excluyendo los hidrocarburos C1- C6). Pueden detectarse más de 50-100 compuestos diferentes.

La cantidad de alquitranes generados depende de numerosos parámetros del proceso:

- Características de la biomasa (tipo, humedad, tamaño de partícula).
- Condiciones de gasificación (temperatura, presión, tiempo de residencia del gas, velocidad de calentamiento de la biomasa).

El factor fundamental en la generación de alquitranes es la temperatura del gasificador. Conforme aumenta la temperatura menor es la cantidad de alquitranes, aunque la composición de estos también se modifica (*Emison, 2009*).

Los alquitranes pueden causar incrustaciones y corrosión en los motores y turbinas, la reducción de la eficiencia de la misma y el aumento de la frecuencia de mantenimiento (Emison, 2009).

Para la eliminaciones de los alquitranes existen dos opciones, destruir los alquitranes o separarlos del gas. Para destruirlos se puede utilizar el craqueo catalítico o térmico. Para separarlos se puede usar la vía húmeda. Esto consiste en hacer disminuir la temperatura del gas de manera que el agua condense en las partículas de alquitrán. Así se incrementa su tamaño y se facilita el proceso de aglomeración (Emison, 2009).

En el siguiente cuadro se muestran las diferentes tecnologías aplicadas a la remoción de alquitrán.

Tabla 15. Eficiencia en la remoción de alquitrán con diferentes tecnologías.

| TECNOLOGIA | EFICIENCIA EN LA ELIMINACION |
|----------------------------|---|
| Torres de lavado | <ul style="list-style-type: none"> ✓ 11-25% Alquitrán pesado ✓ 40-60% Hidrocarburos poliaromáticos ✓ 0-60% Fenoles |
| Lavador Venturi | ✓ 50-90% |
| Venturi + torres de lavado | ✓ 83-99% material condensable |
| Ciclón + demister | ✓ 93-99% material orgánico |
| Lavador tipo vortex | ✓ 66-78% residuos evaporados |

Fuente: [Hasler - Nussbaumer, 1999]

2.11.6 Secado

A la entrada del secador el gas se encuentra saturado de humedad o vapor, Mediante un equipo de refrigeración (evaporador, compresor, condensador y válvula) se hace descender la temperatura del gas hasta la temperatura deseada (5 °C), por lo cual parte de la humedad presente condensa. De este modo se consigue una sequedad del gas. (EDAR, 2008).

3. TECNOLOGÍAS IMPLEMENTADAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍAS

Para la generación de energía (eléctrica, mecánica, térmica, química) a partir de gasificar la biomasa, se utilizan tecnologías como la turbina de gas y el motor Stirling, con el fin de obtener energías con un alto grado de eficiencia y bajo nivel de contaminación.

A continuación se describirá las dos tecnologías a implementar, exponiendo sus ciclos y funcionamientos de los mismos.

3.1 TURBINA DE GAS

Una turbina de gas es una turbo máquina capaz de generar potencia mecánica a partir de la combustión de una mezcla de combustible y aire en determinadas condiciones de presión.

En la turbina de gas entra aire y combustible que suele ser gas natural, gas proveniente de la gasificación de la biomasa o gasificación del carbón. El aire se inyecta en la turbina y se comprime al pasar en el compresor, una vez comprimido pasa a la cámara de combustión donde se añade combustible, quemándose y produciendo gas caliente, el calor generado por la combustión aumenta la presión dentro de la cámara produciendo una expansión de los gases a través de la sección de turbina, a medida que los gases pierden presión ganan velocidad, esta energía la aprovechan los alabes de la turbina haciendo que esta gire, permitiendo al generador producir energía eléctrica. (Blog de tecnología, 2008)

3.1.1 Tipos de turbinas de gas

Las turbinas a gas se pueden clasificar como: (Álvarez–Callejón, 2002).

- Tipo de ciclo termodinámico
- Modo de entrega de energía
- Disposiciones mecánicas
- Tipo de aplicación de la turbina de gas

3.1.2 Tipos de ciclo termodinámico

El ciclo termodinámico que realiza una turbina de gas puede diferenciarse en la forma como entrega calor al ciclo termodinámico:

- Aporte de calor a presión constante
- Aporte de calor a volumen constante

“La turbina de gas con aporte de energía a presión constante sigue el esquema básico de la turbina de gas (compresor, cámara de combustión y turbina) y sigue el ciclo Brayton. En este aporte, el flujo de gas es constante, y en ningún momento se interrumpe.

La turbina con aporte de calor a volumen constante sigue el ciclo Holzward, presenta un rendimiento teórico más elevado y necesita un compresor mucho más pequeño. Sin embargo, presenta desventajas tales como que el fluido ha de ser confinado en un recinto durante la combustión y, por tanto, la generación de energía deja de ser continua, obteniéndose un flujo pulsatorio que origina problemas de vibraciones” (Álvarez–Callejón, 2002).

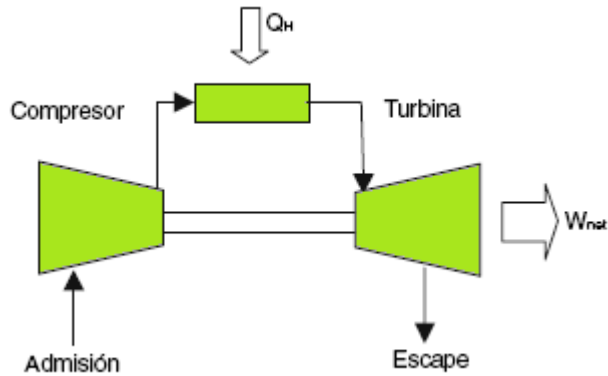
3.1.3 Suministro de energía al ciclo

En función del suministro de energía, se pueden tener dos tipos de turbinas:

- Turbina de ciclo abierto.
- Turbina de ciclo cerrado.

En las turbinas de ciclo abierto, motor endotérmico, (figura 12), el suministro de calor es rápido, ya que proviene de la combustión del combustible y del aire (Álvarez –Callejón, 2002). Este aire en condiciones ambientales se conduce al compresor (donde la temperatura y presión son elevadas), siguiendo hacia la cámara de combustión (donde el combustible se quema a presión constante), el gas caliente resultante entra a la turbina (se expanden a presión atmosférica produciendo potencia), los gases omitidos son expulsados hacia la atmósfera (Luna, 2005).

Figura 12. Turbina de ciclo abierto.

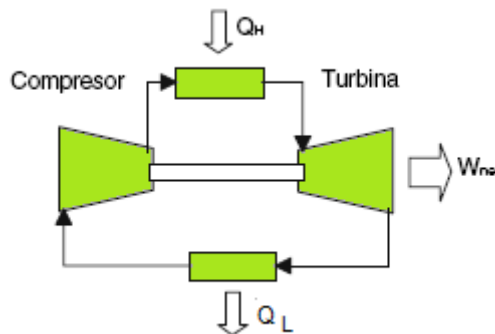


Fuente: [Álvarez –Callejón, 2002].

“En las turbinas de ciclo cerrado, motor exotérmico (figura 13), el suministro de calor es lento porque interviene la transferencia de calor. El fluido de trabajo circula en un circuito cerrado y no hay descarga a la atmósfera. La energía necesaria para calentar el fluido se obtiene mediante un fluido auxiliar que cede posteriormente el calor al fluido motor mediante un sistema de intercambio.

Este tipo de turbina presenta la posibilidad de utilizar un fluido motor de alta densidad, y no aire, pues al no conllevar los gases de combustión eliminan el riesgo de deterioro de los alabes de la turbina. Puede utilizar también combustibles de baja calidad, por ser exotérmico” (Álvarez –Callejón, 2002).

Figura 13. Turbina de ciclo cerrado.



Fuente: (Álvarez –Callejón –Agramunt 2002).

3.1.4 Disposiciones mecánicas

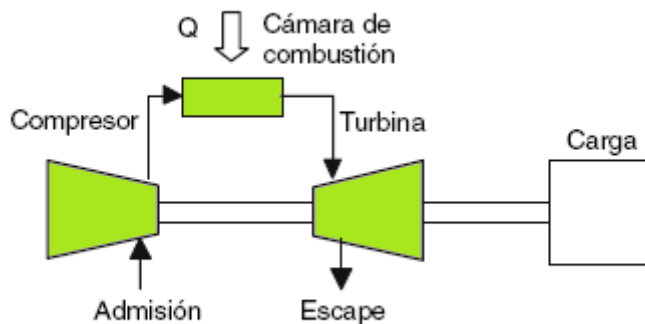
Existen variaciones del esquema clásico de la turbina de gas (compresor, cámara de combustión y turbina), y se debe a la adición componentes de entrada y salida al generador de gas. En aplicaciones industriales, en donde se debe obtener, potencia mecánica, existen diferentes disposiciones, en función del acoplamiento entre la turbina de potencia y el generador de gas se puede considerar (Álvarez – Callejón, 2002):

- Turbinas de un solo eje
- Turbinas de un doble eje o eje partido, con unidad generadora de gases simple o compuesta.

3.1.4.1 Turbinas de un solo eje

En la figura 14 se muestra el esquema de la turbina de gas de un solo eje.

Figura 14. Turbina de un solo eje.



Fuente: [Álvarez –Callejón, 2002].

“En la figura 14, se observa que la turbina de gas consta de un compresor y una turbina, que forzosamente giran a la misma velocidad, y no será otra que la del eje de obtención de potencia mecánica, donde irá conectada la carga. Es un montaje adecuado para el accionamiento de alternadores, ya que tienen una buena

adaptación a las variaciones de cargas y mantienen la frecuencia de giro” (Álvarez – Callejón, 2002)

El proceso que lleva a cabo la turbina de gas para producir potencia mecánica es el siguiente (Rapun, 1999):

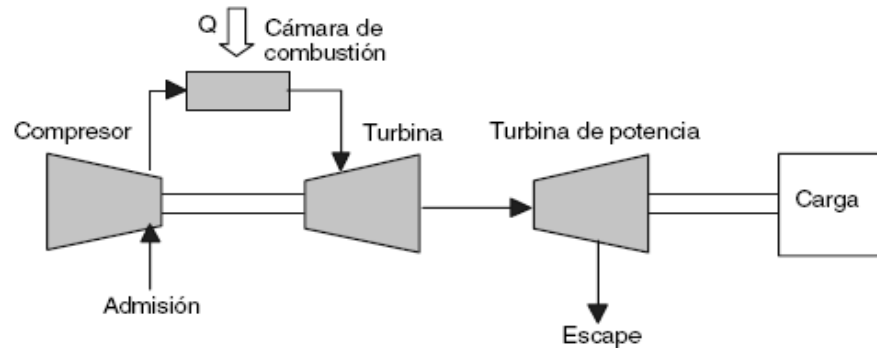
- En el compresor se comprime cierta cantidad de aire desde las condiciones ambientales hasta una relación de compresión adecuada. Tomando valores típicos para la relación de compresión del orden de 10 a 18.
- El aire es conducido hasta la cámara de combustión donde es mezclado con el combustible y se produce una combustión isóbara.
- Los gases resultantes de la combustión (temperaturas del orden de 1260 °C), se expanden en la turbina hasta una presión ligeramente superior a la atmosférica debido a las pérdidas de carga en el escape. Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan hacia fuera (no se recirculan), lo que provoca que el ciclo se clasifique como un ciclo abierto.

3.1.4.2 Turbina de eje partido o doble eje

Son turbinas de gas en las que se pueden observar, en la misma turbina, dos unidades, la generadora de gas que está formada por el compresor, la cámara de combustión y una turbina que simplemente extraerá la potencia necesaria para mover el compresor. La otra unidad es la de potencia, que está formada por una turbina de expansión, montada en un eje independiente y acoplado a la carga, que en este caso sería un generador eléctrico (Álvarez –Callejón, 2002).

“Este montaje (figura 15) es adecuado para el accionamiento directo de maquinaria, ya que al girar la turbina de potencia a una velocidad inferior a la del generador de gases, permite reducir el tamaño del reductor de velocidad e incluso prescindir de él” (Álvarez –Callejón, 2002).

Figura 15. Turbina de eje partido.



Fuente: [Álvarez–Callejón, 2002].

Para obtener el trabajo útil de una turbina de gas, el fluido motor sigue un ciclo de trabajo termodinámico a su paso por el motor. En la mayoría de las aplicaciones de la turbina de gas el fluido motor sigue el ciclo Brayton.

3.1.5 Ciclo Brayton

Es el ciclo teórico que implementa la turbina de gas; consta de las siguientes evoluciones que se esquematizan a continuación y se observan en la figura 16 (Álvarez–Callejón, 2002).

1. Compresión adiabática (trayectoria 1-2), se produce una compresión en la que apenas se pierde calor, su trabajo de compresión se expresa en la ecuación (3,1).

$$W_c = m \times (h_2 - h_1) = m \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad (3,1)$$

W_c : Trabajo de compresión [kJ]

m : Masa [kg]

C_p : Calor específico a presión constante [kJ/(kg*K)]

h_1, h_2 : Entalpía específica de entrada y salida del compresor respectivamente [kJ/kg]

(T_1, T_2) : Temperatura de entrada y salida del compresor [K]

2. Suministro de calor a presión contante (trayectoria 2-3), el calor transferido se expresa como:

$$Q_H = m \times (h_3 - h_2) \quad (3,2)$$

Q_H : Transferencia de calor de entrada [kJ]

h_2, h_3 : Entalpía específica de salida del compresor y entalpía en la cámara respectivamente [kJ/kg]

3. Expansión adiabática (trayectoria 3-4), en la que el fluido cede el trabajo:

$$W_T = m \times (h_3 - h_4) = m \times C_p \times (T_3 - T_4) \quad (3,3)$$

(W_T): Trabajo de expansión [kJ]

T_3, T_4 : Temperatura en la cámara y en salida de los gases respectivamente [K]

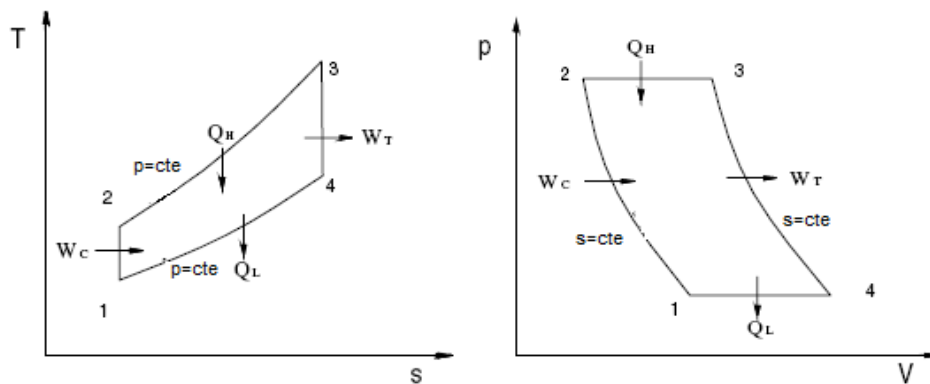
h_3, h_4 : Entalpía específica en la cámara y en la salida respectivamente [kJ/kg]

4. Extracción de calor a presión constante (trayectoria 4-1).

$$Q_L = m \times (h_1 - h_4) \quad (3,4)$$

Q_L : Transferencia de calor de salida [kJ]

Figura 16. Diagrama T-S y P-V del ciclo Brayton.



Fuente: [Álvarez-Callejón, 2002].

El trabajo neto realizado por unidad de masa es la diferencia entre el trabajo obtenido en la expansión y el trabajo invertido en la compresión, es decir (Álvarez – Callejón, 2002):

$$W_{NETO} = W_T - W_C \quad (3,5)$$

La expresión del rendimiento del ciclo ideal es, en función de la temperatura y la presión:

$$\eta_T = \frac{W_{NETO}}{Q_H} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}} \quad (3,6)$$

$$r_{OPTIMO} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\left(\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}\right)} \quad (3,7)$$

Donde γ es el cociente de calores específicos a presión y volumen constante y r es la relación de compresión, es decir, el cociente entre la presión de salida y la presión de entrada del gas al compresor ($P_{m\acute{a}x}/P_{m\acute{i}n}$) (Álvarez – Callejón, 2002).

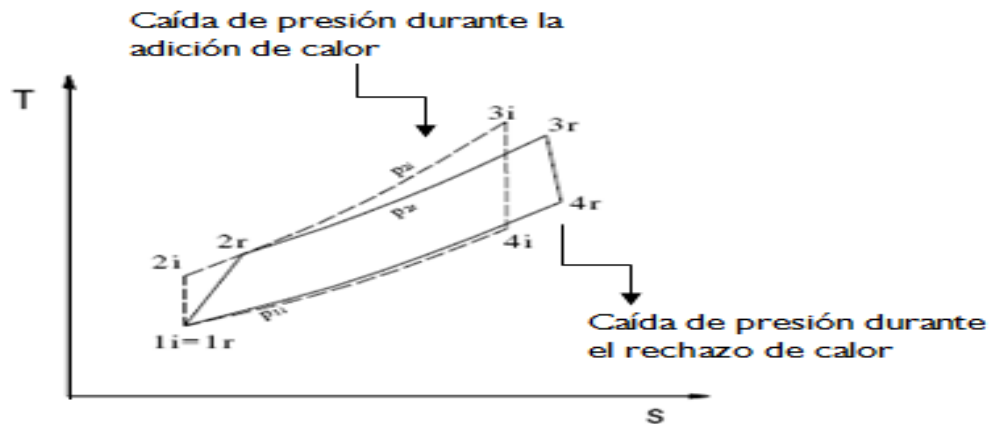
“En consecuencia, el rendimiento teórico del ciclo aumenta si (figura 16) (Álvarez – Callejón, 2002):

- Aumenta la relación de compresión, (existe una relación de compresión óptima que maximiza el rendimiento).
- Aumenta la temperatura máxima del ciclo.
- Se reduce la temperatura de entrada al compresor.
- Aumenta el cociente de calores específicos del fluido motor”.

Los ciclos de turbina de gas reales difieren del ciclo Brayton ideal por varias razones. Por un lado, cierta disminución de presión durante los procesos de adición y rechazo de calor son inevitables. La entrada de trabajo real al compresor será mayor y la salida de trabajo real de la turbina será menor debido a las irreversibilidades (Cengel-Boles, 2003).

La desviación de un ciclo real de una turbina de gas a partir del ciclo Brayton ideal, como resultado de las irreversibilidades se observa en la figura 17.

Figura 17. El ciclo ideal (i), real (r) de una turbina de gas.



Fuente: [Álvarez-Callejón, 2002].

“El rendimiento asociado al ciclo depende en la máquina real de los siguientes aspectos:

- Los procesos de compresión y expansión no son reversibles ni adiabáticos.
- El aporte de calor no se realiza a presión constante.
- Las pérdidas de carga debidas a la fricción del fluido.

Todas estas irreversibilidades hacen disminuir el rendimiento. El grado de irreversibilidad de los componentes se puede cuantificar al definir el rendimiento isotrópico, tanto para el compresor como para la turbina, y que compara, en el caso del compresor, el trabajo necesario si el proceso fuese reversible con el trabajo suministrado en caso real” (Álvarez-Callejón, 2002).

3.1.6 Compresor

El compresor es un componente diseñado para aumentar la presión de un fluido compresible como el aire. Sin importar cual sea el tipo de compresor, el principio de funcionamiento es el mismo. El fluido de trabajo que se encuentra a baja presión, entra en un conjunto de álabes móviles del compresor y sale a una gran

velocidad como resultado del trabajo transmitido por el eje. El fluido pasa a un difusor configurado de tal forma que la velocidad disminuye y la presión se incrementa (*Borgnakke-Sonntag-Van Wylen, 1998*).

Para caracterizar un compresor los parámetros que se deben tener presentes son el caudal de aire, el rendimiento interno o isentrópico, la velocidad de rotación y la relación de compresión (*Álvarez-Callejón, 2002*).

3.1.6.1 Compresor centrífugo

En el compresor centrífugo el flujo de aire sale del mismo en dirección radial respecto al eje de rotación del motor. Está formado por un rodete giratorio, que desempeña la función de impulsor (rotor) y un difusor fijo o voluta (estator) (*Álvarez-Callejón, 2002*).

“El aire entra al compresor cerca de su eje en dirección axial y es impulsado en forma radial por la fuerza centrífuga producida por el movimiento del rodete. El aire que sale radialmente y a gran velocidad del rodete, es tomado por el difusor donde la energía cinética del aire se transforma en energía potencial en forma de presión. El múltiple de distribución recoge el aire a presión y lo entrega a las cámaras de combustión” (*Máquinas, 2009*).

3.1.6.2 Compresor axial

El aire en un compresor axial, fluye en la dirección del eje del compresor acoplado al eje por medio de un disco y una serie de álabes fijos o álabes del estator acoplados a la carcasa del compresor y concéntrico al eje de rotación. Cada conjunto de álabes móviles y álabes fijos forman una etapa del compresor (*Máquinas, 2009*).

3.1.7 Cámara de combustión

La cámara de combustión es el elemento dentro del cual una mezcla de combustible y aire a alta presión se quema. Los gases que resultan del proceso de combustión pasan a la turbina con una temperatura uniforme (*MATTINGLY, 1996*).

“Para que el proceso de combustión se desarrolle correcta y eficientemente en una turbina de gas, la cámara de combustión debe cumplir con las siguientes funciones:

- “Proporcionar los medios necesarios para una adecuada mezcla del aire a alta presión y el combustible.
- Quemar eficientemente la mezcla de aire y combustible.
- Entregar a la turbina los gases con una temperatura uniforme que no sobrepase los límites de resistencia de los materiales con los cuales están contruidos los álabes del rotor y estator” (Máquinas, 2009).

3.1.8 Análisis del Proceso de Combustión

El proceso de la combustión ha de tener lugar en su totalidad, dentro de la cámara de combustión, a fin de evitar que los álabes de la turbina estén sometidos a las elevadas temperaturas de las llamas. Las turbinas de gas funcionan con un elevado exceso de aire para que la temperatura de los productos de combustión al incidir en los álabes no sea excesiva y no se produzcan excesivos problemas de corrosión o fatiga en los mismos, y mantener los efectos derivados de la deformación plástica dentro de límites aceptables. El índice de exceso de aire con el que trabajan las turbinas suele estar comprendido entre 2,75 y 5 (Álvarez – Callejón, 2002).

Las turbinas de gas pueden utilizar dos tipos de combustibles (Álvarez –Callejón, 2002):

- Gaseosos, gas natural, propano.
- Líquidos, gasóleo, gasolinas y en algunos casos fuel de bajo contenido en azufre.

Los combustibles empleados tienen que estar libres de partículas e impurezas sólidas para evitar cualquier tipo de erosiones en los álabes de la turbina. La

ausencia de azufre en la composición del combustible permite un nivel de recuperación del calor contenido en los gases de escape superior al que se puede conseguir con otros combustibles (Álvarez–Callejón, 2002).

Los combustibles líquidos presentan, frente a los gaseosos, otras desventajas como el sistema de filtrado que es más complicado; además es necesario atomizar el combustible a una presión elevada, resultando una menor calidad en la formación de la mezcla, por lo que el rendimiento de la turbina es algo inferior (Álvarez–Callejón, 2002).

3.1.9 Arranque de la turbina de gas

Para arrancar una turbina de gas es necesario acelerar el compresor hasta que suministre un gasto másico de aire capaz de mantener la combustión dentro de los límites de estabilidad. Esto se puede conseguir inyectando aire comprimido de una fuente exterior, directamente a la turbina que acciona el compresor. Sin embargo, normalmente se utiliza un motor eléctrico o una pequeña turbina de gas auxiliar conectado al eje principal mediante una caja reductora y un embrague. En el caso de la turbina de gas auxiliar, lo más común es que se accione mediante aire previamente comprimido (Álvarez–Callejón, 2002).

“Cuando el rotor ha sido accionado y se está introduciendo aire comprimido en la cámara de combustión se inicia la aportación de combustible y se acciona el sistema de ignición, que encenderá la mezcla, y estabilizara la llama” (Álvarez – Callejón, 2002).

“Una vez iniciada la combustión, si existen varias cámaras de combustión, la llama se propaga entre ellas para conseguir un funcionamiento estable y uniforme den la misma” (Álvarez–Callejón, 2002).

“El encendido de llama es crítico, ya que para un determinado caudal o gasto másico las relaciones aire-combustible a las que el mismo puede producirse están

más acotadas que las márgenes a los que se consigue la estabilidad de la llama”.
(Álvarez–Callejón, 2002).

3.1.10 Turbina

La turbina es la maquina térmica donde se extrae la energía de los gases de combustión, transformándola en energía mecánica (Luna, 2005).

La turbina está formada por una serie de etapas, cada una de las cuales consta de una rejilla de álabes fijos (distribuidor) y otra de álabes móviles (rueda) (Luna, 2005).

Los gases procedentes de la cámara de combustión circulan primero por los álabes fijos, donde la presión se transforma en velocidad debido a la selección convergente entre ellos. Al mismo tiempo, el flujo es desviado hacia los álabes de la rueda, en los cuales se originan las fuerzas que provocan la rotación. El tipo de fuerza realizada permite distinguir entre turbinas de acción y de reacción (Luna, 2005).

Los álabes estacionarios están fijos a dos anillos concéntricos formando las llamadas toberas, de los cuales el exterior está fijo a la carcasa de la turbina y en ocasiones, es la misma carcasa. Por su lado el rotor está formado por un disco móvil con álabes en su periferia (Luna, 2005).

Existen dos concepciones básicas de turbinas:

- Turbinas de flujo radial
- Turbinas de flujo axial

3.1.10.1 Turbina de flujo radial

“En su tamaño pequeño su uso está muy extendido en la industria criogénica como turbodilatador. Sin embargo, no resulta tan apta para las altas temperaturas que se ve sometida en una turbina de gas. Se utilizan sólo para potencias extremadamente bajas o cuando el tamaño compacto tiene más importancia que el rendimiento, puesto que las turbinas de flujo axial poseen mayor rendimiento

para todas las potencias, a excepción de las extremadamente bajas” (Álvarez – Callejón, 2002).

3.1.10.2 Turbina de flujo axial

“La turbina de flujo axial se utiliza casi siempre en motores de turbinas de gas. Puede estar formada por una o más etapas, consistiendo cada una de ellas en una hilera de tobera y un rotor, y al igual que el compresor, tanto el rotor como la tobera están formados por un conjunto de álabes, fijos en la tobera, y solidarios al rotor.

En la hilera de la tobera, el gas sufre una expansión en donde la velocidad tangencial aumenta en dirección de giro, con una caída por consiguiente en la presión estática. En la hilera del rotor la velocidad tangencial del flujo disminuye, a causa de una nueva expansión, aparte de ser desviado.

Por otra parte el grado de reacción, que es el cambio de entalpia o temperatura estática a través del rotor respecto al cambio de entalpia o temperatura total que experimenta el fluido a su paso por cada etapa de la turbina. Al trabajar con grados de reacción del 50% se minimizaran las perdidas en los álabes. También se define en las turbinas el rendimiento global, como el cociente entre los saltos de temperatura reales e isentropicos (si se realiza la expansión en forma ideal) que experimenta el fluido a su paso por la turbina” (Álvarez –Callejón, 2002).

3.2 Motor Stirling

El motor Stirling es un motor térmico muy diferente a los motores de combustión interna, inventado en 1816 por los hermanos Robert Stirling y James Stirling, teniendo el potencial de ser mucho más eficiente que los motores a gasolina o un motor diesel, siendo extremadamente silenciosos, debido a que no disponen de válvulas ni fases de explosión en su ciclo, evitando así ruidos y vibraciones. Los motores Stirling son máquinas con fuente de calor externa, con lo cual se pueden

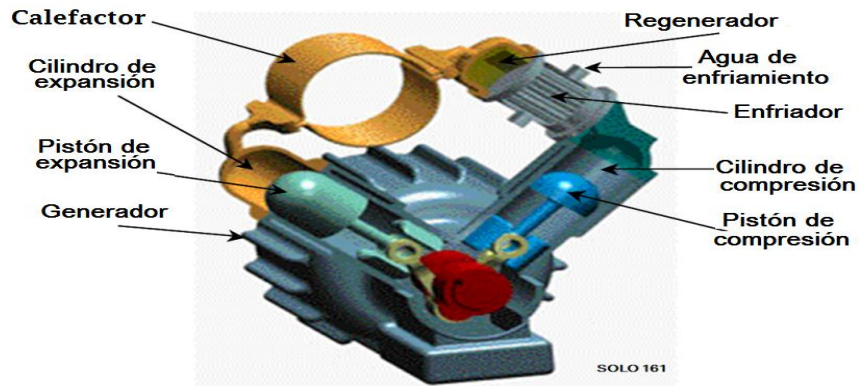
adaptar a cualquier fuente de energía (combustión convencional o mixta, como biomasa, gas, energía solar, etc.) (Cacho-Zamora, 2009).

Esta máquina es capaz de convertir el calor en trabajo o viceversa, a través de un ciclo termodinámico regenerativo, con compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo (aire, hidrogeno, helio o nitrógeno), operando entre dos temperaturas, la del foco caliente y la del foco frío, todos los motores de ciclo Stirling son motores de "**ciclo cerrado**". En estos motores existe una cantidad fija de gas en el interior, no variando ésta ni para aumentar ni para disminuir. Si se produjese por cualquier causa variación, el circuito no funcionaría por pérdida de compresión y por tanto de energía (Cacho-Zamora, 2009).

3.2.1 Funcionamiento ideal del motor Stirling

El motor Stirling consta de un cilindro que contiene un fluido y dos pistones opuestos separados por un regenerador que divide el cilindro en dos zonas, una fría y otra caliente. El regenerador es un medio poroso que es atravesado por el fluido absorbiendo y devolviendo calor, produciendo que el movimiento de los pistones sea sincronizado para obtener un trabajo útil. Obteniendo así trabajo a partir de cuatro procesos cíclicos consecutivos: aporte de calor, expansión con el aporte de calor de la fuente, extracción de calor hacia un acumulador térmico regenerativo y compresión con extracción de calor hacia el foco frío (Roberto Román, 2009).

Figura 18. Esquema del motor Stirling.



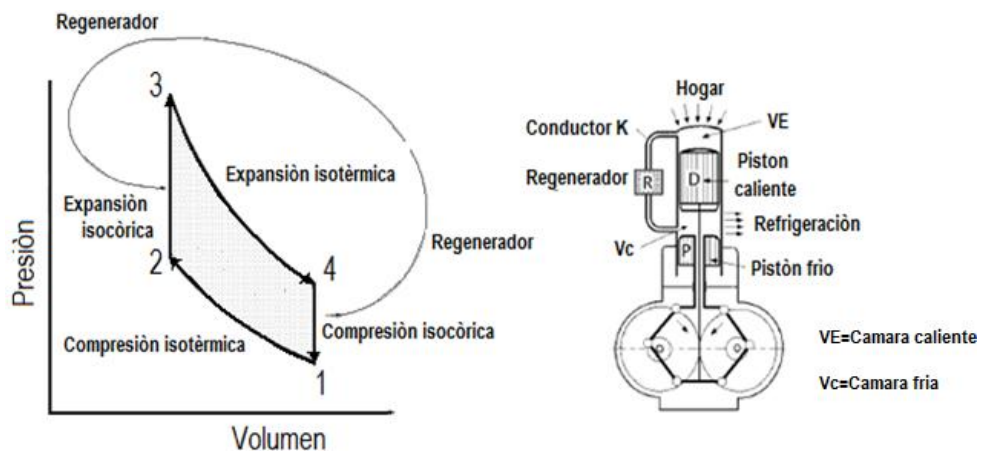
Fuente:[Silva, 2009]

Existen dos caminos extremos, el ciclo Stirling (evolución a volumen constante), y el ciclo Ericsson (evolución a presión constante). De ambos nace el ciclo Rallis, como una composición de ambos, a volumen constante y a presión constante, maximizando el trabajo (Roberto Román, 2009).

3.2.2 Ciclo Stirling

El ciclo Stirling Teórico está compuesto por dos evoluciones a Volumen constante y dos evoluciones isotérmicas, una a T_C “temperatura caliente” y la segunda a T_F “temperatura fría” mostradas en la figura 19. (Ernesto E., Velis R. A, 2002).

Figura 19. Ciclo y esquemas de un motor de aire caliente Stirling.



Fuente: [Alvarez-Callejón, 2002].

Se considera que las etapas asociadas a la variación de volumen se realizan de modo isotérmico, esto es, que durante el proceso de expansión se debe introducir calor al ciclo y durante la compresión se debe retirar calor, para poder conservar la misma temperatura en el transcurso de la etapa. También se tiene en cuenta que al operar el fluido a distintas temperaturas, se cumple que el calor asociado a su enfriamiento es el mismo que el asociado a su calentamiento, lo que permite introducir un elemento que retire y almacene calor cuando se ha expandido el fluido, y lo devuelva una vez se ha comprimido; con el fin de adaptar el fluido de trabajo a las condiciones requeridas de cada etapa isoterma. Dicho elemento es llamado regenerador (Ernesto E., Velis R. A, 2002).

En el ciclo Stirling si el regenerador tiene eficiencia igual a uno ($\epsilon=1$), tiene como rendimiento térmico el de Carnot, esto se debe a que los procesos a volumen constante absorben y ceden el mismo calor, es decir cubren áreas iguales en el diagrama T-S, pero el trabajo es mayor en el ciclo Stirling (Ernesto E., Velis R. A, 2002).

$$W^{\text{ciclo}}(\text{Stirling}) > W^{\text{ciclo}}(\text{Carnot}) \quad (4,4)$$

$$\eta_{\text{Stirling}} = \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \quad (4,5)$$

Expresiones para el cálculo del ciclo Stirling:

- Relación de compresión
- Presión máxima del ciclo en bar
- Características del gas (C_p, C_v) [$J/mol \cdot K$]
- Cilindrada (cm^3)
- Temperatura máxima [K]
- Temperatura mínima [K]
- Regeneración [%]

El objetivo es determinar el rendimiento y el trabajo por ciclo.

$$V_{\min} = \frac{\text{Cilindrada}}{\text{Relación de compresión} - 1} \quad (4,6)$$

$$V_{\max} = V_{\min} + \text{Cilindrada} \quad (4,7)$$

Imponiendo la presión máxima, fijado el volumen mínimo y conociendo la temperatura, se determina el número de moles:

$$n = \frac{P_{\max} \cdot V_{\min}}{RT_{\max}} \quad (4,8)$$

Con estos datos ya se pueden determinar las condiciones de temperatura, presión y volumen para cada punto del ciclo.

Tabla 16. Expresiones para el cálculo en cada punto del ciclo.

| Punto | Temperatura | Volumen | Presión |
|----------------|---------------------------------|------------|---------------------|
| 1 | T_c | V_{\max} | nRT_1/V_1 |
| 2 | T_c | V_{\min} | nRT_2/V_2 |
| 2 ¹ | $T_c + regeneracion(T_H - T_c)$ | V_{\min} | nRT_{2^1}/V_{2^1} |
| 3 | T_H | V_{\min} | nRT_3/V_3 |
| 4 | T_H | V_{\max} | nRT_4/V_4 |
| 4 ¹ | $T_H - regeneracion(T_H - T_c)$ | V_{\max} | nRT_{4^1}/V_{4^1} |

Fuente: [Alvarez –Callejón, 2002].

Estas son los símbolos que se van a utilizar en las ecuaciones:

Q: Calor suministrado

T_H: Temperatura de la fuente caliente

T_c: Temperatura de la fuente fría

R: Constante universal de los gases en función de la masa

V_F: Volumen final

V_i : Volumen inicial

P : Presión

W : Trabajo

μ : Rendimiento

n : Número de moles de gas en el volumen

C_V : Calor específico a volumen constante del gas

C_P : Calor específico a presión constante

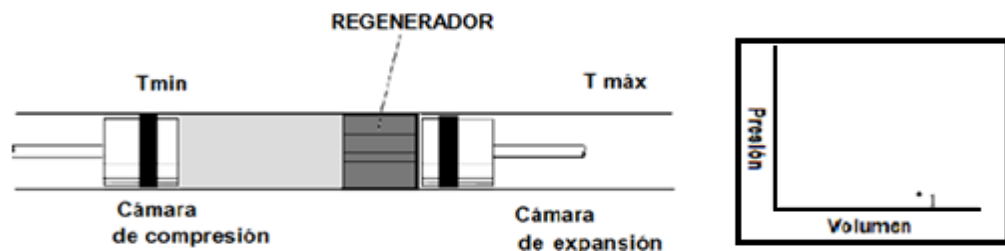
K : Relación de calor específico C_P/C_V .

3.2.3 Descripción del ciclo Stirling

El proceso al que se somete el fluido es el siguiente:

- a) En el punto 1 la totalidad del fluido se encuentra a baja temperatura en la cámara fría por lo que el volumen de esta cámara es máximo, mientras que la cámara caliente esta a volumen mínimo., pegado al regenerador. El regenerador se supone está cargado de calor, V_{max} y a P_{min} (Álvarez –Callejón, 2002).

Figura 20. Volumen máximo del fluido en la cámara fría del motor.



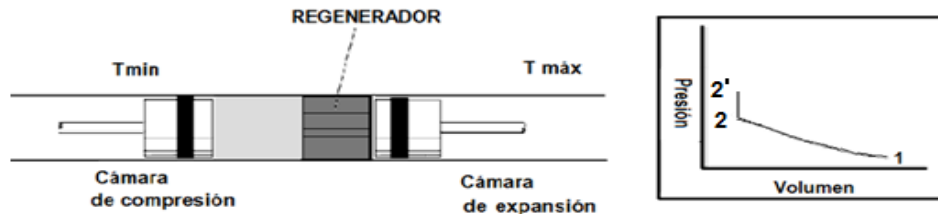
Fuente: [Autor]

- b) Entre 1 y 2: se realiza una compresión isotérmica a la temperatura más baja, donde se extrae la cantidad de Q_F de calor del cilindro "por el lado frío". El proceso se realiza a T_F constante. Por lo tanto al final del punto 2

estará a volumen mínimo V_{min} , T_F y P_2 . El pistón de la zona caliente no se ha desplazado. En esta evolución este sistema absorbe trabajo (Álvarez – Callejón, 2002).

$$Q_{1-2} = P_1 \cdot V_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (4,9)$$

Figura 21. Volumen mínimo del fluido en la cámara fría del motor.



Fuente: [Autor]

Se produce una aportación de calor a volumen constante (2-2'):

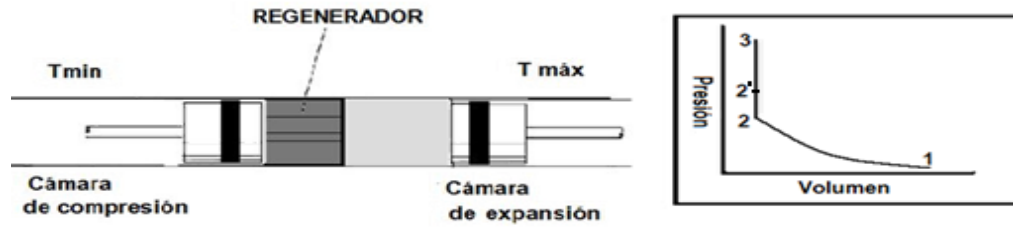
$$Q_{2-2'} = n \cdot C_v \cdot (T_{2'} - T_2) \quad (4,10)$$

- c) Entre 2' y 3 los dos pistones se desplazan en forma paralela. Esto hace que todo el fluido atraviese el regenerador. Al ocurrir esto, el fluido absorbe la cantidad Q' de calor y eleva su temperatura de T_F a T_C . obteniéndose un proceso isocoro en el que aumenta la presión sin cambiar el volumen. Por lo tanto al final en 3 se estará a T_C , V_{min} y P_3 . El regenerador queda "descargado". En esta evolución el trabajo neto absorbido es cero (salvo por pérdidas por roce al atravesar el fluido el regenerador) (Álvarez –Callejón, 2002).

Aportación de calor a volumen constante (2'-3):

$$Q_{2'-3} = n \cdot C_v \cdot (T_3 - T_{2'}) \quad (4,11)$$

Figura 22. Volumen mínimo del fluido en la cámara caliente del motor.



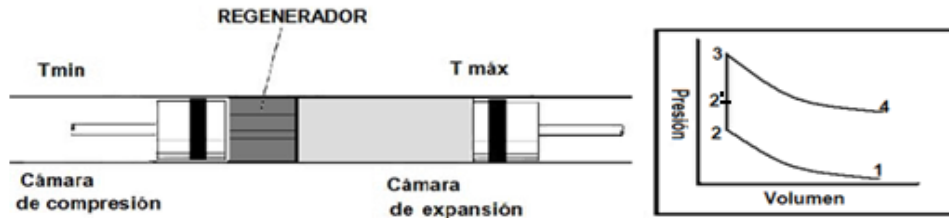
Fuente: [Autor]

- d) Entre 3 y 4 el pistón frío queda junto al regenerador y el caliente sigue desplazándose hacia un mayor volumen. Se absorbe la cantidad de calor Q_C y el proceso es idealmente isotérmico. Al final el fluido de trabajo está a T_C , el volumen es V_{max} y la presión es P_4 (Álvarez-Callejón, 2002).

Expansión isotérmica (3-4)

$$Q_{3-4} = P_3 \cdot V_3 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (4,12)$$

Figura 23. Volumen máximo del fluido en la cámara caliente del motor.



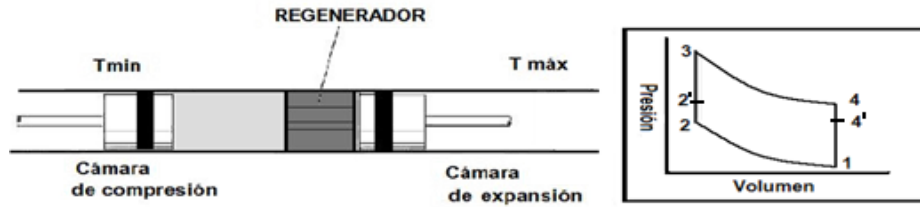
Fuente: [Autor]

- e) Finalmente los dos pistones se desplazan en forma paralela de 4 a 1, haciendo atravesar el fluido de trabajo al regenerador. Al ocurrir esto el fluido cede calor al regenerador, este se *carga de calor*, la temperatura del fluido baja de T_C a T_F y la presión baja de P_4 a P_1 . Al final de la evolución el fluido está a V_{max} , P_1 y T_F . El regenerador sigue "cargado" de calor (Álvarez-Callejón, 2002).

Extracción de calor a volumen constante (4-4')

$$Q_{4-4'} = n \cdot C_v \cdot (T_4 - T_{4'}) \quad (4,13)$$

Figura 24. Volumen máximo del fluido en la cámara fría del motor.



Fuente: [Autor]

Extracción de calor a presión constante (4'-1)

$$Q_{4'-1} = n \cdot C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (4,14)$$

Para valorar la incidencia de un comportamiento adiabático y no isotérmico, se ha calculado el trabajo que realizaría el fluido si se desplazara según una curva adiabática y no por una isoterma. Las expresiones utilizadas para el tramo 3-4 y 1-2 son las siguientes (Álvarez-Callejón, 2002):

$$Q_{adiab\ 3-4} = n \cdot C_v \cdot (T_H - T_{adiab\ 3-4}) \quad (4,15)$$

$$Q_{adiab\ 1-2} = n \cdot C_v \cdot (T_{adiab\ 1-2} - T_C) \quad (4,16)$$

$$T_{adiab\ 3-4} = T_H \cdot \left(\frac{V_{mín}}{V_{máx}} \right)^{k-1} \quad (4,17)$$

$$T_{adiab\ 1-2} = T_C \cdot \left(\frac{V_{mín}}{V_{máx}} \right)^{k-1} \quad (4,18)$$

Donde:

$$K = \frac{c_p}{c_v} \quad (4,19)$$

El trabajo adiabático es inferior al isotérmico al trasladarse del punto 3 al 4, y superior al isotérmico al realizar el recorrido de 1 a 2 por lo tanto, esta transformación adiabática afectaría al rendimiento y al trabajo, porque modifica tanto el calor aportado (3-4) como el extraído (1-2). El fluido tendería a comportarse entre las dos situaciones (Álvarez-Callejón, 2002).

3.2.4 Rendimiento del ciclo Stirling

“Cuando el ciclo teórico de Stirling trabaja con un gas ideal, tiene el rendimiento de Carnot, que es el máximo rendimiento que puede tener un motor térmico” (Delgado-2001).

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4,20)$$

“El rendimiento de un motor térmico es la relación existente entre el trabajo producido y el calor absorbido” (Delgado-2001).

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (4,21)$$

El trabajo producido será: $W = Q_1 - |Q_2|$ (4,22)

El calor absorbido es Q_1 . El rendimiento térmico del ciclo será:

$$\eta = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} \quad (4,23)$$

El proceso 1-2 se produce a temperatura constante por lo que Q_1 será:

$$Q_1 = W_{12} = \int_1^2 p dV \quad (4,24)$$

“Como trabajamos con un gas ideal $P V = n R T$, sustituyendo en la integral obtenemos” (Delgado-2001):

$$Q_1 = \int_1^2 \frac{n \cdot R \cdot T}{V} dV \quad (4,25)$$

$$Q_1 = n \cdot R \cdot T_{2 \leftrightarrow 1} \cdot \ln \frac{V_{1 \leftrightarrow 4}}{V_{2 \leftrightarrow 3}} \quad (4,26)$$

Como podemos ver en el diagrama P-V: $V_1=V_4$ y $V_2=V_3$.

El rendimiento será:

$$\eta = \frac{n \cdot R \cdot T_1 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) - n \cdot R \cdot T_2 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{n \cdot R \cdot T_1 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} \quad (4,27)$$

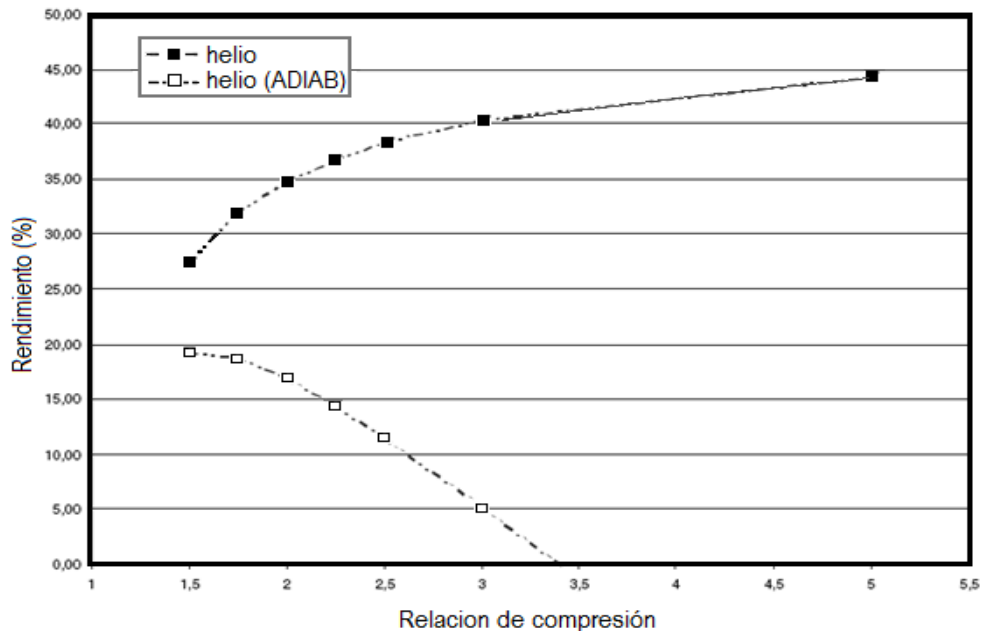
“Simplificando la expresión obtenemos el rendimiento de Carnot” (Delgado-2001).

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (4,28)$$

3.2.5 Análisis del ciclo Stirling

Utilizando como fluido de trabajo como el helio se observa (figura 25 “grafica superior”), que el rendimiento es creciente en función de la relación de compresión. Pero si se sustituye las evoluciones de expansión y compresión isothermas por adiabáticas (figura 25 “grafica inferior”), aparece una rápida disminución a partir de 1.5 para el helio (Alvarez-Callejón, 2002).

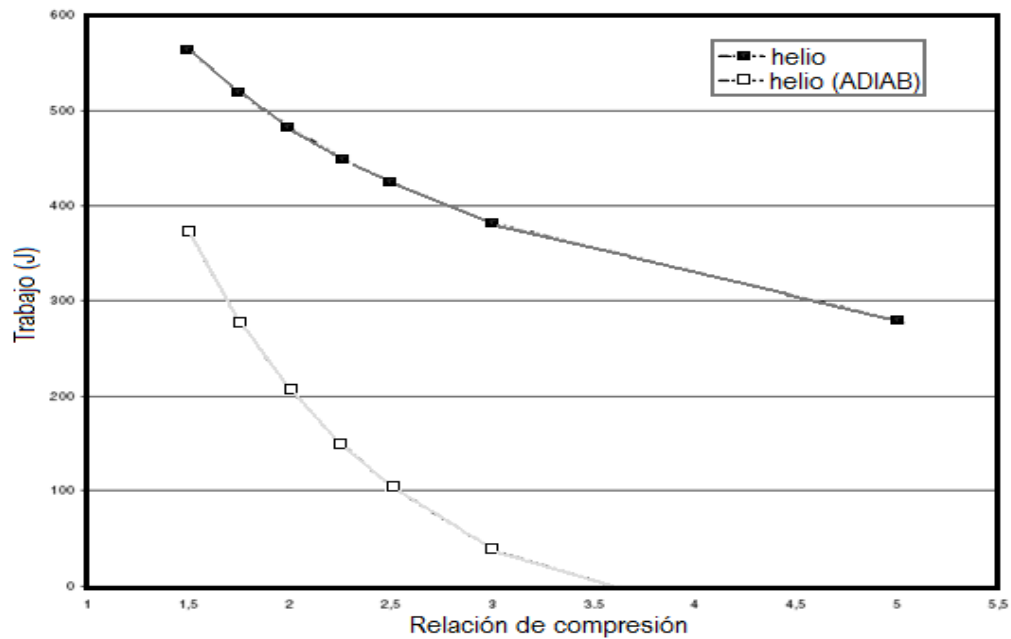
Figura 25. Rendimiento en función de la relación de compresión en el ciclo Stirling (100 bar, 100cm³).



Fuente: [Álvarez-Callejón, 2002]

En la evolución del trabajo (figura 26 “grafica superior”), no depende del fluido de trabajo cuando la compresión y la expansión se realizan según isotérmicas, y siempre disminuyen al aumentar la relación de compresión. Sin embargo, si se realizan la compresión y la expansión de modo adiabático (figura 26 “grafica inferior”), el trabajo disminuye de forma notable y si influyen las características del fluido (*Álvarez–Callejón, 2002*).

Figura 26. Trabajo en función de la relación de compresión en el ciclo Stirling (100 bar, 100cm³).

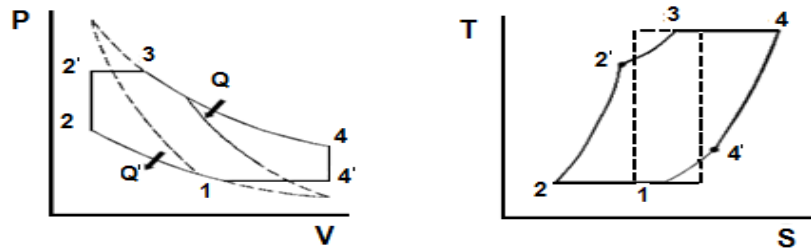


Fuente: [*Álvarez–Callejón, 2002*]

Se observa que el ciclo de Rallis proporciona mucho más trabajo que el proporcionado por el ciclo Carnot en el diagrama **P-V**. De aquí podemos deducir que los motores reales relacionados al ciclo de Rallis (motores Stirling), serán de dimensiones menores que para el ciclo de Ranking (máquinas y turbinas de vapor), para proporcionar potencias equivalentes. El ciclo Rallis aunque desarrolla mayor trabajo, el rendimiento es menor que el del ciclo Carnot, debido a que el ciclo de Rallis no libera o recibe calor isotérmicamente a la temperatura de los

depósitos, es decir, se involucran otras temperaturas en el intercambio de calor (etapas de regeneración) (Álvarez–Callejón, 2002).

Figura 27. P-V y T-S del ciclo regenerativo isotérmico de Rallis.



Fuente: [Álvarez–Callejón, 2002]

En la práctica un regenerador no suele ser capaz de llevar el fluido a la temperatura deseada cuando esta pasa a través de él, le hace falta aportación o extracción de calor. Se habla de una efectividad del regenerador menor de 1.

$$\varepsilon = \frac{Q_{reg(real)}}{Q_{reg(ideal)}} \quad (4,29)$$

Este parámetro puede incluirse en el cálculo de los rendimientos de los ciclos isotérmicos provocando a compresiones bajas una fuerte reducción en el rendimiento, pero a compresiones altas no son tan notorias (Álvarez–Callejón, 2002).

$$W^{ciclo}(Rallis) > W^{ciclo}(Carnot) \quad (4,30)$$

$$\eta_{Rallis} \leq \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \quad (4,31)$$

Este ciclo queda afectado por la dificultad de evitar que las transformaciones isotérmicas no deriven hacia un comportamiento adiabático. Este fenómeno implica una disminución del calor aportado. Se considera que al final de toda expansión y compresión la temperatura del fluido es, efectivamente, la de la fuente, de forma que el calor aportado, o extraído, al realizar las transformación adiabáticamente corresponde al de una aportación, o extracción, de calor a

volumen constante desde la temperatura del fluido al final de la transformación adiabática hasta la temperatura de la fuente.

Eso afecta trabajo y al rendimiento, que disminuyen. Sin embargo, si la expansión, o la compresión, se realizan de forma adiabática, pero sin alejarse excesivamente de la temperatura de la fuente (micro expansiones), la pérdida de trabajo y rendimiento es pequeña (Álvarez–Callejón, 2002).

3.2.6 Regenerador

En un motor Stirling el regenerador tiene como misión ocasionar el salto térmico del fluido de trabajo alternativamente entre T_{max} y T_{min} , sin aportación externa de calor.

El regenerador almacena y devuelve el calor liberado por el fluido, permitiendo el paso correcto que hay de la cámara de expansión hacia la de compresión, siendo fundamental para el buen rendimiento y viabilidad del motor Stirling (Álvarez – Callejón, 2002).

3.2.6.1 Análisis de la regeneración

El regenerador ideal tiene que enfriar y calentar el fluido hasta las temperaturas T_H y T_L . El modelo de capacidad térmica global asimila un comportamiento homogéneo a un determinado volumen, y se puede aplicar en el caso de que el número de Biot (4,48) sea menor que 0,1. El número de Biot se define como (Álvarez–Callejón, 2002).

$$Bi = \frac{h_c L}{K_s} \quad (4,48)$$

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección. Puede suponerse varias condiciones dependiendo del tipo de flujo (laminar o turbulento). Es función del fluido escogido.

K_s : Conductividad térmica del material del regenerador.

L: Longitud del regenerador

3.2.6.2 Acoplamiento de los émbolos y extracción de potencia

La disposición de los émbolos en una determinada configuración de motor determina el modo de extracción de la potencia generada por el motor.

Este tipo de motores admiten tanto la configuración de salida de potencia lineal como rotativa, aunque en determinadas configuraciones la primera es obligada.

En este sentido, es determinante la tipología de acoplamiento de los émbolos, distinguiéndose tres casos principales (*Álvarez –Callejón 2002*):

- a) Embolo acoplado mecánicamente
- b) Embolo no acoplado mecánicamente
- c) Embolo de acoplamiento híbrido

3.2.6.3 Características de los elementos mecánicos

Una de las grandes ventajas de los motores Stirling, respecto a los motores de explosión, es la suavidad de funcionamiento y las bajas relaciones de compresión que deben alcanzarse. Por lo tanto sus componentes mecánicos están relativamente poco solicitados: cigüeñal, bielas, cojinetes, rodamientos, pistones, cárter, cilindros, etc., tienen un peso y unas dimensiones mucho menores a las de otros motores, así como una vida útil más prolongada.

El único enemigo de la mecánica de los motores es la alta temperatura que alcanzan algunas de sus piezas, como las que envuelven la cámara de expansión. La elección del material y el diseño de estos elementos deben ser muy cuidadosos, teniendo en cuenta su fatiga tanto mecánica como térmica (*Álvarez – Callejón, 2002*).

3.2.6.4 Elementos térmicos

Los principales elementos térmicos son los intercambiadores de calor. Que cumplen funciones mecánicas como soportar la presión, conducir el fluido y la función primordialmente térmica, transmitir calor de un medio a otro.

En la tabla 17 se definen los tres intercambiadores de calor que suele disponer un motor Stirling. Los tres primeros calentador, refrigerador, actúan sobre el fluido de trabajo y son de presencia obligada. Algunas maquinas pequeñas aparentan no disponer de alguno de estos elementos, pero de hecho sí que los tienen, aunque reducidos a la mínima expresión (Álvarez –Callejón, 2002).

Tabla 17. Nomenclatura y función de los intercambiadores de calor.

| Denominación de los motores | Denominación en bombas de calor | | Función |
|-----------------------------|---------------------------------|----------------|---|
| | Refrigeradores | Calefactores | |
| Calentador | Enfriador | Absorvidor | Absorbe calor del exterior y la cede al fluido de trabajo. Es la salida de la cámara de expansión |
| Enfriador | Disipador | Calentador | Absorbe calor del fluido de trabajo y la cede al exterior. Es la salida de la cámara de compresión. |
| Regenerador | Regenerador | Regenerador | Absorbe calor del fluido de trabajo, cuando lo atraviesa en un sentido y lo guarda para devolvérselo cuando pasa en sentido contrario |
| Pre calentador | Pre calentador | Pre calentador | En motores calentados por combustión, calienta, con lo humos el aire comburente. En bombas de calor, calienta o enfría el aire entrante mediante el aire residual |

Fuente: [Álvarez –Callejón, 2002.]

El último precalentado, actúa sobre el fluido que transfiere el calor al exterior del calentador, y por lo tanto, no es estrictamente necesario para el funcionamiento del motor. La razón de su uso es la mejora en el rendimiento global de la maquina.

- a) Ofrecer el mínimo volumen muerto posible. si este volumen crece, el ciclo termodinámico se desplaza hacia la derecha en el diagrama P-V, y su área disminuye, proporcionando menos potencia.
- b) Rentabilizar al máximo el espacio muerto usado, haciendo un intercambio de calor por unida de volumen tan grande como sea posible.
- c) Evitar fricciones excesivas durante el paso del fluido de trabajo.

3.2.6.5 Calentadores

El calentador de motor Stirling tiene por misión transmitir calor desde un medio exterior caliente hacia el fluido de trabajo, a la vez que debe conducir este fluido en su recorrido por el interior del dispositivo. Siempre se sitúa a la salida de la cámara de expansión, a pesar de que a menudo, la misma cámara forma parte del calentador. Los procesos de transferencia de calor que intervienen en el calentador son tres y cada uno condiciona a su manera el diseño de este elemento (*Álvarez–Callejón, 2002*):

Según la localización del calentador, se distinguen tres casos:

- 1) El calentador es exclusivamente el mismo cilindro de expansión
- 2) El calentador comprende el cilindro de expansión y un calentador auxiliar
- 3) El calentador es exclusivamente un calentador auxiliar.

La primera opción solo está presente en pequeños motores demostrativos, en los que el rendimiento no es importante; el cilindro ofrece poca superficie de contacto con el gas, hecho que dificulta mucho la transmisión de calor. La segunda opción, o mixta, es la más utilizada; en este caso el calentador auxiliar realiza el intercambio mayoritario de calor, mientras que el cilindro, también caliente, completa la transmisión. Es la solución que ofrece mejor rendimiento térmico. Por último, el tercer caso se utiliza cuando se quiere reducir el costo del acero empleado en el cilindro; el calentador auxiliar realiza todo el intercambio, mientras que el cilindro se mantiene refrigerado por agua. Su rendimiento térmico no es tan bueno (*Álvarez–Callejón, 2002*).

3.2.6.6 Refrigeradores

El refrigerador de un motor Stirling tiene como objetivo evacuar calor del fluido de trabajo hacia un medio exterior más frío, a la vez que ha de conducir este fluido en su recorrido por el interior del dispositivo.

El refrigerador está formado por la propia cámara de compresión y a menudo también por un intercambiador auxiliar a la salida de esta, es tan importante como el calentador, sobre todo si este tiene en cuenta que debe evacuar casi un 50% de la energía que el motor recibe, y que lo debe hacer a la menor temperatura posible. Cuanto más baja sea su temperatura, mejor rendimiento térmico se obtendrá, y menos se deterioraran las juntas y gomas del motor (Álvarez –Callejón, 2002).

a) Refrigeración por agua: Si se dispone de una fuente inagotable de agua a temperatura ambiente (río, lago, red pública), solo hace falta bombearla por el interior del refrigerador. Es la solución más eficiente, pero solo es utilizable en motores estacionarios (Álvarez –Callejón, 2002).

b) Refrigeración por aire: En la mayoría de casos la refrigeración por agua continua no es posible, sea por la no- estacionalidad del motor, sea por la ausencia de una fuente viable. Entonces hace falta transmitir el calor al aire, y esto se puede hacer de dos maneras (Álvarez –Callejón, 2002):

- *Convección directa con aire mediante aletas metálicas.*
- *Circuito de agua con radiador*

3.2.6.7 Fluidos de trabajo

“Los fluidos de trabajo más utilizados son el hidrogeno y helio, mientras que el aire, el argón y otros fluidos solo se encuentran, actualmente, en pequeños motores demostrativos o experimentales” (Álvarez –Callejón, 2002).

- **Fluidos de trabajo gaseosos:** “Los fluidos de trabajo gaseosa, formados por uno o más componentes químicamente no reactivos, son ninguna duda los

más estudiados y empleados en los motores Stirling. El hidrogeno, el helio y el aire son los que ofrecen más ventajas, y por lo tanto los de máxima utilización” (Álvarez –Callejón, 2002).

- **Fluidos de trabajo líquidos:** “Los líquidos, como fluidos que son, pueden comprimirse, a pesar de que requieren grandes presiones para hacerlo y sus variaciones de volumen son pequeñas en comparación con los gases” (Álvarez –Callejón, 2002).

Las ventajas del uso de fluidos de trabajo líquidos, frente a los gaseosos son:

- ✓ Transmisión de calor favorecida por la elevada conductividad térmica de los líquidos y por su gran capacidad calorífica.
- ✓ La estanqueidad con líquidos puede resolverse de mejor manera.
- ✓ El líquido sirve de lubricante en el movimiento de los émbolos.
- ✓ El sistema se auto presuriza, ya que en frio puede llenarse a presión atmosférica, pero cuando se calienta la presión aumenta rápidamente.

Para el uso de los líquidos impone unas restricciones sobre los motores Stirling:

- ✓ Las elevadas presiones exigen paredes gruesas, que hacen el motor más pesado
- ✓ Para evitar las perdidas térmicas a lo largo de estas paredes, es necesario hacer los cilindros y los pistones muy largos y de poco diámetro
- ✓ La densidad y la inercia de los líquidos no permiten funcionar a velocidades elevadas.

3.2.7 Contaminación y ruido

“El ciclo Stirling, como ciclo cerrado, no genera ningún efecto contaminante en su funcionamiento. Ni las pequeñas fugas de fluido de trabajo (hidrogeno, helio o aire), ni las renovaciones de aceite lubricante, si se trata de forma correcta no se pueden considerar nocivos para la salud.

La principal emisión contaminante de los motores Stirling proviene de su fuente de calor. Las buenas condiciones en que se desarrolla esta combustión (continuidad y elevadas temperaturas) hacen que los niveles de hidrocarburos no quemados (HC) y de monóxido de carbono (CO) sean extraordinariamente bajos, mientras que el nivel de óxidos de nitrógeno (NO_x) se incrementa notablemente respecto los motores de combustión interna. En la tabla 18 se muestran los efectos en función de velocidad o la presión del medio” (Álvarez–Callejón, 2002).

Tabla 18. Principales pérdidas de potencia y rendimiento en los motores Stirling.

| <i>Tipo de pérdida</i> | <i>Pérdida</i> | <i>Efecto sobre la potencia</i> | <i>Efecto sobre el rendimiento</i> |
|--------------------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|
| <i>Perdidas del ciclo modificado</i> | Volumen muerto: Reduce la amplitud de la excursión del ciclo. | <i>Proporcional</i> | <i>Nulo</i> |
| | Redistribución del fluido: El movimiento continuo (senoidal) de los pistones y las inercias del fluido hacen que la distribución ya no sea la ideal. | <i>Proporcional</i> | <i>Nulo</i> |
| | Adiaticidad: La elevada velocidad con que se repite el ciclo no permite intercambios de calor isotérmicos. | <i>Proporcional</i> | <i>Constante</i> |
| <i>Perdidas térmicas</i> | Conducción: A través y a lo largo de las paredes. | <i>Constante</i> | <i>Regresivo</i> |
| | Convección y radiación: Hacia el ambiente. | | |
| | Efecto lanzadora: Los émbolos en movimiento absorben calor por el extremo caliente de los cilindros y la pierden por el extremo frío. | | |
| | Humos: Cuando la fuente de calor es por combustión. Parte de la energía se pierde por el escape | <i>Proporcional</i> | <i>Constante</i> |
| | Potencia térmica: Debido a la diferencia de temperatura entre extremos de los intercambiadores | | |

Fuente: [Álvarez–Callejón, 2002]

“Los motores Stirling pueden usar recurso como la radiación solar, la combustión de gas natural o de biomasa, o el aprovechamiento del calor residual de otros procesos de cogeneración, también se caracterizan por hacer menor ruido debido a la ausencia de detonaciones en su ciclo y a las relativas bajas velocidades y la vibración puede ser insignificante” (Álvarez–Callejón, 2002).

3.2.8 Sistema de control

“Algunas aplicaciones como la generación eléctrica requieren el funcionamiento a velocidad constante, incluso frente a cambios repentinos de carga. Estos motores disponen de un sistema que modifica la curva del par motor en función de los cambios según la sollicitación, para mantener siempre la misma velocidad de equilibrio (Álvarez–Callejón, 2002).

Los motores disponen de sistemas que mediante la variación de la curva de pares o de potencia, se controle la velocidad; manteniendo la frecuencia constante, máxima potencia, máximo par o bien trabajar al máximo rendimiento (mínimo consumo). El sistema que parece es la variación de la temperatura del calentador, debido a que las curvas de par y potencia varían notablemente; mediante el control de la energía aportada por la fuente de calor, por ejemplo cambiando el caudal del combustible (Álvarez–Callejón, 2002).

Este método tiene la ventaja de que solo con una variable T_{max} , se controla el comportamiento del motor. Pero tiene dos inconvenientes, el primero es que la inercia térmica propia del calentador hace que las reacciones del sistema sean muy lentas; el segundo es que T_{max} también influye mucho sobre el rendimiento.

Por esto, todos los sistemas de control existentes se han diseñado como combinación de dos: uno que mantiene constante la temperatura del calentador, y otro que utiliza otros parámetros para gobernar las curvas de par. Los sistemas son” (Álvarez–Callejón, 2002):

- Sistema de control de par que produce cambios deseados con la máxima rapidez y con el mínimo efecto sobre el rendimiento.
- Sistema de control de temperatura el cual adapta el flujo de calor entrante, a las variaciones de la potencia. De esta manera los rendimientos siempre se mantienen lo más alto posible para cada situación, debido a que la temperatura del calentador T_{max} , se mantiene constante a su valor más alto posible (límite metalúrgico).

3.2.8.1 Variación de temperatura

“El sistema de control de la temperatura se encarga de la regulación automática de la temperatura del calentador, manteniéndola constante a un valor próximo, pero inferior al límite metalúrgico, es decir, inferior a la temperatura en que el material del calentador fallaría por fatiga antes del número de horas de funcionamiento previstas. Este margen de seguridad, entre la temperatura límite y la temperatura regulada, es necesario por la presencia de puntos calientes en los tubos del calentador y también por las oscilaciones inevitables de la propia regulación. El margen será tanto más pequeño cuanto más regular sea la distribución de temperatura sobre los tubos, y cuanto más sensible y rápido sea el regulador (Álvarez–Callejón, 2002).

La manera de regular la T_{max} depende del tipo de fuente de calor que se utilice. Todos los sistemas disponen de una o más sondas de temperatura al calentador, el valor de las cuales se tratan y se amplifica para modificar convenientemente la potencia calorífica aportada al motor” (Álvarez–Callejón, 2002).

3.2.8.2 Variación de la amplitud de la presión

“Un aumento del volumen muerto (volumen no barrido por pistones y desplazadores) en los motores Stirling supone una reducción en la relación de compresión y, en consecuencia, una disminución del trabajo generado en cada

ciclo. El control por variación de la amplitud de la presión se basa en este fenómeno: regula el par variando el volumen muerto del motor.

Este sistema ofrece una ventaja adicional: el rendimiento se ve menos afectado por la variación del volumen muerto que por el uso del corto-circuito” (Alvarez – Callejón, 2002).

3.2.8.3 Variación del ángulo de fase

“Se ha comentado con anterioridad que el ángulo de desfase del movimiento senoidal de los dos émbolos no afectaba demasiado a la potencia mecánica generada por un motor Stirling. Esto es cierto para ángulos del intervalo 60° - 120° pero cuando se amplía el intervalo de desfase de 0° a 360° la potencia aparece como una función casi senoidal respecto al ángulo (Álvarez –Callejón, 2002).

Variando el ángulo de desfase, no solo se puede reducir la potencia generada o par, si no que se puede hacer negativa, es decir, el motor puede pasar a ser una bomba de calor que actúa como freno, o si el par resistente lo permite, se puede invertir el sentido de giro (Álvarez –Callejón, 2002).

Este sistema es aplicable solo a motores de simple acción, conectando los dos émbolos a dos ejes diferentes, el movimiento de los cuales se desfasa con un sistema de engranajes planetarios (Álvarez –Callejón, 2002).

Los motores de doble acción, en cambio, tienen un ángulo de desfase invariable- siempre vale 360° dividido por el número de cilindros, y por esto no se puede controlar por este método” (Alvarez –Callejón, 2002).

4. PROCESO DE COGENERACIÓN

4.1 Cogeneración con gasificación a partir de biomasa

Una planta de cogeneración de electricidad y calor con gasificación, es una instalación en la que a partir de una biomasa sólida, se produce un gas combustible, llamado gas de síntesis, que sometido a un proceso de limpieza, puede ser utilizado como combustible en turbinas a gas y motores Stirling.

Estos motores arrastran un alternador, produciendo electricidad y a su vez generan calor residual. Este calor residual puede ser convenientemente aprovechado para la producción de agua caliente, aire caliente, vapor o incluso agua fría para sistemas de refrigeración o climatización (*IDEA- 2007*).

La planta de cogeneración se divide en:

1. Reactor de gasificación de biomasa; producción el gas de síntesis.
2. Sistema de limpieza del gas de síntesis (“gas verde”); eliminación de las impurezas del gas.
3. Planta de moto generadores; los motores de combustión externa y turbinas a gas, consumen el gas, produciendo electricidad y energía térmica.

4.2 Recuperación energética / Conversión en energía mecánica

“El gas obtenido, una vez limpio y enfriado, es un combustible que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica. Hay diversas alternativas para ello, como los motores a gas, las turbinas de gas o bien el ciclo combinado.

De todos modos, a continuación se comentan cada una de ellas y se realiza una comparación de las tres alternativas” (*Álvarez- Callejón, 2002*).

4.3 Cogeneración

Se entiende por cogeneración la producción simultanea o secuencial de energía mecánica (transformable en eléctrica) y energía térmica útil, a partir de una misma fuente de energía primaria.

Figura 28. Diagrama de flujo de energías.



Fuente: [autores]

“La principal razón para la aplicación de la cogeneración en la industria o en el sector servicios es la mayor eficiencia obtenida en producir conjuntamente energía eléctrica y térmica, que en producirlas independientemente. Es decir, a partir de una misma cantidad de energía primaria, el nivel de energía aprovechada es más elevado” (Álvarez- Callejón, 2002).

4.3.1 Funcionamiento de un proceso de cogeneración

Un motor primo hace girar un alternador el cual transforma esta energía en electricidad. Una central termoeléctrica, cuyo motor primo es una turbina a gas (turbogás), ó un motor alternativo (Stirling), quema el combustible en las cámaras de combustión y transforma esta energía calorífica en energía mecánica de movimiento giratorio. Esta energía se aplica al alternador ó generador eléctrico.

Un caudal de gases residuales producto del trabajo del combustible - gases de escape - salen a perderse al ambiente, con una temperatura entre 400 y 550°C. Este es el ciclo tradicional (Álvarez- Callejón, 2002).

- La cogeneración captura estos gases calientes para producir vapor de agua a través de una Caldera de recuperación. Una caldera es un gran intercambiador de calor, donde sin mezclarse, un agua contenida en circuitos de tubos, espera la energía calorífica de los gases para transformarse en vapor de agua.
- Este vapor de agua a una presión determinada, se aprovecha para usos industriales y/o para una siguiente etapa de generación eléctrica utilizando esta vez una turbina de vapor.

- Variantes más avanzadas pueden aprovechar estas turbinas de vapor (Contrapresión, condensación, etc.) para producir vapores de agua a presiones adecuadas al proceso industrial que se quiere atender, como una especie de sangría a l vapor que hace trabajar la turbina.
- Los vapores residuales, con mezcla de agua por su menor temperatura inclusive pueden usarse para procesos de calefacción doméstica o climatización de ambientes con uso de las bombas de calor.
- Si no se usa para generar vapor de agua, el calor de los gases de escape puede usarse directamente para calentar hornos industriales, hornos de cerámica o panadería por ejemplo:

Un motor alternativo disipa parte de la energía en la calefacción de sus componentes mecánicos, camisas, aceite lubricante, combustible, que se deben refrigerar, produciendo con ello agua caliente en niveles altos (90°C) ó bajos 35 a 45°C). Estas aguas calientes también son parte del uso posible tanto para los procesos industriales como para la calefacción de ambientes u otros usos de mayor elaboración que lo requieran (*Álvarez- Callejón, 2002*).

4.3.2 Ventajas principales de la cogeneración

Dentro de las principales ventajas de cogeneración se encuentran:

- a) Rendimientos elevados:** El rendimiento térmico de las grandes plantas modernas de potencia es alrededor del 40%, pero teniendo en cuenta la utilización de plantas antiguas, más pequeñas y de rendimientos inferiores, se pueden considerar que el rendimiento medio de generación eléctrica es del 30%. Por lo tanto, una gran cantidad de energía se pierde en forma de calor residual.

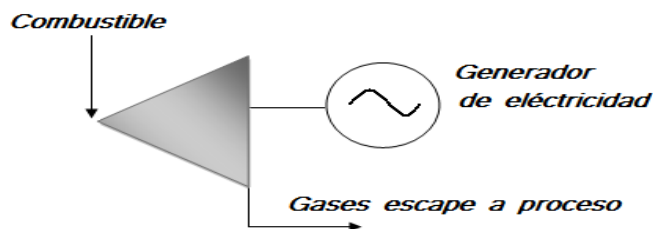
Produciendo electricidad y vapor conjuntamente por cogeneración, el rendimiento medio puede oscilar entre el 50% y el 85% con una relación de Potencia/calor entre el 0,5 y el 0,8. (*Games, 2008*).

- b) Disminución de la contaminación:** El mejor aprovechamiento de energía en la generación de electricidad supone una disminución de la contaminación, ya que disminuye el consumo de combustibles. El hecho de no dispar directamente al ambiente grandes cantidades de calor siendo un beneficio ambiental (*Games, 2008*).
- c) Diversificación energética:** La cogeneración permite aprovechar calores residuales y combustibles derivados de los procesos (*Games, 2008*).
- d) Ahorro económico:** En primer lugar se reducen los costos de generación y distribución de electricidad respecto a los sistemas convencionales (*Games, 2008*).
- e) Incremento de la garantía del suministro eléctrico:** En caso de fallo de suministro por parte de la compañía, existe una autosuficiencia en el abastecimiento de los procesos propios de la producción (*Games, 2008*).

4.3.3 Tecnologías de cogeneración

El proceso secuencial de generación y consumo de calor útil y electricidad admite dos posibilidades, según el primer eslabón de la cadena sea una u otra forma de energía (*Games, 2008*).

Figura 29. Diagrama del ciclo de cabecera.

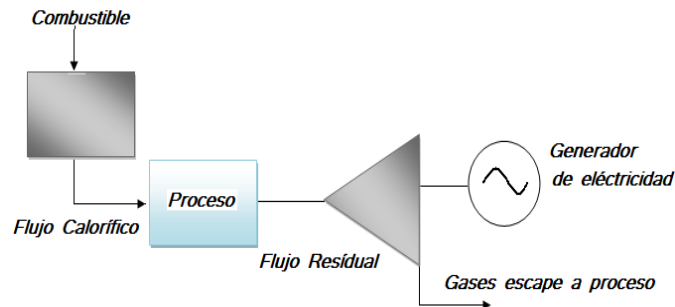


Fuente: [Álvarez- Callejón, 2002.]

En un ciclo de cabecera mostrado en la figura 29 es el tipo más frecuente de cogeneración, la energía eléctrica-mecánica es generada en el primer escalón, a partir de la energía química de un combustible y la energía térmica resultante, el

calor residual es suministrado a los procesos, constituyendo el segundo escalón. Los ciclos de cabecera, pueden ser aplicados a procesos que requieren temperaturas moderadas o bajas. Por esta razón, tienen un campo de aplicación mucho más amplio y permiten una mayor versatilidad en la selección del equipo.

Figura 30. Diagrama del ciclo de Cola.



Fuente: [Álvarez- Callejón, 2002.]

Por el contrario, en el ciclo de cola (figura 30), la energía térmica residual de un proceso es utilizada para producir electricidad. Los ciclos de cola están normalmente asociados con procesos industriales en los que se presentan altas temperaturas, por ejemplo las que se encuentra en la producción de productos químicos tales como amoníaco, etileno, etc. En tales procesos resultan calores residuales a unos 900°C que pueden ser utilizados para la producción de vapor y electricidad.

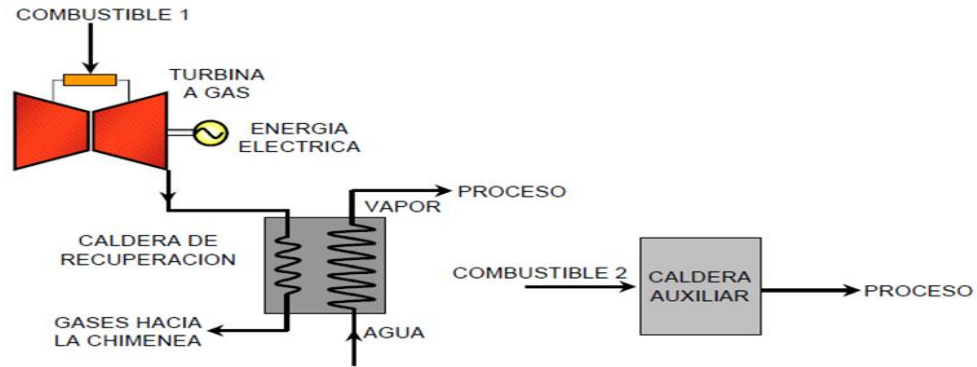
Los calores residuales que son utilizados en los ciclos de cola son, en muchas ocasiones, efluentes corrosivos, por lo que se requiere el uso de intercambiadores de calor muy costosos (Games, 2008).

4.3.3.1 Cogeneración con turbinas de gas

En el sistema de cogeneración con turbina de gas (figura 31) el combustible es introducido en una cámara de combustión. Los productos de la combustión son gases a alta presión y temperatura, estos gases son introducidos en una turbina, donde su energía es convertida en energía mecánica, que a su vez puede ser transformada en energía eléctrica mediante un alternador. La energía residual,

obtenida en forma de un flujo de gases calientes (alrededor de los 500°C) se puede utilizar para cubrir las demandas térmicas de procesos en su totalidad o parcialmente (Guía ambiental, 1999).

Figura 31. Esquema de cogeneración con turbina a gas.



Fuente: [Guía ambiental, 1999]

Los gases en la salida de la turbina tienen un gran nivel energético. La cogeneración consiste en aprovechar esta energía residual. Los tres tipos más comunes de cogeneración con turbinas de gas son los siguientes (Guía ambiental, 1999):

- Cogeneración en un ciclo simple con generador de vapor por recuperación.
- Utilización directa de los gases
- Inyección de vapor

Las principales ventajas de la cogeneración con turbinas de gas son:

- Amplio abanico de aplicaciones (Miliarium, 2009).
- Alta fiabilidad (Miliarium, 2009).
- Alta temperatura de los gases de escape (Miliarium, 2009).
- Rango de potencias entre 0,5 y 1,6MW (Games, 2008).
- Gases con alto contenido de oxígeno, que permiten una postcombustión (Miliarium, 2009).

Las desventajas más relevantes son (Miliarium, 2009):

- a) Limitaciones en los combustibles utilizables.
- b) Vida de trabajo relativamente corta.

4.3.3.2 Cogeneración con micro turbinas

“Opera bajo el mismo ciclo termodinámico que las turbinas a gas a gran escala, pero utilizando un solo ciclo de compresión. Se pueden utilizar a menor escala que los motores alternativos, es decir, en pequeñas industrias. Las microturbinas tienen cuatro modos distintos de operación: aislado de la red eléctrica, conectado a la red, en paralelo con exportación de energía, y de modo continuo o intermitente a la misma.

Sus principales características son: rango de 15 kW a 300 kW en una sola unidad; frecuencia de 1,600 Hz; mantenimiento mínimo; sus unidades ocupan muy poco espacio; son ligeras; operan sin vibración, prácticamente no hacen ruido; operan de 40,000 a 75,000 horas y pueden utilizar como combustible, además del gas natural, el keroseno, gasolina, etanol, diesel, propano y biomasa. Una de sus principales características es la reducción de emisiones contaminantes: 9 partes por millón (ppm) de NO_x, 40 ppm de CO y emisiones totales de hidrocarburos por debajo de las 9 ppm” (DEUMAN - 2003).

4.3.3.3 Cogeneración con motor Stirling

Este tipo de motor puede utilizar cualquier tipo de combustible ya que es un motor de combustión externa. Presenta varias ventajas sobre los motores alternativos de combustión interna: rendimientos térmico superior e impacto medioambiental menor, ya que, aparte de reducir las emisiones contaminantes, se pueden utilizar combustibles alternativos. Las aplicaciones actuales de esta tecnología están centradas en plantas de pequeña potencia (sobre los 300 CV), pero las investigaciones van dirigidas a una obtención de potencias superiores (200 CV) (Alvarez –Callejón 2002).

4.3.3.4 Calderas de recuperación de calor

“Una caldera es un intercambiador de calor en el que la energía se aporta generalmente por un proceso de combustión, o también por el calor contenido en un gas que circula a través de ella. En ambos casos, el calor aportado se transmite a un fluido, que se vaporiza o no, y se transporta a un consumidor, en el que se cede esa energía. En el proceso de cogeneración la caldera utiliza los gases calientes del escape de turbinas de gas, o de motores de explosión para que, circulando a través de ellas, cedan su calor para generar un fluido térmico” (Documentos técnicos, 2009).

Existen dos tipos de calderas de recuperación:

- **Calderas pirotubulares o de tubos de humo:** Se caracterizan porque la llama de la combustión se forma dentro de cada hogar cilíndrico de la caldera, pasando los humos generados por el interior de los tubos de los pasos siguientes (normalmente dos), para ser conducidos a la chimenea de evacuación. De ello, su otro nombre de calderas de tubos de humo (Documentos técnicos, 2009).
- **Calderas acuotubulares o de tubos de agua:** Se caracterizan porque la llama de los quemadores se forma dentro de un recinto formado por paredes tubulares en todo su entorno, que configuran la llamada cámara de combustión, pasando los humos generados por el interior de los pasos siguientes, cuyos sucesivos recintos están también formados por paredes tubulares en su mayoría (Documentos técnicos).

4.3.3.5 Generador Eléctrico

“Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si mecánicamente se produce un movimiento

relativo entre los conductores y el campo, se generara una fuerza electromotriz (F.E.M.)” (Wikipedia, 2009).

4.3.4 Caracterización de instalaciones de cogeneración

4.3.4.1 Rendimientos

Dado el siguiente sistema de cogeneración, donde Q_e es la potencia eléctrica generada, Q_h la energía asociada a la generación de calor por unidad de tiempo y Q_f es la energía asociada al consumo de combustibles por unidad de tiempo, los rendimientos se pueden definir (Alvarez–Callejón 2002).:

Figura 32. Balance de energía en un sistema cogenerativo.



Fuente: [Guía ambiental, 1999]

1. Rendimiento energético de obtención de potencia

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_f} \quad (4,1)$$

2. Rendimiento energético de generación de calor

$$\eta_h = \frac{Q_h}{Q_f} \quad (4,2)$$

3. Rendimiento energético total

$$\eta = \frac{(Q_e + Q_h)}{Q_f} \quad (4,3)$$

4. Rendimiento exergético total

$$\phi = \frac{(E_e + E_h)}{E_f} \quad (4,4)$$

La exergía asociada a la generación eléctrica (E_e) se puede identificar directamente a la potencia neta producida por la máquina de accionamiento del sistema de cogeneración (turbina de gas, turbina de vapor o motor alternativo). La exergía asociada a la generación de energía térmica (E_h) depende de las características del calor generado (por ejemplo, si se genera vapor, la exergía es debida al desequilibrio de presión y temperatura con el medio ambiente, y solo depende de la componente termo mecánica). La exergía asociada al consumo de combustible (E_f) engloba todos los posibles gastos existentes en el sistema de cogeneración (turbinas, motores, caldera, etc.) y se puede considerar solo la componente química despreciando la termodinámica (Alvarez –Callejón 2002).

4.3.4.2 Coeficiente para caracterizar las instalaciones de cogeneración

A parte de los rendimientos globales de las instalaciones y de sus componentes, existen una serie de parámetros para cuantificar la eficiencia de las instalaciones de cogeneración. En general, todos van encaminados a evaluar el ahorro energético en función de la energía producida con el combustible utilizado, o a determinar la relación entre la producción de energías (Alvarez –Callejón 2002).

A continuación se indican algunos de los parámetros más utilizados.

1. Factor de utilización de la energía (FUE). Se define como:

$$F.U.E = \frac{(Q_e + Q_h)}{Q_f} \quad (4,5)$$

Donde Q_e es el trabajo, Q_h el calor útil generado en la instalación de cogeneración y Q_f la energía asociada al combustible. Se observa que este

parámetro coincide con el rendimiento global de la instalación h. este criterio de eficiencia no es total mente satisfactorio porque asigna el mismo peso al trabajo y al calor, y, como se ha visto, son dos formas de energía de diferente calidad termodinámica (Alvarez–Callejón 2002).

2. Factor ponderado de utilización de la energía (**F.U.E_p**): a diferencia del parámetro anterior, este tiene en cuenta el diferente peso entre la electricidad y el calor. Se definen los precios de venta de electricidad, calor útil y combustible como P_e, P_q y P_f respectivamente. La expresión del factor ponderado es:

$$F.U.E = \frac{P_e Q_e + P_q Q_h}{P_f Q_f} \quad (4,6)$$

3. Índice de calor neto: es la relación entre el combustible utilizado que se puede atribuir a la energía eléctrica producida y la producción de electricidad de la instalación. El combustible que se atribuye a la energía eléctrica producida se calcula restando el combustible que haría falta para producir el vapor generado en una caldera convencional al combustible total utilizado. Cuanto más bajo sea este índice, más eficiente será la utilización del combustible (Alvarez–Callejón 2002).
4. Índice de energía eléctrica/vapor: Es la relación entre energía eléctrica y térmica producidas. Tienen gran importancia para saber el tipo de tecnologías más adecuado en cada caso, según las curvas de demanda de energía eléctrica y térmica (Alvarez–Callejón 2002).

5. METODOLOGÍA IDEF0

IDEF0 (Integrated Definition for Function Modeling) técnica de documentación y desarrollo de procesos que combina gráficos y texto de forma organizada y sistemática, ayuda a fomentar el aprendizaje, apoyar el análisis, aportar logística para cambios potenciales, especificar requisitos o soportar diseño de niveles de sistemas y actividades de integración. La metodología IDEF0 es utilizada en el mundo de las finanzas y en las industrias aeroespaciales y manufactureras, permitiendo a los analistas de negocios, consultores de gestión de procesos y profesionales de las tecnologías de la información, analizar, comunicar y optimizar procesos y funciones de manera consistente y eficaz (Guevara, 2002).

5.1 Componentes del IDEF0

A continuación enunciaremos la estructura gráfica.

1. Cajas de Procesos o Funciones

“Un proceso o función es acción que ocurre en un periodo de tiempo y produce un resultado gracias a una entrada. Su representación gráfica es una caja” (Guevara, 2002).

2. Flechas

“Las Flechas (ICOM) representan la información que definen una actividad, actúan sobre la actividad o salen de ella para actuar en otra. Existen cinco tipos de flechas” (Guevara, 2002):

- **Flechas de Entrada:** “Representan información o material a ser consumido o transformado por el proceso, función o actividad produciendo como resultado una salida. Es importante resaltar que las flechas de entrada son opcionales debido a la presencia de los controles que también son

considerados como datos de entrada. *Las flechas de entrada son ubicadas a la izquierda de la caja*". (Guevara, 2002).

- **Flechas de Control:** "Son flechas que gobiernan o regulan el proceso, función o actividad permitiendo que las salidas tengan un mejor comportamiento y resultado dentro de la organización. Las flechas de control son considerados como datos de entrada para el modelo. *Las flechas de control son ubicadas en la parte superior de la caja*" (Guevara, 2002).
- **Flechas de Salida:** "Son consideradas como material o información producida por el proceso, función o actividad. Las salidas se consideran producto de la información de entrada. *Las flechas de salida son ubicadas a la derecha de la caja*" (Guevara, 2002).
- **Flechas de Mecanismo:** "Estas flechas identifican al recurso humano o físico necesario para llevar a cabo la función o actividad" (Guevara, 2002). *Las flechas de mecanismo son ubicadas en la parte inferior de la caja*.
- **Flechas de Interfase:** "Se llama flechas de interfase porque permiten unir 2 procesos, funciones o actividades a través de un flujo de información" (Guevara, 2002). Este tipo de unión se puede presentar de 4 formas distintas:
 - ✓ Flecha de salida que se convierte en entrada para otra función o actividad.
 - ✓ La salida puede representar controles necesarios para una determinada función o actividad.
 - ✓ La salida de una actividad puede ser útil como control para otra, con la finalidad de realizar su correcto funcionamiento.
 - ✓ La salida se puede transformar en una entrada necesaria para procesar datos y obtener otros.

3. Diagramas

- **Diagrama de Contexto:** También conocido como diagrama principal o diagrama padre. Este permite definir el proceso o la función principal a ser modelada y su relación con la empresa. A este diagrama se le denomina diagrama A-0, y es el que establece el objetivo del modelo así como su orientación (Guevara, 2002).

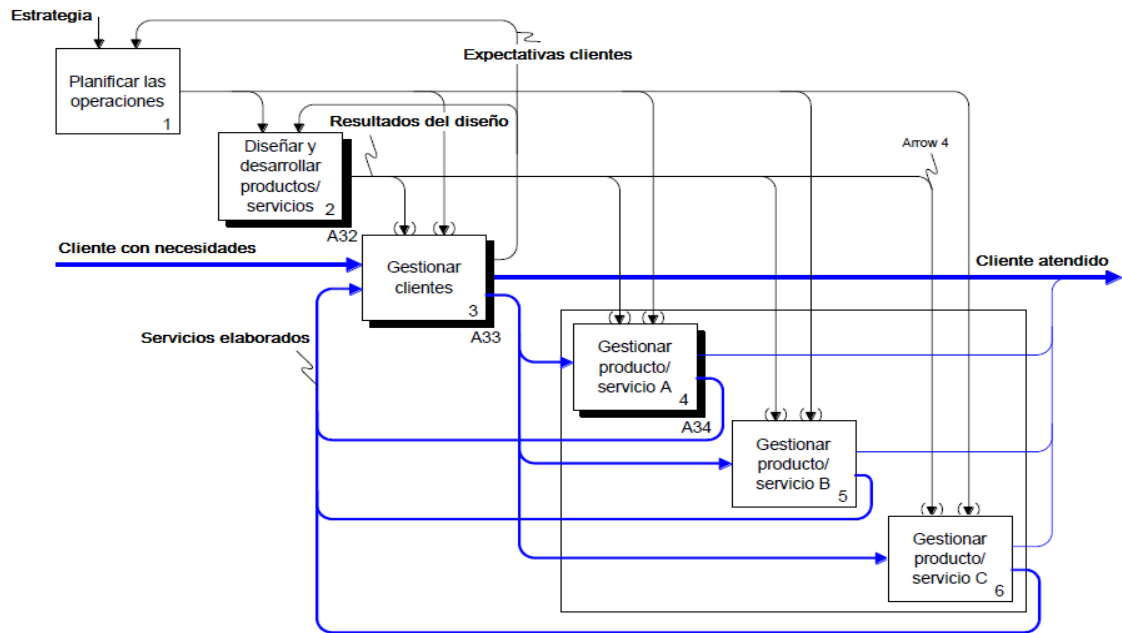
Figura 33. Diagrama Padre.



Fuente: (Guevara, 2002).

- **Diagrama de Descomposición:** También conocido como diagrama de descomposición funcional. Este muestra el detalle del diagrama padre. Los diagramas de descomposición son reconocidos por una numeración entera a partir del uno (Guevara, 2002).

Figura 34. Diagrama de Descomposición.



Fuente: (Guevara, 2002).

5.2 Sintaxis y reglas de IDEF0

Es importante tener en cuenta las reglas del dibujo tanto en los componentes independientes del modelo como en el dibujo en su conjunto para lograr una buena interpretación del mismo (Guevara, 2002).

- **Nombrando los procesos, Funciones o Actividades:** Cada una de las cajas que representan los procesos, funciones o, actividades deben ser nombrados a través de un Verbo + Sustantivo. Es necesario aclarar que el diagrama de contexto que representa el proceso principal debe ser nombrado de una manera más específica, según el propósito, el alcance y el punto de vista del modelo (Guevara, 2002).
- **Nombrando los Flujos:** El nombramiento de los flujos depende del modelo en que se encuentre. Por ejemplo en el diagrama de contexto normalmente los flujos de información representan documentos como tal (Facturas, Órdenes de compra, etc.) ya que estos permiten iniciar la función o

actividad, pero a partir de su descomposición deben representar en su gran mayoría de casos solamente datos (Número del Documento, Fechas del Documento o Autorización) para lograr la formación de otro flujo producto de la descomposición y transformación de la información (Guevara, 2002).

- **Semántica de Flechas:** En los diagramas de descomposición es necesario tener presente el significado de la unión o división de las flechas para una mejor interpretación de los mismos (Guevara, 2002).

Cuando una flecha parte a la otra significa que unos datos son extraídos de la flecha principal (horizontal).

Cuando una flecha se une a otra significa que la flecha principal (horizontal) necesita de algunos datos para formar la salida.

5.3 Pautas para crear diagramas de procesos

Para iniciar la creación de los diagramas, se deben tener en cuenta los siguientes pasos para una buena construcción del mismo (Guevara, 2002).

Paso 1: Contar con la siguiente información:

- **Propósito:** Es la razón de la existencia del modelo, establece la intención e identifica la razón del Modelamiento. Estos son ubicados en la parte superior izquierda del diagrama de contexto (Guevara, 2002).
- **Punto de Vista:** Es una perspectiva del modelo, es decir desde que punto de vista son apreciadas las funciones o actividades. Estas son ubicadas en la parte inferior izquierda del diagrama de contexto y es representado por los usuarios del modelo (Guevara, 2002).
- **Definición del Modelo:** Es la definición general del modelo con cada una de sus funciones, es decir especificar con claridad que cosa representa el modelo. Esta información es documentada internamente en el programa (Guevara, 2002).

- **Alcance:** Texto que define la amplitud y profundidad de la funcionalidad de los límites del modelo. Define qué está dentro del modelo y qué está fuera del modelo (*Guevara, 2002*).
- **Fuente de Información:** Es proporcionado a través de las entrevistas realizadas a los usuarios, el análisis y acopio de documentos (como observaciones in situ). Dicha información debe ser ubicada en la parte inferior derecha del diagrama de contexto (*Guevara, 2002*).

Paso 2: Recopilar información relacionada con las personas que llevan a cabo el funcionamiento del modelo, como las políticas a tenerse en cuenta al momento de aplicarlas.

Paso 3: Contar con un relato textual de qué es lo que sucede, identificando la información que necesita para producir otra dentro del gran proceso a modelar producto de unas entrevistas previas. Esta información permitirá representar el diagrama de contexto o principal del modelo.

Paso 4: Obtener las funciones o responsabilidades específicas que se cumplen dentro de ese gran proceso a modelar para la representación del siguiente diagrama (descomposición funcional).

5.4 Diagrama del proceso general

El diagrama general muestra las variables que afectan la transformación energética en el proceso de generación, que tiene como entrada la biomasa dispuesta a ser transformada antes de alimentar el gasificador, llegando a ser convertida en un gas con un poder calorífico para generar energías (térmica, eléctrica, química y mecánica), para esto hay que tener en cuenta una serie de pasos que hacen que el proceso sea el más adecuado. Entre los que se encuentran: El tratamiento de la biomasa, la gasificación de la biomasa, la limpieza del gas y por último la cogeneración de energía; utilizando el motor Stirling y la turbina de gas.

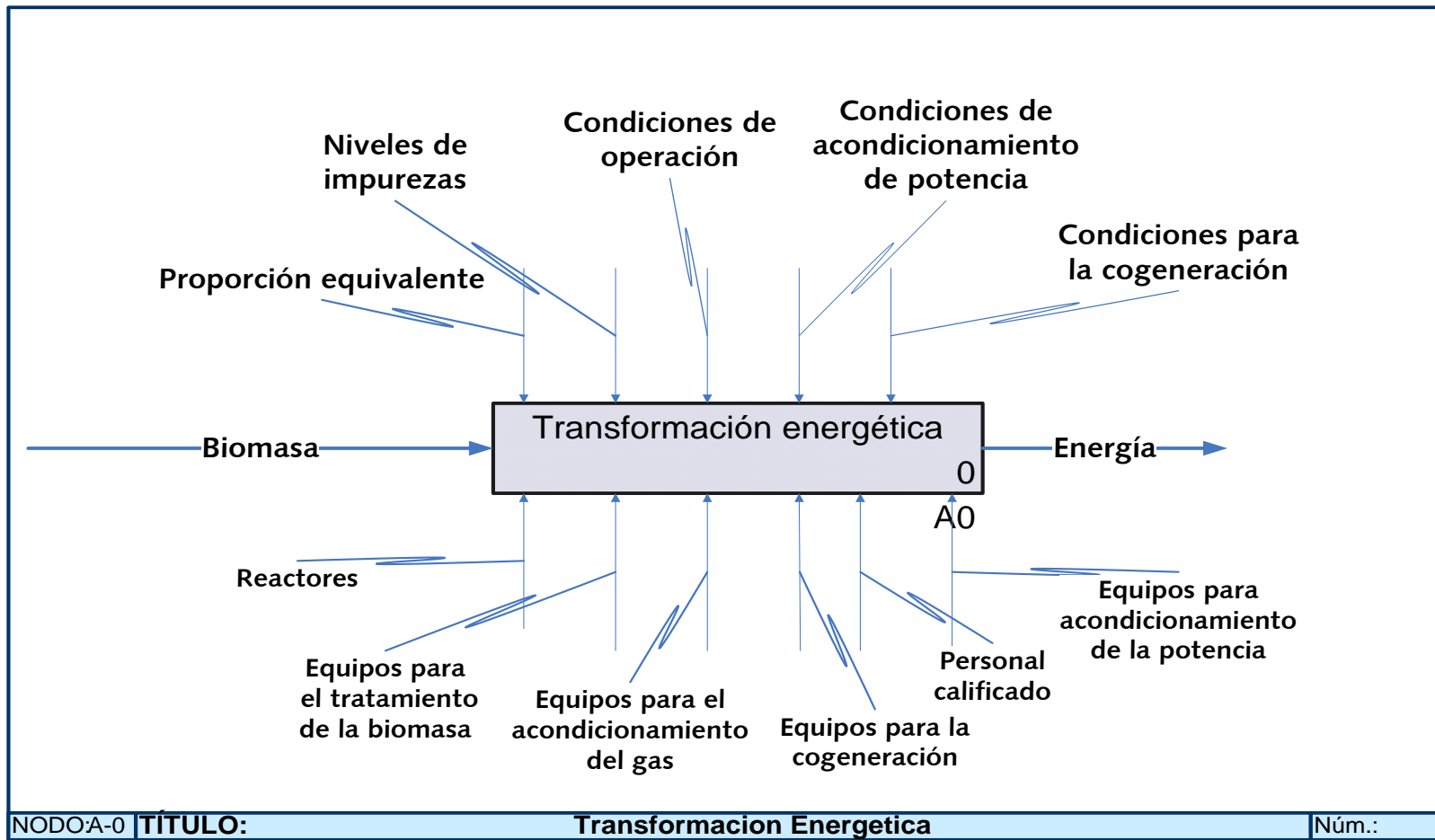


Diagrama 1. General A-0, Principal para la Transformación de Energía.

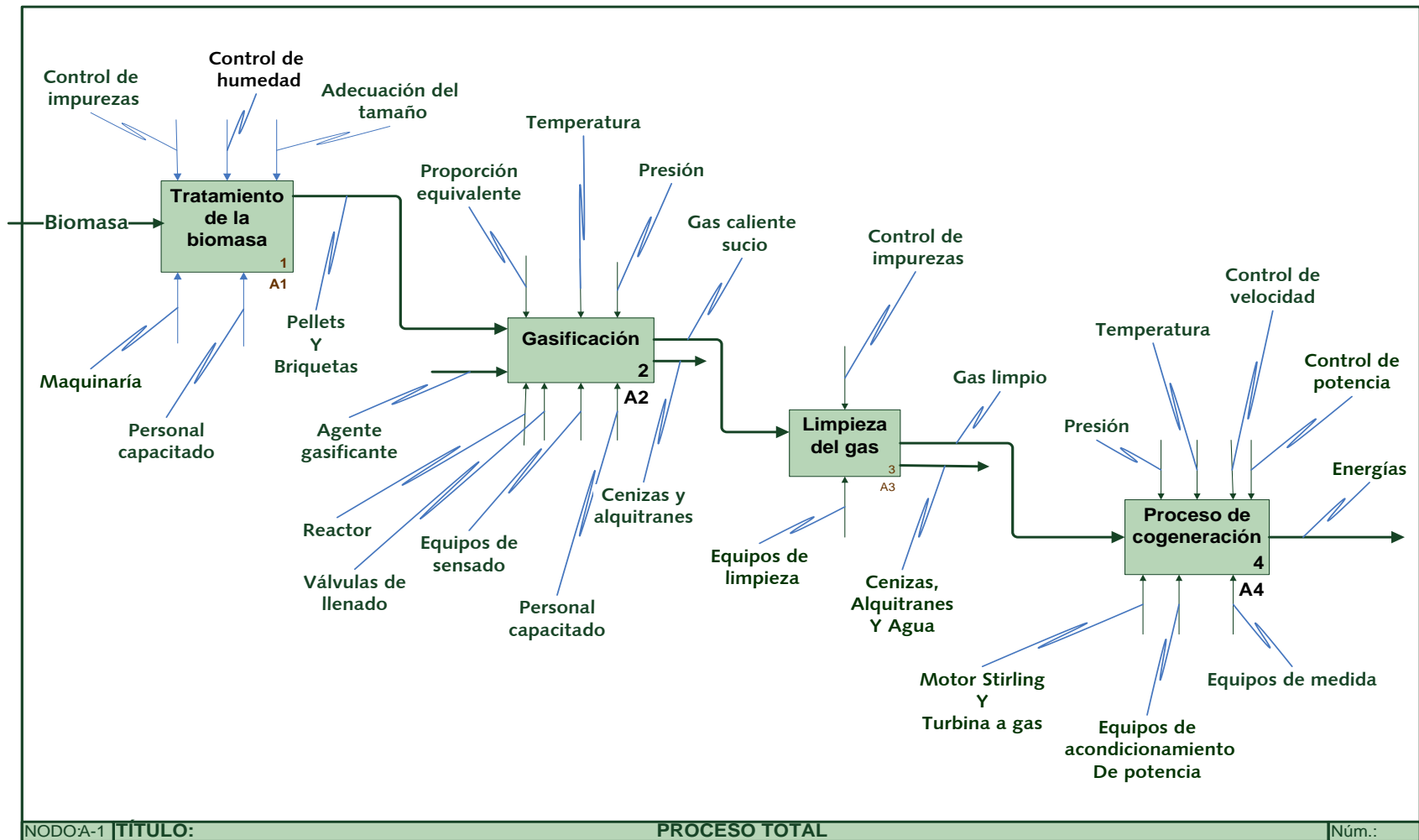


Diagrama 2. Descomposición para A-0 de la Transformación de Energía.

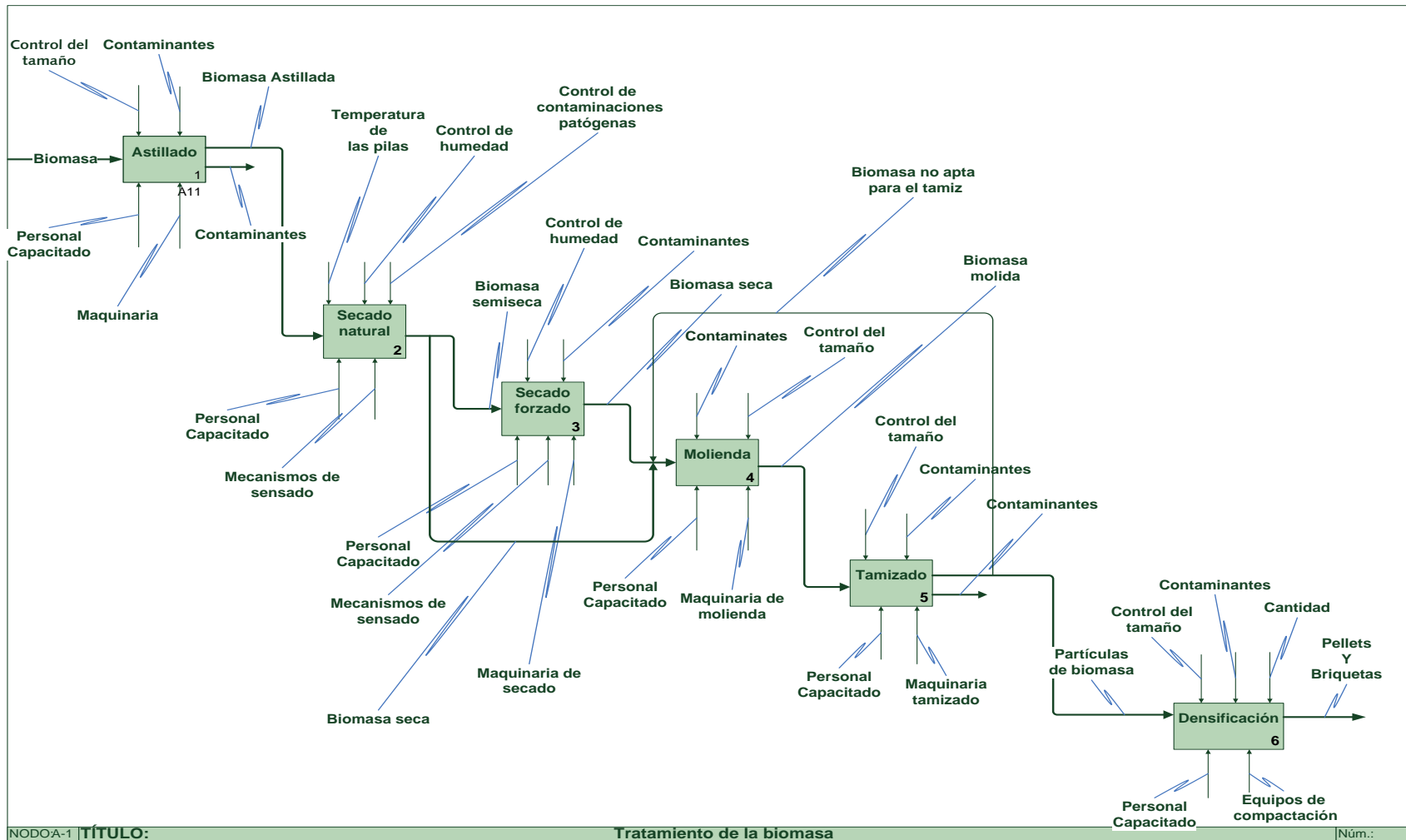


Diagrama 3. Descomposición A-1, Tratamiento de la Biomasa

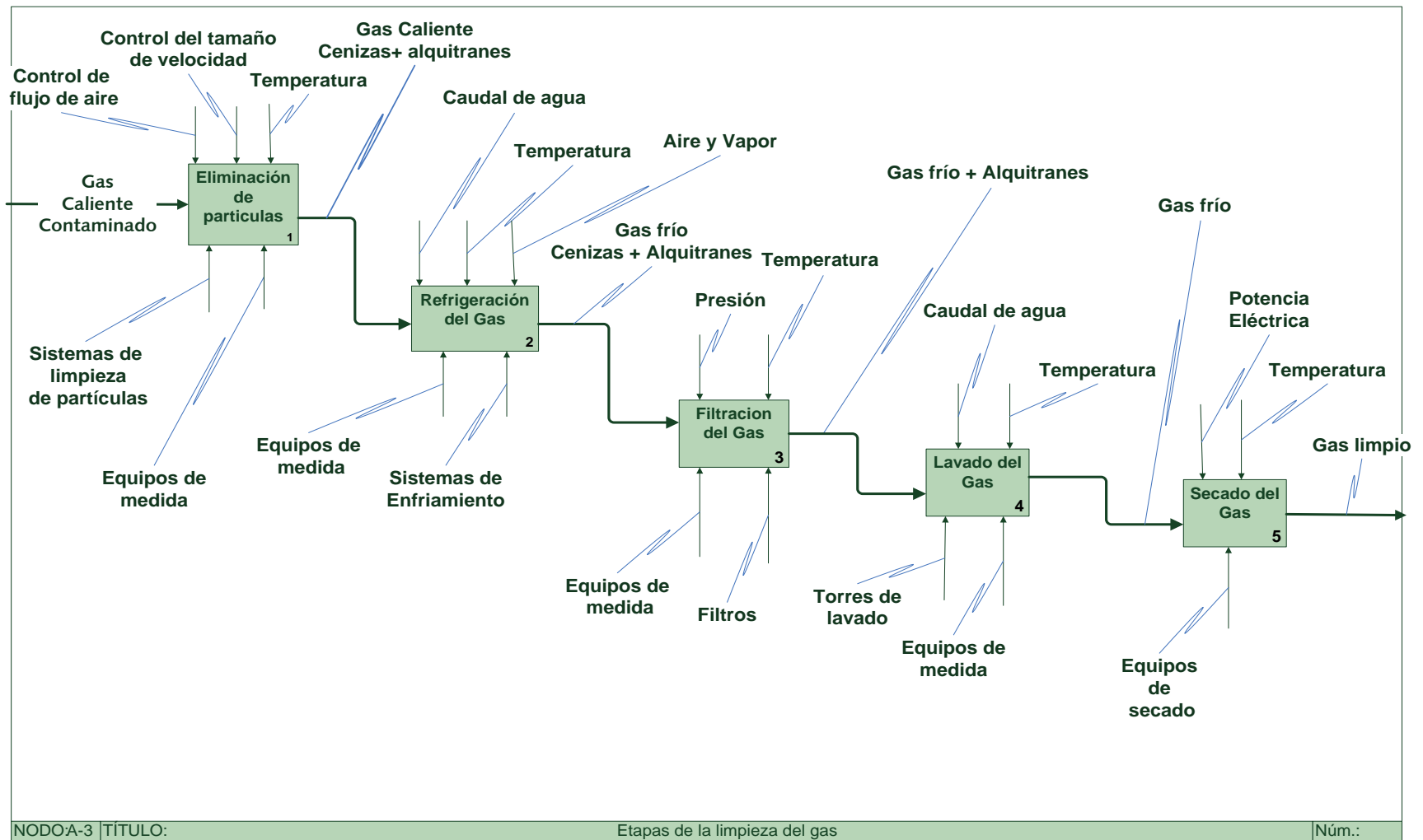


Diagrama 4. Descomposición A-3, Limpieza del gas

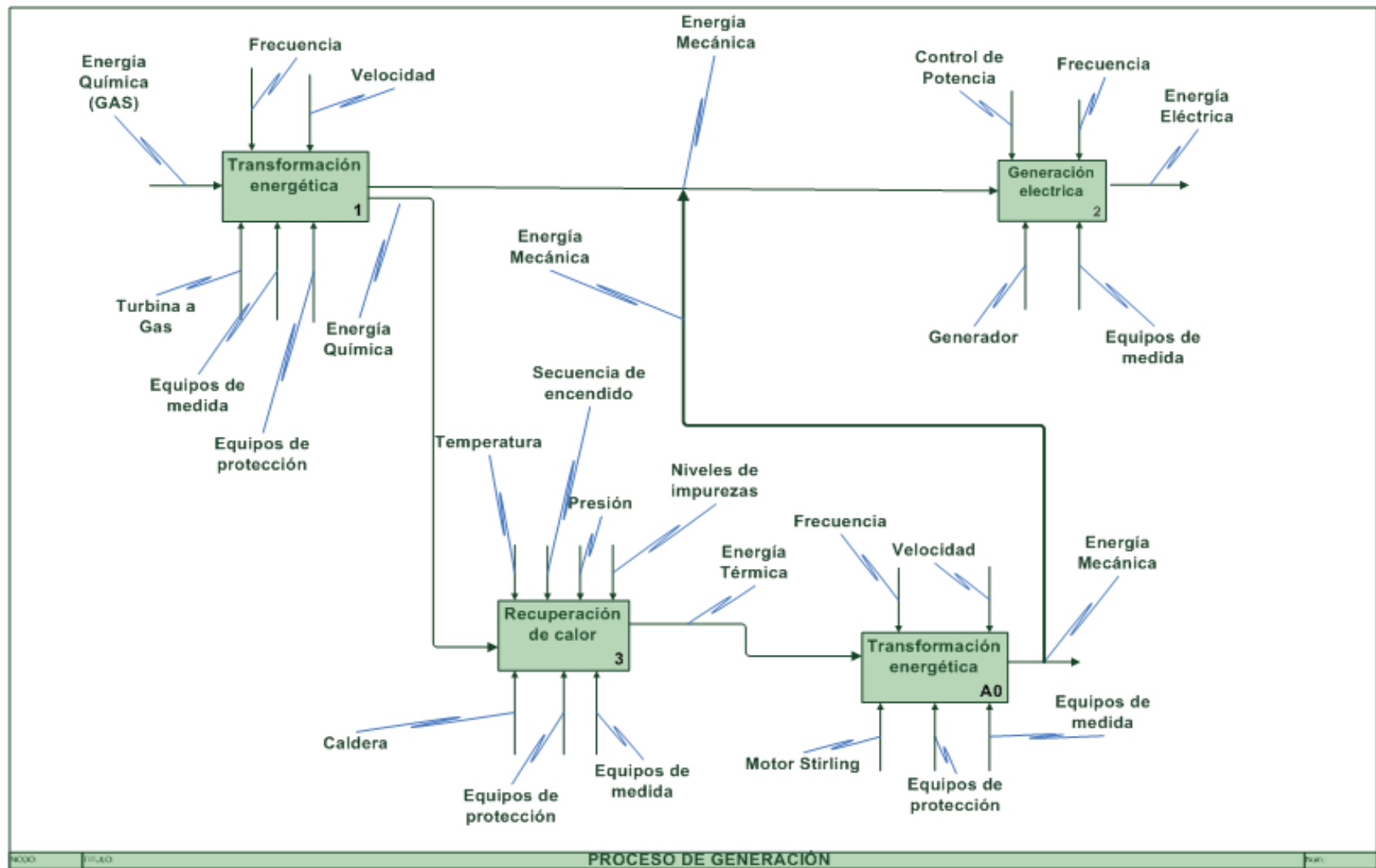


Diagrama 5. Descomposición A-4, Proceso de Cogeneración.
110

6. ANÁLISIS FUNCIONAL

Es una técnica que se utiliza para identificar las competencias laborales inherentes a una función productiva. Tal función puede estar definida a nivel de un sector ocupacional, una empresa, un grupo de empresas o todo un sector de la producción o los servicios. Se pueden desarrollar análisis funcionales con diferentes niveles de inicio: un sector ocupacional (hotelería); ocupaciones transversales a varios sectores (seguridad y salud ocupacional); o una ocupación (reparador de PC). Esto hace evidente la flexibilidad del análisis funcional. Aunque fue diseñado como una herramienta de análisis para una escala amplia, también puede ser útil en el análisis de ocupaciones en determinados subsectores o aun en organizaciones específicas (*Conocer, 1998*).

6.1 Principios Generales del Análisis Funcional

Los principios generales del análisis funcional según el SENA son los siguientes:

- a) Identificar el propósito clave del área objeto de análisis como punto de partida, para desagregarlo hasta las funciones que deban realizarse individualmente como contribución al logro de dicho propósito.
- b) Enunciar funciones delimitadas que permitan identificar el alcance de cada función y los resultados que se obtienen de su ejecución. Las funciones se deben asilar del contexto laboral específico, y deben tener un principio y un fin precisos.
- c) El proceso de desagregación de funciones se hace siguiendo la lógica de causa – consecuencia. Al realizar el desglose se verifica “lo que debe hacerse” para alcanzar el resultado descrito en la función que está siendo desagregada. De este modo, la desagregación de una función en el siguiente nivel está representando lo que se debe lograr para que dicha función se lleve a cabo. La pregunta en el desglose es: “¿Qué hay que hacer para lograr esto?”.

- d) Los resultados del análisis funcional se representan en un *mapa funcional*. Su forma representa la metodología seguida para su elaboración en la que una vez definido el propósito clave, este se desagrega sucesivamente en subfunciones.

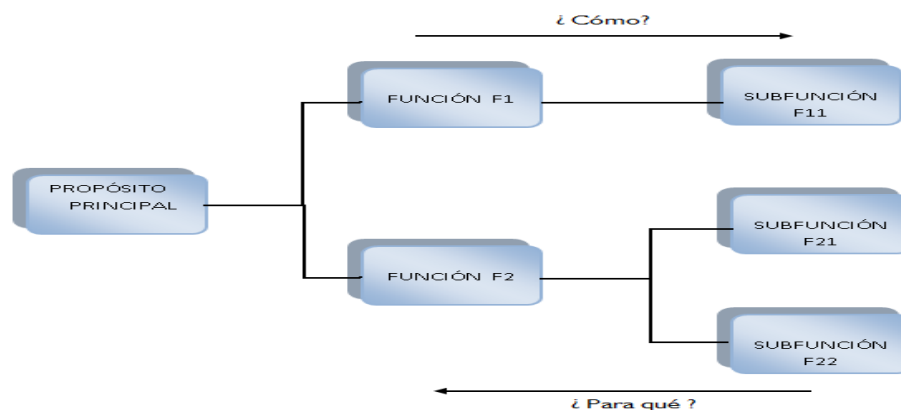
6.2 Mapa Funcional

“Es la representación gráfica del Análisis Funcional, donde queda expresada el propósito principal de una función productiva de un área, empresa, u organización. En ella la función principal y sus funciones constitutivas son dispuestas en una relación de causa-consecuencia” (*Competencias laborales, 2003*).

“El Mapa Funcional presenta una estructura de árbol, dispuesto horizontalmente, el cual se va describiendo de izquierda a derecha, partiendo de lo más genérico a lo más particular. Así, el Propósito Principal quedará representado a mano izquierda, de forma tal que sus funciones claves y elementos son desagregados en ese mismo orden hacia el lado derecho” (*Competencias laborales, 2003*).

A partir del propósito principal se desarrolla una sucesión lógica de funciones productivas, ya que la función principal habla de la razón de ser del sector, área u organización en dónde se esté desarrollando el Mapa Funcional (*Competencias laborales, 2003*).

Figura 35. Mapa funcional.



Fuente: [Autores]

6.3 Reglas para elaborar el mapa funcional

En la elaboración del mapa funcional, se aplican las siguientes reglas (Zuñiga, 2003):

- En el análisis funcional se mantienen una estructura gramatical uniforme. Todas las funciones se enuncian utilizando la estructura:

VERBO + OBJETO + CONDICIÓN

- El propósito clave enuncia la razón de ser de la sub-área de desempeño y se mantiene como referente permanente para identificar las demás funciones.
- Cada función se desglosa en las funciones subordinadas necesarias y suficientes que en conjunto permiten lograr la función de nivel superior, manteniendo una relación COSECUENCIA - CAUSA donde la sumatoria de las funciones subordinadas corresponde al resultado expresado en la función de nivel superior.
- La desagregación o desglose de funciones llega hasta enunciar funciones que pueden ser cumplidas individualmente, denominadas contribuciones individuales. El número de niveles desagregación para llegar a las contribuciones individuales es variable entre función y otra; el resultado es un mapa funcional.
- Cada función aparecen sólo una vez en el mapa funcional: los desgloses son excluyentes entre sí. Cuando una función se repite es posible que constituyan una función de nivel superior.
- Las funciones se redactan en términos de resultados de desempeño: las funciones enuncian lo que hace el trabajador competente para obtener los resultados del sistema productivo. No debe describirse para qué se ejecuta la función, ya que la estructura del mapa funcional responde este interrogante remitiéndose a la función de nivel superior.

6.4 Términos del Análisis Funcional

Dentro de los términos del análisis funcional se encuentran:

- **Función principal o propósito clave:** Es el punto a partir del cual se desarrolla el mapa funcional. El propósito clave describe la razón de ser de la actividad productiva, empresa o sector, según sea el nivel en el cual se esté llevando a cabo el análisis (*Competencias, 2009*).
- **Unidad de competencia:** Es una agrupación de funciones productivas identificadas en el análisis funcional al nivel mínimo, en el que dicha función ya puede ser realizada por una persona (*Competencias, 2009*).

La unidad de competencia está formada por un conjunto de elementos de competencia; reviste un significado claro en el proceso de trabajo y, por tanto, tiene valor en el ejercicio del trabajo. La unidad no sólo se refiere a las funciones directamente relacionadas con el objetivo del empleo, incluye también cualquier requerimiento relacionado con la salud y la seguridad, la calidad y las relaciones de trabajo (*Competencias, 2009*).

- **Elemento de competencia:** Describe el resultado laboral que un trabajador debe lograr en el desempeño de una contribución individual, mediante sus componentes normativos (criterios de desempeño, rango de aplicación, conocimiento y comprensión esenciales y evidencias requeridas) (*Competencias, 2009*).

6.5 Desarrollo del análisis de funcional

A continuación se muestran el mapa funcional del proceso de gasificación, obtenido a partir del análisis funcional aplicado a dicho proceso.

Diagrama 6. Mapa Funcional para la Preparación de la biomasa.

| | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Preparación de la biomasa | Recepcionar y cuantificar la biomasa | <ol style="list-style-type: none"> 1. Registrar antecedentes de procedencia de la biomasa recolectada. 2. Clasificar la biomasa de acuerdo con su composición y extracción. 3. Determinar la calidad, peso y/o volumen de la biomasa |
| | Realizar proceso de astillado | <ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar que la biomasa esté libre de elementos extraños utilizando equipos de depuración. 2. Revisar la maquinaria del proceso de astillado para detectar cualquier anomalía. 3. Trasladar la biomasa hacia el astillador en forma eficiente y continua. |
| | Realizar proceso de Secado Natural | <ol style="list-style-type: none"> 1. Determinar las características climáticas ambientales en la zona de almacenamiento. 2. Revisar que los lugares de almacenamiento estén en condiciones ideales para el secado. 3. Hacer pilas del producto almacenado. 4. Controlar las temperaturas generadas en el interior de las pilas. |
| | Realizar proceso de Secado forzado | <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisar la maquinaria para detectar cualquier anomalía. 2. Trasladar la biomasa hacia el secador en forma eficiente y continua. 3. Operar la maquinaria en forma eficiente y respetando las normas de seguridad y ambientales. 4. Verificar que la biomasa cumpla con las condiciones de humedad requeridas para el proceso. |
| | Realizar el proceso de tamizado | <ol style="list-style-type: none"> 1. Pasar el producto por el tamizado. |
| | Realizar el proceso de molienda | <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisar que las astillas estén libres de elementos extraños. 2. Revisar que la biomasa que entra y sale del proceso de molienda estén en condiciones adecuadas. 3. Operar la maquinaria en forma eficiente y respetando las normas de seguridad y ambientales. |
| | Realizar el proceso de densificación | <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisar las condiciones de humedad y granulometría del producto. 2. Hacer un seguimiento de la presión, temperatura y velocidad de la maquinaria. 3. Verificar las condiciones de la biomasa para que cumplan con las especificaciones esperadas. |

Diagrama 7. Mapa Funcional de la Obtención del gas

| | | |
|--------------------------|---|---|
| Obtención del gas | Realizar proceso de gasificación | <ol style="list-style-type: none"> 1. Suministrar al reactor el agente gasificante y la biomasa cumpliendo con los parámetros establecidos. 2. Controlar y registrar las variables de operación de modo que se obtenga el gas con las características especificadas. 3. Realizar control continuo del proceso, cumpliendo con normas de seguridad. |
| | Efectuar limpieza y adecuación del gas | <ol style="list-style-type: none"> 1. Eliminar las partículas solidas y cenizas del gas para proteger los equipos de la erosión y la corrosión. 2. Realizar el enfriamiento del gas dado que los sistemas de limpieza y motores trabajan a bajas temperaturas. 3. Reducir las particular restantes en el gas cumpliendo con los parámetros determinados. 4. Realizar operación de lavado del gas para separar los alquitranes. 5. Reducir la humedad del gas cumpliendo con las especificaciones requeridas. 6. Verificar que se cumplan las características específicas del gas para ser empleado en el motor o turbina a gas. |

Diagrama 8. Mapa Funcional de la Recuperación energética

| | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|---|
| Recuperación energética | Obtención de energía mecánica | <ol style="list-style-type: none"> 1. Suministrar a la turbina de gas el combustible (gas) cumpliendo con los parámetros establecidos. 2. Controlar y registrar las variables de operación del equipo utilizado. 3. Realizar control continuo del proceso, cumpliendo con normas de seguridad. |
| | Obtención de energía eléctrica | <ol style="list-style-type: none"> 1. Controlar y registrar las variables de operación del generador. 2. Realizar control continuo del proceso, cumpliendo con normas de seguridad. |

6.6 Tablas de hacereres y saberes

Las tablas de hacereres y saberes no son otra cosa que la estructura y formato de la unidad de competencia laboral, la cual corresponde a una agrupación de un número determinado de funciones productivas que han sido identificadas en el último nivel de desagregación del análisis funcional; éste último nivel de desagregación es conocido como elementos de competencia. Estas tablas de se especifican los componentes normativos (criterios de desempeño, rango de aplicación, conocimiento y comprensión esenciales y evidencias requeridas), que rigen la unidad de competencia laboras.

1. **Criterios de desempeño:** “Son una descripción de los requisitos de calidad para el resultado obtenido en el desempeño laboral; permiten establecer si el trabajador alcanza o no el resultado descrito en el elemento de competencia.

Los criterios de desempeño deben referirse, en lo posible, a los aspectos esenciales de la competencia. Deben, por tanto, expresar las características

de los resultados, significativamente relacionados con el logro descrito en el elemento de competencia” (Cinterfor, 2009).

- 2. Rango de aplicación:** “Determina los diferentes contextos donde debe lograrse y demostrarse el desempeño descrito en el elemento de competencia, precisando su alcance” (Zuñiga, 2003).
- 3. Conocimiento y comprensión esenciales:** “Se especifica el conocimiento esencial requerido en el desempeño de la función laboral que describe. Este conocimiento incluye las teorías, principios y conceptos que se aplican en el elemento de competencia” (Zuñiga, 2003).
- 4. Evidencias requeridas:** Corresponden a los productos requeridos para poder evaluar la posesión o no de una competencia laboral.

Para cada elemento de competencia se especifican (Zuñiga, 2003) :

- ✓ **Por producto:** Describe los resultados tangibles que serán usados como evidencias.
- ✓ **Por desempeño:** Describe las situaciones en las cuales se demuestra que un proceso está siendo realizado en forma eficiente.
- ✓ **Por conocimiento:** Se efectúan evaluaciones del conocimiento, teorías y principios que sustentan en el individuo un desempeño eficiente.

6.7 Formatos de unidad de competencia

Detallan cada uno de los elementos de competencia que caracterizan los procesos productivos asociados al proceso de gasificación de la biomasa.

| | |
|--|--|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Recepcionar y cuantificar la biomasa. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Registrar antecedentes de procedencia de la biomasa recolectada. | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. La biomasa es recepcionada en planta siguiendo los parámetros establecidos. 2. Los antecedentes de procedencia son registrados para certificar las condiciones de entrada. 3. La biomasa será controlada solicitando guías de despacho, correspondientes al cumplimiento de las resoluciones sanitarias correspondientes. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Conocer el formato de registro. 2. Procedencia de la biomasa. 3. Antecedentes de recolección. 4. Resoluciones sanitarias. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de entrada. 2. Registro de control de despacho. 3. Registro sanitario. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Realiza los registros de control de entrada de la biomasa a la planta. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Identifica las condiciones de entrada de la biomasa. 3. Garantiza el cumplimiento de las normas sanitarias. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Registra adecuadamente en la bitácora o formato el tipo de biomasa recepcionado. |

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Recepcionar y cuantificar la biomasa. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Clasificar la biomasa acorde con su composición y extracción. | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRESION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los tipos de biomasa deben ser conocidos para su clasificación. 2. La biomasa es clasificada de acuerdo a la procedencia y composición. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Características y composición de la biomasa. 2. Tipos de biomasa. 3. Cualidades físicas, químicas y fisiológicas de la biomasa. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de los tipos y composiciones de la biomasa. <p>Localización:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Lugar de selección y revisión | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Realiza la revisión y clasificación de la biomasa acorde con la normatividad. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Conocer cualidades físicas, químicas, físicas y fisiológicas de la biomasa. 3. Conoce las características y la composición de la biomasa. 4. Identifica los diferentes tipos de biomasa natural y residual determinando el origen de cada tipo. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Registra adecuadamente en la bitácora o formato el tipo de biomasa estudiado y clasificado. |

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Recepcionar y cuantificar la biomasa. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Determinar la calidad, peso y/o volumen de la biomasa | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los instrumentos de medición son conocidos para determinar la calidad, peso y/o volumen de la biomasa. 2. El equipo y/o instrumentos de medición se operan y mantienen en buenas condiciones. 3. Las averías de los instrumentos de medición se detectan y se informan a quien correspondan. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Interpretación de los datos de medida. 2. Calibración básica y operación de instrumentos de medida. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de control. 2. Manual de los instrumentos de medida. <p>Equipos :</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Instrumentos de medida. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Aplica procedimientos normalizados para determinar volúmenes y peso de la biomasa. 2. Manipula los equipos, supervisando el correcto funcionamiento. 3. Revisa de acuerdo a pautas establecidas equipos de medición de volúmenes y pesos. <p>Por Conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Interpreta correctamente los datos de medida. 5. Conoce las variables señaladas por los instrumentos de medida. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Registra adecuadamente en la bitácora o formato el peso y/o volumen de la biomasa. |

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de astillado. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Verificar que la biomasa esté libre de elementos extraños utilizando equipos de depuración. | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRESION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los tipos de elementos extraños deben ser identificados para su depuración. 2. El retiro de los elementos extraños es realizado teniendo en cuenta las normas de seguridad y normas ambientales. 3. Las maquinas utilizadas en el proceso de extracción de elementos extraños son conocidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Composición de diversidad de elementos extraños. 2. Manejo de tipo y funcionamiento de maquinaria. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Nomenclaturas y convenciones. 5. Normas ambientales. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Manual de operación. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Nomenclaturas y convenciones. 5. Normas ambientales. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Instrumentos de medida. 7. Maquinas de extracción. 8. Herramientas personales de extracción. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Retira los elementos extraños de la biomasa acorde con la norma establecida. 2. Opera equipos del área de extracción de elementos extraños adecuadamente. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Identifica los elementos extraños correctamente. 4. Identifica el tipo de maquinaria adecuada para el proceso de limpieza. 5. Garantiza que se cumplan la normas técnicas, ambientales y de seguridad. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de los elementos extraños extraídos en la biomasa. |

| | |
|--|--|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de astillado. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Revisar la maquinaria del proceso de astillado para detectar cualquier anomalía. | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Proceso de funcionamiento de la maquinaria de astillado es conocida. 2. Los equipos y elementos de corte son revisados para su correcto funcionamiento. 3. La maquinaria del proceso de astillado es revisada, para asegurar el cumplimiento de las normas de seguridad y medio ambiente. 4. Los elementos de seguridad y protección personal son empleados según la norma de seguridad vigente. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Tipos y funcionamiento de astilladoras. 2. Manejo de Normas de seguridad individual y colectiva. 3. Manejo del manuela de operación. 4. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Manual de operación. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Nomenclaturas y convenciones. 5. Normas ambientales. <p>Formatos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Registro de datos de mantenimientos. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Astilladoras. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa la máquina de astillado para llevar a cabo el proceso. 2. Verifica que la capacidad del proceso cumpla con las condiciones óptimas. 3. Identifica y opera equipos del área de astillado de forma adecuada. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Identifica funcionamiento y posibles fallas que presente la maquinaria. 5. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de los daños posibles de la maquinaria de astillado. |

| | |
|---|--|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de astillado. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA Trasladar la biomasa hacia el astillador en forma eficiente y continúa. | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRESION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El sitio de trabajo es inspeccionado para trasladar la biomasa de forma eficiente y continua. 2. La capacidad de la astilladora debe ser revisada durante su proceso de astillado para asegurar el cumplimiento de los parámetros establecidos. 3. El flujo de biomasa es controlado en el proceso de astillado para evitar atascos en la maquinaria. 4. Los tiempos de operación del astillador son controlados. 5. La maquinaria y herramientas utilizadas en el proceso de astillaje son utilizados cumpliendo las normas de seguridad vigente. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. 2. Capacidad de procesamiento de la astilladora. 3. Rendimiento de la biomasa acorde con su composición. 4. Tiempo de procesamiento. 5. Manejo del manual de operación. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Manual de operación. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Plan de trabajo. <p>Localización:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Depósito de astillaje. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La forma como realiza las actividades utilizando adecuadamente las herramientas de trabajo. 2. Verifica que la cantidad de la biomasa sea proporcionada a la capacidad de la astilladora. 3. Localiza el área de trabajo para tener un buen manejo del transporte de la biomasa. 4. Realiza el proceso de descarga en el astillador y registra los tiempos de operación. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Funcionamiento y rendimiento de la astilladora. 6. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de los consumos de biomasa. |

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Natural. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Determinar las características climáticas ambientales. | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El área de almacenamiento es establecida de acuerdo a las condiciones climáticas ambientales. 2. Las condiciones como temperatura, humedad y velocidad del aire son establecidas para obtener un proceso de secado adecuado. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Temperatura. 2. Humedad y velocidad del aire. 3. Interpretación de datos de media. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de control. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Instrumentos de medida. <p>Localización:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Sitio de trabajo. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Realiza un seguimiento adecuado de la temperatura, velocidad y aire. 2. Verifica que las condiciones sean las idóneas climáticas para el secado de la biomasa. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Determina las condiciones ambientales favorables para facilitar la deshidratación. 4. Interpreta adecuadamente los datos de medida. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de los factores climáticos. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Natural.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA Revisar que los lugares de almacenamiento estén en condiciones ideales para el secado.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los tipos de elementos extraños deben ser identificados para ser retirados. 2. El lugar de almacenamiento debe cumplir con las dimensiones establecidas para la ubicación de las pilas de biomasa. 3. El sitio de trabajo es inspeccionado para revisar y certificar las condiciones de seguridad, previas a la realización del almacenamiento. 4. La plataforma de secado debe estar a una altura determinada del piso facilitando la circulación del aire y el contacto con el suelo. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Características del sitio de almacenamiento. 2. Composición de diversidad de elementos extraños. 3. Conocimiento sobre normas de seguridad y calidad del proceso. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de control. 2. Normas de seguridad. <p>Localización:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Sitio de almacenamiento. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Localiza el área de almacenamiento para la supervisión de las pilas de biomasa. 2. Revisa el área de trabajo donde se llevara a cabo el almacenamiento, para garantizar su adecuada realización. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Identifica cuales son los factores de riesgo para que se cumplan las normas de seguridad. 4. Identifica las características principales que deben cumplir el lugar de almacenamiento del producto. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de las características o condiciones del sitio. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Natural. ELEMENTO DE COMPETENCIA Hacer pilas del producto almacenado.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La biomasa es clasificada de acuerdo con su volumen y contenido de humedad para hacer las pilas. 2. Las pilas de biomasa se hacen teniendo en cuenta el volumen establecido para evitar apelmazamientos. 3. Las distancias entre pilas son establecidas para permitir una buena circulación del aire. | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Volumen de las pilas. 2. Cualidades físicas de la biomasa. 3. Contenido de humedad. 4. Interpretación de medidas. 5. Técnicas de apilamiento. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Instrumentos de medidas. <p>Localización:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Lugar de almacenamiento (campas al aire libre, o campos). | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Verifica las distancias de las pilas de biomasa en el área, para garantizar la distribución exacta. 2. Realiza medidas de humedad de la biomasa para clasificarlas en el apilamiento. 3. Realiza el apilamiento cumpliendo con las características establecidas. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Interpreta correctamente los datos de medida. 5. Determina el contenido de humedad de la biomasa para su apilamiento. 6. Conoce la planificación y ordenamiento de las pilas de biomasa. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Elabora pilas de almacenamiento para un correcto secado de la biomasa. 8. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de las pilas de biomasa. |

| | |
|---|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Natural ELEMENTO DE COMPETENCIA Controlar las temperaturas generadas en el interior de las pilas.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Las pilas son revisadas durante el secado natural para asegurar el cumplimiento de las características establecidas por temperaturas. 2. Las pilas son volteadas cuando se cumpla las condiciones de temperaturas establecidas. 3. La biomasa que cumpla con las condiciones humedad establecidas es retirada para evitar su degradación física. 4. Los tipos de patógenos extraños son identificados y retirados para evitar su propagación. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Interpretación de datos de medida. 2. Características y composición de la biomasa. 3. Diversidad de patógenos extraños. 4. Normas de seguridad, calidad y ambiental. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de los tipos y composiciones de la biomasa. 2. Normas de seguridad y salud laboral. 3. Normas ambientales. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Instrumentos de medidas. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa adecuadamente las pilas para garantizar un adecuado proceso de secado teniendo en cuenta las características establecidas. 2. Retira la biomasa o patógenos extraños cuando cumplen con las condiciones apropiadas de humedad. 3. Retira los patógenos extraños generados en las pilas. 4. Realiza la correcta interpretación de los datos de medida. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Conoce los rangos de humedad permitidos en la biomasa. 6. Determina la temperatura adecuada para remover las pilas. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de la biomasa acta para aprovechamiento energético. 8. Obtiene el material de calidad para el proceso de gasificación. |

| | |
|--|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Forzado ELEMENTO DE COMPETENCIA: Revisar la maquinaria para detectar cualquier anomalía.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los procesos de funcionamiento y rendimiento de las maquinas de secado son conocidos. 2. La maquinaria del proceso de secado es revisada, para asegurar el cumplimiento de las normas de seguridad y medio ambiente. 3. Los elementos de seguridad y protección personal son empleados según la norma de seguridad vigente. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Tipos de maquinaria de secado. 2. Correcto funcionamiento de la maquinas de secado. 3. Capacidad de proceso de las maquinas de secado. 4. Normas de seguridad individual y colectiva. 5. Nomenclaturas y convenciones. 6. Manejo del manual de operación. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Manual de operación. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Nomenclaturas y convenciones. 5. Normas ambientales. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Maquinaria de secado. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa la maquinaria de secado para llevar a cabo el proceso de secado forzado. 2. Verifica que la capacidad del proceso cumpla con las condiciones óptimas de humedad. 3. Opera equipos del área de astillado de forma adecuada cumpliendo con las normas estipuladas. 4. La manera como reporta los resultados obtenidos en la detección de fallas en los equipos, empleando medios adecuados. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Identifica las posibles fallas que presenta la maquinaria. 6. Conoce el proceso adecuado del secado. 7. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de los daños posibles de la maquinaria de secado. |

| | |
|---|--|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Forzado. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Trasladar la biomasa hacia el secador en forma eficiente y continua. | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. La cantidad de biomasa es conocida, teniendo en cuenta la capacidad de la maquinaria de secado. 2. El sitio de trabajo es inspeccionado para trasladar la biomasa de forma eficiente y continua. 3. La capacidad de las maquinas de secado debe ser revisadas durante su proceso para asegurar el cumplimiento de los parámetros establecidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sitio de trabajo. 2. Características del proceso. 3. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. 4. Normas de seguridad individual y colectiva. 5. Rendimiento de la biomasa acorde con su composición. 6. Tiempo de procesamiento de secado. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Plan de trabajo 2. Registro de control. 3. Manual de operación. 4. Normas de seguridad individual y colectiva. <p>Localización:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Depósito de secado. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Verifica que la cantidad de la biomasa sea la correcta proporcionada a la capacidad de las maquinas secadoras. 2. Localiza el área de trabajo para tener un buen manejo del transporte de la biomasa. 3. La forma como realiza las actividades utilizando adecuadamente las herramientas de trabajo. 4. Realiza el proceso de secado teniendo en cuenta las características de entrada de la biomasa, registrando los tiempos de operación. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. 6. Conocimiento del proceso, rendimiento y variables del secado. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de las características de humedad que ingresan al secador. |

| | |
|---|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Forzado. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Operar la maquinaria en forma eficiente y respetando las normas de seguridad.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los diferentes dispositivos de la maquinaria son conocidos. 2. El proceso de funcionamiento de la maquinaria es revisada durante la realización del trabajo para asegurar el cumplimiento de los parámetros establecidos. 3. Los elementos de seguridad y protección personal son empleados según la norma de seguridad vigente. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Manejo del manual de operación. 2. Configuración de las máquinas de secado 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Conocimiento de nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Plan de trabajo. 2. Manual de operación. 3. Normas de seguridad individuales y colectivas 4. Normas aplicadas a la manipulación de maquinaria de secado | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa la maquinaria de secado, para garantizar un adecuado funcionamiento. 2. La correcta aplicación de las medidas de seguridad en la realización de procesos de secado. 3. La forma como maniobra el equipo de secado, según los manuales de operación. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Manipula la maquinaria de secado acorde al principio técnico. 5. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. |

| | |
|--|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de Secado Forzado</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Verificar que la biomasa cumpla con las condiciones de humedad.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El balance de materia y energía es conocido para establecer el rendimiento del proceso. 2. Los valores de humedad de la biomasa son revisados y certificados previamente a la salida del secado. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Rangos de humedad establecidos. 2. Humedad del solido a secar. 3. Interpretación de datos. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Plan de trabajo. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Elementos de medida. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa el proceso de secado para garantizar un adecuado balance de materia y energía. 2. Verifica que los datos de humedad sean los certificados para su óptimo rendimiento. 3. La forma como utiliza los instrumentos de medida para certificar veracidad en los datos. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Conocimiento sobre rangos de humedad permitidos durante el proceso. 5. Conoce los instrumentos adecuados de medida para certificar calidad. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de las características de humedad en la biomasa. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar el proceso de tamizado. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Pasar el producto por el tamizado.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Las dimensiones óptimas son conocidas siguiendo las convenciones establecidas. 2. El tamaño del tamiz determinarán el tamaño de la biomasa. 3. El diseño y funcionamiento del equipo es el adecuado para la aplicación. | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Conocimientos sobre tipos y tamaños de tamizado o cribas. 2. Dimensiones del granulado esperado. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Plan de trabajo. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Equipo de cribado. | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Aplicación de los diferentes tipos de cribados acorde con las características de la biomasa. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Criterios de clasificación y almacenamiento del tamizado y la criba. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Elabora Registros en la bitácora o formato de las características del tamaño, peso y cantidad de la biomasa en el proceso de tamizado. |

| | |
|--|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar el proceso de molienda. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Revisar que las astillas estén libres de elementos extraños.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los tipos de elementos extraños deben ser identificados para su depuración. 2. El retiro de los elementos extraños es realizado teniendo en cuenta las normas de seguridad. 3. Las máquinas utilizadas en el proceso de extracción de elementos extraños son conocidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Composición de diversidad de elementos extraños. 2. Tipo de maquinaria. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Conocimiento de nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Manuales de operación. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. 4. Nomenclaturas y convenciones. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Instrumentos de medida. 6. Maquinas de extracción. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Retira los elementos extraños de la biomasa acorde con la norma establecida. 2. Opera equipos del área de extracción de elementos extraños adecuadamente. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Identifica los elementos extraños correctamente. 4. Identifica el tipo de maquinaria adecuada para el proceso de limpieza. 5. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de los elementos extraños extraídos en la biomasa. |

| | |
|--|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar el proceso de molienda</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Revisar que la biomasa que entra y sale del proceso de molienda estén en condiciones adecuadas.</p> | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los tipos de biomasa deben tener características adecuadas conocidas para el proceso de molienda. 2. El estado de la biomasa saliente del molino, deben tener características adecuadas para la continuidad del proceso. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Características y composición de la biomasa. 2. Diferentes tipos de biomasa. 3. Cualidades físicas, químicas y fisiológicas de la biomasa. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de los tipos y composiciones de la biomasa. <p>Localización:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Lugar de selección y revisión. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa que la biomasa cumpla con las condiciones adecuadas, para garantizar un balance de materia y energía. 2. Verifica que los datos de humedad sean los certificados para su óptimo rendimiento. 3. Verifica que el tamaño, sean los certificados para su óptimo rendimiento. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Conocer cualidades físicas, químicas, físicas y fisiológicas de la biomasa. 5. Conoce las características y la composición de la biomasa. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de las características del tamaño, peso y cantidad de la biomasa en el proceso de molienda. |

| | |
|--|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar el proceso de molienda</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Operar la maquinaria en forma eficiente y respetando las normas de seguridad.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los diferentes tipos de molinos son conocidos. 2. Los diferentes dispositivos de la maquinaria son conocidos. 3. La cantidad de biomasa es conocida, teniendo en cuenta la capacidad del molino. 4. El proceso de funcionamiento de la maquinaria es revisada durante la realización del trabajo para asegurar el cumplimiento de los parámetros establecidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Configuración de los molinos. 2. Normas de seguridad individual y colectiva. 3. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. 4. Capacidad de trabajo de los molinos. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Plan de trabajo 2. Normas de seguridad individuales y colectivas 3. Normas aplicadas a la manipulación de maquinaria (molinos) <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Maquinaria de molienda. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa la maquinaria (molinos), para garantizar un adecuado funcionamiento. 2. La forma como maniobra el equipo de molienda, según los manuales de operación. 3. La correcta aplicación de normas de seguridad en la realización de la molienda. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Tiene un dominio en la manipulación de la maquinaria (molinos). 5. Conocimiento de Nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. |

| | |
|---|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar el proceso de densificación.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Revisar las condiciones de humedad y granulometría del producto.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRESION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El balance de materia y energía es conocido para establecer el rendimiento del proceso. 2. Los valores de humedad son revisados y certificados previamente de la densificación. 3. El tamaño de los granos de biomasa es revisado para que cumpla con las condiciones y características especificadas. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Rangos de humedad permitidos. 2. Humedad del solido a secar. 3. Interpretación de datos. 4. Tamaño de grano. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de los tipos y composiciones de la biomasa. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Instrumentos de medida. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa el proceso de densificación, para garantizar un adecuado balance de materia y energía. 2. Verifica que los datos de humedad sean los certificados para su óptimo rendimiento. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Correcta interpretación de los datos recogidos, para realizar el informe y destacar las características. 4. Correcta identificación de la materia prima según las normas vigentes de calidad. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de las características del tamaño, peso y cantidad de la biomasa. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar el proceso de densificación.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Hacer un seguimiento de la presión, temperatura y velocidad de la maquinaria.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE DESEMPEÑO</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Las variables del proceso de funcionamiento del densificador son conocidas. 2. Los diferentes tipos de densificadores son conocidos. 3. El proceso de funcionamiento de la maquinaria es revisada durante la realización del trabajo para asegurar el cumplimiento de los parámetros establecidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Configuración de los densificadores. 2. Rangos de presión, temperatura y velocidad permitidos en la maquinaria. 3. Interpretación de datos. 4. Normas de seguridad individual y colectiva. 5. Conocimiento de nomenclaturas, convenciones y normas ambientales. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registro de control. 2. Normas de seguridad individual y colectiva. 3. Nomenclaturas y convenciones. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Instrumentos de medida. 5. Maquinas de densificación. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa la maquinaria de densificación, para garantizar un adecuado funcionamiento. 2. La manera como registra los datos de medida, en los diferentes formatos dispuesto para esto. 3. La correcta aplicación de normas de seguridad en la realización de la molienda. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. La forma como maniobra el equipo de densificación según los manuales de operación. 5. Conoce las variables señaladas por los instrumentos de medida. 6. Garantiza que se cumplan la normas técnicas, ambientales y de seguridad. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato del comportamiento de la maquinaria. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar el proceso de densificación.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Verificar las condiciones de la biomasa final, para que cumplan con las especificaciones esperadas.</p> | |
| CRITERIOS DE DESEMPEÑO | CONOCIMIENTOS Y COMPRESION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El balance de materia y energía es conocido para establecer el rendimiento del proceso. 2. Los valores de humedad son revisados y certificados previamente a la salida de la biomasa. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Humedad del ambiente. 2. Humedad del solido a secar. 3. Vapor de agua generado en combustión de gasóleo gas. 4. Interpretación de datos. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de los tipos, tamaño y composición de la biomasa. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Instrumentos de medida. | <p>Por competencia:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisa el proceso de secado, para garantizar un adecuado balance de materia y energía. 2. Verifica que los datos de humedad sean los certificados para su óptimo rendimiento. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Conocer cualidades físicas, químicas y fisiológicas de la biomasa. 4. Conoce las características y la composición de la biomasa final según las normas vigentes de calidad. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Elabora Registros adecuadamente en la bitácora o formato de las características de la biomasa. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de gasificación.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Suministrar al reactor el agente gasificante y la biomasa cumpliendo con los parámetros establecidos.</p> | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSION |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El agente gasificante es seleccionado de acuerdo con las características requeridas en la gas. 2. La cantidad de biomasa y agente gasificante se suministra al reactor en base a la relación biomasa/agente gasificante especificada. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Tipos de reactores. 2. Características y tipos de agentes gasificantes. 3. Relación de agente gasificante y biomasa introducida al reactor. 4. Normas de seguridad individual y colectiva. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de los consumos de agente gasificante y biomasa. 2. Manuales de operación. 3. Normas de seguridad. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Reactor | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Establece la relación másica entre agente gasificante y biomasa. 2. Controla el consumo de agente gasificante y biomasa al reactor cumpliendo con normas de seguridad. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Conoce la composición del gas obtenido cuando se emplea los diversos tipos de agentes gasificante. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los consumos de biomasa y agente gasificante. |

| | |
|---|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de gasificación.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Controlar y registrar las variables de operación de modo que se obtenga el gas con las características especificadas.</p> | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los instrumentos de medida y control son localizados en el sistema. 2. Las variables de operación son controladas y registradas en forma oportuna durante el proceso. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Variables de medida (temperatura, nivel, velocidad, presión). 2. Variables de manipulación (caudal de agente gasificante y alimentación). 3. Normas de seguridad. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de las variables de operación. 2. Manuales de operación. 3. Normas de seguridad. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Reactor | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Opera y controla las variables de operación para obtener un gas con características específicas. 2. Aplica normas de prevención de riesgos y cumple las medidas de seguridad establecidas para el proceso <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Identifica las variables que pueden ser medidas y las que pueden ser manipuladas. 4. Identifica los instrumentos de medida y control. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Realizar proceso de gasificación.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Realiza control continuo del proceso cumpliendo con normas de seguridad.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE COMPETENCIA</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El gasificador se opera y se mantiene en buenas condiciones. 2. La cantidad y calidad de agente gasificante y la biomasa son verificados para garantizar los requerimientos del proceso. 3. Los instrumentos de medida y control se revisan en forma continua. 4. El proceso de gasificación es supervisado, para verificar que se cumpla con lo establecido. | <ol style="list-style-type: none"> 1 Normas ambientales, seguridad individual y colectiva. 2 Funcionamiento del gasificador. 3 Sistemas de control y medida. 4 Cantidad y calidad de agente gasificante y biomasa. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Manuales de operación. 2 Normas. 3 Registros de control del proceso. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4 Reactor | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Manipula los sistemas de medida y control siguiendo las normas de seguridad. 2 Verifica la cantidad y calidad de agente gasificante y biomasa requeridos en el proceso. 3 Supervisa el desarrollo de la gasificación de la biomasa, de acuerdo con lo establecido. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4 Identifica las posibles fallas del proceso 5 comprueba el cumplimiento de las normativas establecidas a las que el proceso está sujeto. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6 Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Efectuar limpieza y adecuación del gas. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Eliminar las partículas solidas y cenizas del gas para proteger los equipos de la erosión y la corrosión.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE COMPETENCIA</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN</p> |
| <p>1 Las partículas solidas que pudieron ser arrastradas con el gas son retiradas. 2 Los sistemas de eliminación de partículas son conocidos. 3 El funcionamiento de los sistemas de eliminación de partículas es conocido. 4 Los sistemas de eliminación de partículas se operan y se mantienen en buenas condiciones</p> | <p>1 Normas ambientales, seguridad individual y colectiva. 2 Funcionamiento del sistema de eliminación de partículas. 3 Sistemas de eliminación de partículas.</p> |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <p>1 Manuales de operación. 2 Normas de seguridad. 3 Registro de condiciones de gas</p> <p>Equipo:</p> <p>4 Ciclones y filtros</p> | <p>Por desempeño:</p> <p>1 Manipula los sistemas de eliminación de partículas cumpliendo las normas de seguridad establecidas para estos equipos. 2 Revisa los sistemas antes y después de su manipulación</p> <p>Por conocimiento:</p> <p>3 Identifica los diferentes sistemas de eliminación de partículas.</p> <p>Por producto:</p> <p>4 Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso</p> |

| | |
|--|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Efectuar limpieza y adecuación del gas.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Realizar el enfriamiento del gas dado que los sistemas de limpieza y motores trabajan a bajas temperaturas.</p> | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El gas es enfriado antes de ser introducido a los filtros. 2. Los intercambiadores de calor utilizados en la refrigeración del gas son operados de forma correcta. 3. Los instrumentos de medida y control son localizados en el sistema. 4. El caudal que pasa por el intercambiador es regulado para mantener la temperatura de salida del aire. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Intercambiadores 2. Temperatura del gas requerida. 3. Variables de medida (temperatura). 4. Variables de control (agua, aire, vapor). 5. Norma ambientales y de seguridad |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manuales de operación. 2. Normas de seguridad. 3. Registro de datos <p>Equipo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Intercambiadores. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manipula los sistemas de medida y control siguiendo las normas de seguridad. 2. Verifica que los sistemas de intercambiadores se encuentren en condiciones óptimas. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Determina la temperatura del gas requerida en el proceso. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso |

| | |
|--|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Efectuar limpieza y adecuación del gas.</p> <p>ELEMENTO DE COMPETENCIA: Reducir las particular restantes en el gas cumpliendo con los parámetros determinados.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE COMPETENCIA</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los filtros utilizados en la reducción de partículas son operados de forma correcta. 2. La temperatura del gas es acondicionada antes de pasar por los filtros. 3. Los sistemas de control de los filtros son conocidos. 4. Los tipos de fallos del sistema son conocidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Tipos de filtros de mangas. 2. Normas de seguridad y ambientales. 3. Perdida de carga de los filtros. 4. Temperatura del gas adecuada con las mangas empleadas. 5. Controles de temperatura y de presión diferencial. 6. Fallos (mecánicos, térmicos y químicos) |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manuales de operación. 2. Normas de seguridad. 3. Registros de control <p>Equipo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Filtros. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manipula los diferentes controles de operación siguiendo las normas de seguridad. 2. Verifica la perdida de carga de los filtros y determinar la frecuencia con que debe realizarse los ciclos de limpieza. 3. Revisa que los filtros se encuentre en condiciones óptimas. 4. Supervisa el cumplimiento de los parámetros de funcionamiento del sistema <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Identifica los posibles fallos o rupturas en las mangas durante su funcionamiento. 6. Conoce el funcionamiento y la forma de operar los filtros. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso |

| | |
|--|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Efectuar limpieza y adecuación del gas. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Realizar operación de lavado del gas para separar los alquitranes.</p> | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El gas es lavado para eliminar partículas pequeñas o polvo y alquitranes. 2. El funcionamiento de los sistemas de lavado de gases son conocidos. 3. Los sistemas utilizados en el lavado de gases son operados de forma correcta. 4. Los sistemas de separación de partículas son seleccionados de acuerdo a las características deseadas del gas. 5. Las condiciones de temperatura son conocidas para garantizar un adecuado proceso del gas. 6. El caudal de agua y la descarga de gas son revisados continuamente para detectar anomalías. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Principio de funcionamiento de los lavadores. 2. Normas de seguridad. 3. Caudal de agua por Nm³ de gas. 4. Niveles de temperatura. 5. Características del gas. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manuales de operación. 2. Normas de seguridad. 3. Registros <p>Equipo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Torres de lavado | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manipula los lavadores, supervisando el correcto funcionamiento. 2. Revisa los lavadores de gas antes y después de su utilización para su mantenimiento. 3. Verifica el cumplimiento de los parámetros de funcionamiento del sistema de lavado. 4. Maniobra los equipos de lavado del gas según los manuales de operación. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Determina el caudal de agua necesario para el lavado de los gases. 6. Interpreta los datos de media para el correcto funcionamiento del proceso. 7. Identifica los sistemas de lavado del gas. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Efectuar limpieza y adecuación del gas. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Reducir la humedad del gas cumpliendo con las especificaciones requeridas.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE COMPETENCIA</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El gas producto es secado para reducir el contenido de humedad. 2. Las condiciones de temperatura son conocidas para garantizar un adecuado proceso de secado. 3. La potencia eléctrica es adecuada para la refrigeración del gas. 4. El funcionamiento de los sistemas de refrigeración son conocidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Contenido de humedad del gas. 2. Niveles de temperatura. 3. Potencia eléctrica. 4. Sistemas de refrigeración. |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manuales de operación. 2. Normas de seguridad. 3. Registros de control. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Sistemas de refrigeración. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Controla las variables de operación para obtener un gas con características específicas. 2. Realiza reportes de los resultados obtenidos en el proceso de secado del gas, empleando los medios y formatos disponibles. <p>Por conocimientos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Identifica las variables de operación del sistema de refrigeración. 4. Conoce los valores de humedad permitidos en el gas producto. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los valores de humedad del gas producto. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Efectuar limpieza y adecuación del gas. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Verificar que se cumplan las características específicas del gas para ser empleado en el motor o turbina a gas.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE COMPETENCIA</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN</p> |
| <p>1. Las muestras del gas se toman a intervalos continuos para tener la información de la heterogeneidad de la misma. 2. Las muestras del gas obtenidas se analizan para determina la concentración de los diferentes componentes de gas mediante el análisis cromatográfico.</p> | <p>1. Concentración de componentes químicos en el gas permitidos. 2. Normas de calidad y ambientales. 3. Análisis cromatográfico. 4. Intervalos de tiempo. 5. Equipos (sensores, cromatógrafo de gases).</p> |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <p>1. Manuales de operación. 2. Normas de seguridad. 3. Normas de calidad 4. Registros de control.</p> <p>Equipos:</p> <p>5. Cromatógrafo de gases 6. Sensores</p> | <p>Por desempeño:</p> <p>1. Opera correctamente los instrumentos para la determinación de los componentes del gas producto. 2. Realiza la toma de muestras de gas en los tiempos establecidos para tener la información adecuada de la misma.</p> <p>Por conocimiento:</p> <p>3. Analiza las propiedades del gas y decide su calificación. 4. Conoce los rangos de concentración de los diferentes componentes del gas permitidos.</p> <p>Por producto:</p> <p>5. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los componentes del gas producto.</p> |

| | |
|---|---|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Obtención de energía mecánica. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Suministrar a la turbina de gas el combustible (gas) cumpliendo con los parámetros establecidos.</p> | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Las propiedades del gas son verificadas antes de ser suministrado a la turbina de gas. 2. El principio de funcionamiento de la turbina son conocidos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Turbina de gas. 2. Características específicas del gas. 3. Normas de seguridad individual y colectiva. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de los consumos de combustible. 2. Manuales de operación. 3. Normas de seguridad. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Turbina de Gas | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Controla el consumo del combustible (gas) cumpliendo con normas de seguridad. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Conoce la composición del gas utilizado como combustible para el motor y la turbina. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los consumos de combustible. |

| | |
|--|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Obtención de energía mecánica. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Controlar y registrar las variables de operación del equipo utilizado.</p> | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los instrumentos de medida y control son localizados en el sistema. 2. Las variables de operación son controladas y registradas durante el proceso. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Variables de medida (temperatura, velocidad, presión, caudal de aire). 2. Variables de manipulación. 3. Normas de seguridad. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de las variables de operación. 2. Manuales de operación. 3. Normas de seguridad. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Motor Stirling 5. Turbina de Gas 6. Caldera de recuperación de calor | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Opera y controla las variables de operación para correcto funcionamiento de las maquinas. 2. Aplica normas de prevención de riegos 3. Cumple las medidas de seguridad establecidas para el proceso. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Identifica las variables que pueden ser medidas y las que pueden ser manipuladas. 5. Identifica los instrumentos de medida y control. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 6. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso. |

| | |
|--|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Obtención de energía mecánica. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Realiza control continuo del proceso cumpliendo con normas de seguridad.</p> | |
| <p>CRITERIOS DE COMPETENCIA</p> | <p>CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN</p> |
| <p>1. El motor Stirling o la turbina de gas son supervisados manteniéndolos en buenas condiciones. 2. La cantidad y calidad de gas es verificado para garantizar los requerimientos del proceso. 3. Los instrumentos de medida y control se revisan en forma continua.</p> | <p>1 Normas ambientales, seguridad individual y colectiva. 2 Funcionamiento del equipo (motor Stirling, turbina de gas y caldera de recuperación de calor). 3 Sistemas de control y medida. 4 Cantidad y calidad del gas.</p> |
| <p>RANGOS DE APLICACIÓN</p> | <p>EVIDENCIAS REQUERIDAS</p> |
| <p>Documentos:</p> <p>1 Manuales de operación. 2 Normas. 3 Registros de control del proceso.</p> <p>Equipos:</p> <p>4. Motor Stirling 5. Turbina de Gas</p> | <p>Por desempeño:</p> <p>1 Manipula los sistemas de medida y control siguiendo las normas de seguridad.</p> <p>2 Supervisa el desarrollo del proceso de generación de energía mecánica, de acuerdo con los parámetros establecidos.</p> <p>Por conocimiento:</p> <p>3 Identifica las posibles fallas del proceso. 4 Comprueba el cumplimiento de las normativas establecidas a las que el proceso está sujeto.</p> <p>Por producto:</p> <p>5 Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso.</p> |

| | |
|---|---|
| UNIDAD DE COMPETENCIA: Obtención de energía eléctrica. | |
| ELEMENTO DE COMPETENCIA: Controlar y registrar las variables de operación del generador | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Los instrumentos de medida y control son localizados en el sistema. 2. Las variables de operación son controladas y registradas en forma oportuna durante el proceso. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Variables de manipulación (tensión, frecuencia, velocidad). 2. Normas de seguridad. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Registros de las variables de operación. 2. Manuales de operación. 3. Normas de seguridad. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Generador | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Opera y controla las variables de operación para correcto funcionamiento del generador. 2. Aplica normas de prevención de riesgos y cumple las medidas de seguridad establecidas para el proceso. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Identifica los instrumentos de medida y control. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso. |

| | |
|---|--|
| <p>UNIDAD DE COMPETENCIA: Obtención de energía eléctrica. ELEMENTO DE COMPETENCIA: Realiza control continuo del proceso cumpliendo con normas de seguridad.</p> | |
| CRITERIOS DE COMPETENCIA | CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. El generador se operan y se mantienen en buenas condiciones. 2. Los instrumentos de medida y control se revisan en forma continua. | <ol style="list-style-type: none"> 1 Normas ambientales, seguridad individual y colectiva. 2 Funcionamiento del generador. 3 Sistemas de control y medida. |
| RANGOS DE APLICACIÓN | EVIDENCIAS REQUERIDAS |
| <p>Documentos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Manuales de operación. 2 Normas. 3 Registros de control del proceso. <p>Equipos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Generador. | <p>Por desempeño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 Manipula los sistemas de medida y control siguiendo las normas de seguridad. 2 Supervisa el desarrollo del proceso de generación de energía eléctrica, de acuerdo con los parámetros establecidos. <p>Por conocimiento:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3 Identifica las posibles fallas del proceso. 4 Comprueba el cumplimiento de las normativas establecidas a las que el proceso está sujeto. <p>Por producto:</p> <ol style="list-style-type: none"> 5 Registra adecuadamente en la bitácora o formato los datos tomados durante el proceso. |

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

➤ Conclusiones

En la realización y desarrollo del presente trabajo de grado, se plantea implementar una metodología, que documente y describa el entorno referente al proceso (obtención de energía a partir de la gasificación) y al análisis de las distintas disciplinas puestas en marcha en este proyecto. Convirtiéndose la metodología IDEF0 y el análisis funcional en un pilar fundamental para la construcción de esta propuesta.

La caracterización del proceso de gasificación con la metodología propuesta (IDEF0) constituye la herramienta más amigable que permite describir detalladamente el proceso desde la preparación de la biomasa como fuente energética, hasta la obtención del producto final (energía eléctrica, térmica, mecánica y química), para ello se identifica claramente las entradas, los controles, los mecanismos y las salidas del proceso, y se muestra además la forma en que interactúan en cada etapa del proceso; facilitando la toma de decisiones respecto a las acciones de control y los mecanismos a implementar en dicho proceso.

La aplicación del análisis funcional permite elaborar mapas de procesos en un lenguaje entendible y concreto, mostrando el desarrollo del proceso de gasificación, en torno a las necesidades y requerimientos de la función a realizar, facilitando la elaboración de identificación de competencias laborales propias de dicho proceso.

En la realización de este documento se obtuvieron los diagramas funcionales que relacionan las diferentes funciones productivas e involucran las unidades de competencia con sus respectivos elementos. De esta forma se aplica en el desarrollo de los componentes normativos necesarios para evaluar el desempeño laboral realizado en las diferentes funciones productivas. En este proceso se tienen en cuenta las necesidades de formación y la orientación para ofrecer al trabajador la capacitación o entrenamiento que se requiera en la actividad.

Las conclusiones del proceso que van desde la preparación de la biomasa como combustible hasta la generación de energía, se presentan a continuación.

- ↪ La utilización de la biomasa es de gran utilidad ya que puede transformarse en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, de contenidos bajos de azufre y CO₂ casi neutro; por medio de tecnologías hoy en día en evolución.
- ↪ La gasificación presenta la ventaja de ser un proceso eficiente para la eliminación de cualquier residuo (forestales, industriales, urbanos, etc.), permitiendo a diferencia de otros procesos, la limpieza del gas antes de su inyección a las turbinas de gas.
- ↪ El poder calorífico del gas depende del tipo agente gasificante (aire, oxígeno, vapor, hidrogeno, etc.) que se utilice.
- ↪ El uso de motores Stirling reduce la contaminación química, reduciendo los gases generados ya que pueden filtrarse, además son muy silenciosos debido a que no poseen válvulas ni fases de explosión en su ciclo. Esto se debe a que son maquinas con fuentes de calor externa, razón por la cual utiliza cualquier fuente de energía.
- ↪ Existe un alto potencial para generar y cogenerar energía eléctrica a partir de los diferentes tipos de residuos agroindustriales. Esto hace factible de implementar en cualquier fábrica, industria y campos alejados de zonas de interconexión eléctrica.
- ↪ La cogeneración proporciona una mayor eficiencia energética y uso racional de la energía, ayuda a reducir las emisiones de CO₂ haciendo uso de todas las opciones de generación, que de otra manera serian improductivas.
- ↪ Los residuos generados en el proceso de gasificación, son inertes y pueden ser llevados a vertederos controlados o utilizarse como fertilizantes para abonos.

➤ **Recomendaciones**

- ✓ Aquí se generó un documento soporte basado en la metodología IDEF0 y el análisis funcional, con información de procedimientos operativos del proceso de generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de la biomasa, utilizando motor Stirling y turbina a gas. Por esto es conveniente continuar con el desarrollo e implementación de otras cadenas productivas u otras tecnologías, ya que este documento presenta un trabajo estructurado de tal forma que puede ser flexible y adaptable, pues puede cambiarse o incluirse nuevas actividades.
- ✓ Se espera que éste sea la base de una cadena de estandarización de procesos que conlleven al mejoramiento de los procesos de generación a partir de residuos agroindustriales e industriales. Por eso se recomienda en futuros proyectos, desarrollar e integrar equipos interdisciplinarios para el estudio de viabilidad y factibilidad económica de la implementación de estos proyectos, de tal manera que contribuya a la optimización y el aprovechamiento racional de las fuentes energéticas.
- ✓ Para obtener combustibles de gran poder calorífico, es recomendable la transformación adecuada de la biomasa (tamaño), evitando así que factores como el contenido de humedad conlleven bajos valores caloríficos y la aparición de alquitranes, materiales volátiles y cenizas, que ocasionan problemas técnicos y económicos.
- ✓ El sistema de gasificación está limitado por las características de la masa que ingresa al reactor, por eso se recomienda elegir el diseño del gasificador que aprovechen sus ventajas de acuerdo con el combustible, la aplicación y la sencillez de operación.
- ✓ El proceso de generación de energía a partir de la gasificación puede ser una alternativa importante para el sostenimiento del sector industrial, sin

embargo hay que mantener los estudios de estos procesos ya que la innovación de tecnologías avanza cada día más rápida y puede ser un valor agregado.

- ✓ Se recomienda estudiar el aprovechamiento de los residuos agrícolas del sector local y nacional (Santandereano, Colombiano), para su uso en los sistemas de cogeneración, ya que el uso de estos, podría aumentar significativamente la producción de energías (eléctrica, térmica, mecánica y química) y la eficiencia global.

GLOSARIO

- ✓ **Adiabático:** En termodinámica se designa como proceso adiabático a aquel en el cual el sistema (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno. Un proceso adiabático que es además reversible se conoce como proceso isotrópico.
- ✓ **Astillas** (“Chips”) - madera reducida a propósito en pequeñas piezas, proveniente de madera en bruto, o de residuos que resultan ser adecuados para fines energéticos. Por lo general son cortados con descantilladoras mecánicas (FAO).
- ✓ **Auto ignición:** Se denomina temperatura de autoignición a la temperatura mínima, a presión de una atmósfera, a la que un gas inflamable o mezcla de aire-vapor en contacto con el aire arde espontáneamente o es calentado en su superficie sin necesidad de una fuente de ignición.
- ✓ **Biocombustible – biocarburante (Biofuel):** Combustible usado para el transporte, producido a partir de la biomasa, como el etanol, el metanol, el biodiesel y los aditivos de la gasolina reformulada. Los biocombustibles son usados de manera pura o mezclados con gasolina (NREL).
- ✓ **Biodiesel:** Combustible elaborado a partir de los aceites orgánicos, que puede sustituir al diesel o mezclarse con éste.
- ✓ **Biogeneración de calor y electricidad:** Se puede producir calor y electricidad a partir de los procesos de combustión o gasificación. Incluye los de encendido/gasificación con biomasa solamente, o los de co-encendido/co-gasificación que combinan la biomasa y los combustibles fósiles.

- ✓ **Briquetas:** Material (aserrín, residuos de cultivos, restos de carbón vegetal) compactado bajo presión (densificación) para mejorar las características de los materiales para el transporte y su uso como fuente de energía. Al estar comprimidos y tener un bajo contenido de agua, éstos tienen una mayor densidad energética que la leña común, y para su almacenamiento necesitan un espacio menor. Se les llama también “carbón blanco”.
- ✓ **Carbón vegetal:** Residuos sólidos derivados de la carbonización, la destilación, la pirolisis y la torrefacción de la madera (de troncos y ramas de árboles) y de subproductos de madera que usan hornos de carbonización de pozo, ladrillo y metal. Incluye también las briquetas de carbón vegetal hechas de carbón de origen leñoso.
- ✓ **Combustibles biomásicos:** Todos los combustibles orgánicos de origen biológico usados con fines energéticos. Incluye toda la vegetación terrestre y acuática, sus residuos, tales como la leña, las ramas delgadas, la hojarasca, las cáscaras; los cultivos y sus residuos, como la paja de los cereales, las vainas de las semillas, el bagazo; los productos pecuarios y sus residuos (por ejemplo: estiércol).
- ✓ **Dendroenergía:** Término comúnmente usado en América Latina para referirse a la energía forestal (FAO).
- ✓ **Eficiencia** (“Efficiency”) - la conversión de una forma de energía a otra solamente es posible con pérdidas. De manera que la eficiencia del proceso indica el porcentaje de energía útil que permanece después de la conversión.
- ✓ **Endotérmico:** cualquier reacción química que absorbe calor
- ✓ **Entalpía:** Es una magnitud de termodinámica simbolizada con la letra H, la variación de entalpía expresa una medida de la cantidad de energía

absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o, lo que es lo mismo, la cantidad de energía que tal sistema puede intercambiar con su entorno.

- ✓ **Entropía:** Es una función de estado que mide el desorden de un sistema físico o químico, y por tanto su proximidad al equilibrio térmico. En cualquier cambio que se produce en un sistema aislado, la entropía de éste aumenta o sigue igual, pero nunca disminuye.
- ✓ **Gas pobre:** El gas combustible o gas pobre es una mezcla de monóxido de Carbono y Nitrógeno. Se forma cuando se pasa aire conteniendo un poco de vapor de agua a través de un combustible incandescente. La reacción del Carbono con el Oxígeno genera calor y este calor sensible es convertido en calor potencial en el gas por la reacción del carbónico tanto con el anhídrido carbónico formado en la combustión como con el vapor de agua contenido en el aire.
- ✓ **Gradiente:** Se denomina gradiente a la variación de intensidad de un fenómeno por unidad de distancia entre un lugar y un centro (o un eje) dado.
- ✓ **Isobara:** Presión constante.
- ✓ **Isocora:** Corresponde a un volumen constante
- ✓ **Isotermas:** De igual temperatura.
- ✓ **Pellets:** Combustibles provenientes de la auto-aglomeración de material leñoso resultado de la aplicación combinada de calor y alta presión en una máquina de expulsión. Estos tienen hasta un 96% de eficiencia de energía calorífica comparada con el 50-55% de un quemador de leña y el 15-20% de un fuego abierto (FAO).

- ✓ **Regenerador:** aparato para regenerar un catalizador, modificación de velocidad de las reacciones por ciertos cuerpos sin alteración al final del proceso.
- ✓ **Comburente:** Se denomina comburente a la sustancia que participa en la combustión oxidando al combustible (y por lo tanto siendo reducido por este último). El comburente más habitual es el oxígeno, que se encuentra normalmente en el aire con una concentración porcentual en volumen aproximada del 21%.
- ✓ **Reacción exotérmica:** Se denomina reacción exotérmica a cualquier reacción química que desprende calor, es decir con una variación negativa de entalpía. Se da principalmente en las reacciones de oxidación.
- ✓ **Inulina:** Es el nombre con el que se designa a una familia de glúcidos complejos (polisacáridos), compuestos de cadenas moleculares de fructosa.
- ✓ **Heterótrofa:** Un organismo heterótrofo es aquel que depende de otro, es decir; de una fuente externa de moléculas orgánicas, en cuanto a su energía.
- ✓ **Ignición:** La Ignición ocurre cuando el calor que emite una reacción llega a ser suficiente como para sostener la reacción química. El paso repentino desde un gas frío hasta alcanzar un plasma se denomina también ignición.
- ✓ **Char:** Sólidos carbonos producidos en la pirolisis.
- ✓ **Tar:** Fracciones de hidrocarburos compuestos de metano y otros compuestos orgánicos condensables denominados también alquitranes.

BIBLIOGRAFIA

(Aguillon-Gamino-Masera 2005). Estimación del Recurso y Prospectiva Tecnológica de la Biomasa Como Energético Renovable en México Omar R. Masera; Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, Javier Aguillón, Instituto de Ingeniería, UNAM, Benjamín Gamino, Instituto de Ingeniería, UNAM. Agosto 2005.

Disponible en: http://www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A2_Biomasa.pdf

(Álvarez- Callejón, 2002). Álvarez Flòrez Jesús Andrés; Callejón Agramunt Ismael, Et al. Maquinas térmicas motoras, México, Editorial, Alfaomega, enero 2002. Ediciones UPC, 2002

(Aragón, 2009). Aragón investiga. Disponible en:

http://www.aragoninvestiga.org/investigacion/temas_todo.asp?id_tema=28&intPag_Actual=1&categoria=Ciencias+Experimentales&id_categoria=290

Consultado: Mayo 2009

(Azevedo- da Silva 2007). Azevedo- da Silva Manual para elaboración de proyectos de centrales termoeléctricas con biomasa vegetal para comunidades aisladas de la Amazonía: Combustión y Gasificación. Universidad Federal de Pará; Belém, PA, Brasil Brasil. Autores: André Augusto Azevedo Montenegro Duarte, Augusto César de Mendonça Brasil, Daniel Onofre de Almeida Cruz, Danielle Regina da Silva Guerra, Emanuel Negrão Macêdo, Gonçalo Rendeiro , Manoel Fernandes Martins Nogueira.

(Beaumont, 1987). Ing. Eduardo Beaumont Roveda 1987. La biomasa como fuente de energía renovable. Una aproximación al tema. Dirección Nacional de Conservación y Nuevas Fuentes de Energía. Mayo 1987.

(Bioenergía, 2007). Guía de la Bioenergía “Obra social caja Madrid” Dirección general de industria energía y minas. 2007. Disponible en: http://www.obrasocialcajamadrid.es/Ficheros/CMA/ficheros/OSMedio_Bioenergia.PDF.

(Blog de tecnología, 2008). Blog de tecnología. Disponible en: <http://tecnotic.wordpress.com/>

Consultado: Noviembre de 2008

(Borgnakke-Sonntag-Van wylene, 1998). SONNTAG Richard E., BORGNAKKE Claus y VAN WYLEN, Gordon J. Fundamentals of thermodynamics. 5a. edición. Estados Unidos: John Wiley & Sons 1998.

(Cacho-Zamora). Lira Cacho J.G., Agüero Zamora V.R. Generación de energía eléctrica con un motor Stirling empleando un combustible gaseoso. Instituto de Motores de Combustión Interna, FIM; Universidad Nacional de Ingeniería. Consultado: Mayo 2009.

(Cengel-Boles, 2003). Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, Termodinámica. Editorial Mc Graw Hill Cuarta edición, 2003.

(Ciclones, 2009). Ciclones de alta eficiencia. Gruber hermanos S.A, Disponible en: <http://www.gruberhermanos.com/documentos/Ciclones.pdf>. Consultado: Febrero 2009.

(Cinterfor, 2009). CINTERFOR. Centro Interamericano para el Desarrollo del Conocimiento en la Formación Profesional, Disponible en: <http://www.ilo.org/public/spanish/region/ampro/cinterfor/temas/complab/xxxx/esp/xvi.htm>

Consultado: Junio 2009

(Competencias, 2009). Identificación de competencias. Disponible en:
<http://www.cinterfor.org.uy/public/spanish/region/ampro/cinterfor/publ/papel/13/pdf/parteb.pdf>. Consultado: Junio 2009.

(Competencias laborales, 2003). Área de Formación y Capacitación para el Trabajo del Programa de Competencias Laborales. Proyecto de Diseño de Módulos de Formación Técnica con Enfoque de Competencias Laborales (MINEDUC-DIVESUP). Agosto de 2003.

Disponible en: <http://www.chilecalifica.cl/prc/n-0-complab1.pdf>

(Conocer, 1998). Consejo de Normalización y Certificación de Competencia Laboral. (Conocer). Análisis Ocupacional y Funcional del Trabajo. Programa de Cooperación Iberoamericana para el Diseño de la Formación Profesional, (IBERFOP). 1998.

(De Juana, José M^a 2002). De Juana, José M^a. Energías Renovables para el Desarrollo, Ed. Paraninfo S.A., (2002).

(Delgado-2001). Aplicación informática para el estudio del motor stirling mediante Visual Basic para uso docente. Realizado por: Roberto Delgado Martínez y supervisado por: Cristina Alonso Tristán Y Fernando Aguilar Romero. C.A.T. Área de Máquinas y Motores Térmicos 2001

Disponible en:
<http://www2.ubu.es/ingelec/maqmot/StirlingWeb/rendimiento/rendimiento.htm>

Consultado: Febrero 2009.

(DEUMAN-2003). "Transferencia de Tecnología para el cambio climático", informa final preparado por DEUMAN Ingenieros copia Noviembre 2003.

(Enciso, 2007). Enrique Enciso Encinas Guía para el aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal **Director Técnico:** Enrique Enciso Encinas, Ingeniero Técnico Forestal.

(Energías, 2009). Energías alternativas; Disponible en:

<http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo18.pdf> . Consultado: Febrero 2009

(Edar, 2008). Diseño de una planta de gasificación de lodos de EDAR, 2008.

Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2884/1/50095-1.pdf>
Consultado: Diciembre 2008.

(Emison, 2009). Filtros de Mangas, Emison. Disponible en:

<http://www.emison.es/medio-ambiente/pdf/humos/filtro%20de%20mangas.pdf>
Consultado: Febrero 2009.

(Ernesto E, 2002). Ernesto E., Velis R. A. Diseño y construcción de un motor Stirling para fines Didácticos. Trabajo de graduación preparado para la facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, 2002.

(Faaij, A. P. C. (1997)). Faaij, A. P. C. Energy from Biomass and Waste, Department of Science, Tesis doctoral, Universidad de Utrecht (Holanda)

(FAO 1993). El gas de madera como combustible para motores. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO-Roma 1993.

Disponible en <http://www.fao.org/docrep/T0512S/t0512s00.htm#Contents>

(Fernández, 2000). Fernández Diez Pedro, Turbinas de gas, Departamento de ingeniería eléctrica y energética, universidad de Cantabria, 2000.

Disponible: <http://es.libros.redsauce.net/?pageID=21>.

(Fernández 2002). Fernández Gonzales Jesús. Barreras para el desarrollo del empleo de los biocombustibles sólidos y líquidos. E. T. S. de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Diciembre 2002. Disponible en <http://www.istas.net/portada/bio07f.pdf>.

(Gámez, 2008). Juan Sebastián Gámez Valenzuela. El régimen especial y la tarifa eléctrica. Balance, situación y perspectiva. Cogeneración, biomasa y residuos. Universidad Pontificia Comillas. Escuela Técnica Superior de ingeniería (ICAI), Ingeniero Industrial. Madrid, junio 2008.

(Gómez, 2008) Gómez González Manuel. Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas. Enero 2008. Disponible en: <http://e-spacio.uned.es/fez/view.php?pid=bibliuned:23020>

(Guevara, 2002). Guevara, Marco A y Flores, César R. ALLFusion: Administrando Procesos Empresariales, 2002. Disponible en: http://www.librosdigitales.net/ld8_librero.php. Consultado: Octubre, 2008.

(Guía ambiental, 1999). Guía ambiental para termoeléctricas y procesos de cogeneración parte aire y ruido, Sena, Ministerio de medio ambiente.

Disponible en:

http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia_ambiental_para_termoel%C3%A9ctricas_y_procesos_de_cogeneracion_-_parte_aire_y_ruido.pdf

(IDEA- 2007) “Biomasa: Producción eléctrica y cogeneración”; Dirección Técnica: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía); Elaboración Técnica BESEL, S.A. (Departamento de Energía). Madrid, octubre de 2007.

(Documentos técnicos, 2009) Documentos técnicos.

Disponible en: <http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc41.htm>

Consultado: Junio 2009.

(Luna, 2005). Enrique Luna Santiago. Diseño de Compresor y Sistema de Diagnóstico de una turbina de gas. Trabajo de grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Ingeniería en Microelectrónica. Asesores: Dr Igor Lobada y Dr Vytaliy Nesym. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de ingeniería Mecánica y Eléctrica. México DF, Octubre 11 de 2005.

(Lleó, 2008). D. Alberto Lleó Alonso. Director Dpto. Desarrollo de Infraestructuras de Residuos y Calidad Ambiental. VAERSA. Centro de tecnologías limpias.

Disponible en:

http://www.cma.gva.es/comunes_asp/documentos/agenda/cas/56887-CONFERENCIA%20Alberto%20Lle%C3%B3%202.pdf .

(Máquinas, 2009). Turbo máquinas.

Disponible en: <http://www.uamerica.edu.co/tutorial/4turgas.htm>

Consultado: Mayo 2009.

(Martinez, 2008). M. Elena Martínez González 2008. Provisión de servicios energéticos básicos “LOYOLA SCHOOL” En India. Universidad Pontificia Comillas escuela técnica superior de ingeniería (icai). Junio 2008.

(Mattingly, 1996). MATTINGLY Jack D. elements of gas turbine propulsion. Singapur: McGraw-Hill International Editions 1996.

(McConkey-Eastop, 1970). McCONKEY, A. y EASTOP, T. D. Applied thermodynamics. New York: Longman Inc. 1970.

(Miliarium, 2009). Miliarium. Com, Ingeniería Civil y Medio Ambiente.

Disponible en:

http://www.miliarium.com/Monografias/Energia/Eficiencia_Energetica_Renovables/Cogeneracion.htm

Consultado: Junio 2009

(Nogués- Herrer 2002). Fernando Sebastián Nogués - Javier Royo Herrer. Ciclo energías renovables jornadas de biomasa; Fundación CIRCE Abril de 2002.

Disponible en:

http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random4991a1ff1b986/1234281334_Gralidades_biomasa.pdf.

[ONUDI 2007]. Guía para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI); Secretaría Estatal para Asuntos Económicos (SECO); Laboratorio de Análisis de Residuos (LARE). 2007. Disponible en:

http://www.unido.org/fileadmin/import/72852_Gua_Gestin_Integral_de_RSU.pdf

(Ortiz, 1994). Dr. Luis Ortiz Torres- 1994. Energías Xilogeneradas, ED TÓRCULO, Octubre 1994.

Disponible en: http://193.146.36.56/catedra/catedra/apuntes/PDFs/libro_xilo.pdf.

(Partículas, 2009) Control de partículas. Disponible en:

http://www.uv.es/gabaldoc/apuntes/Control_part%DDculas.pdf

Consultado: Enero 2009.

(Pirolisis, 2009). Pirolisis y gasificación.

Disponible en: <http://193.146.36.56/catedra/catedra/asignaturas/Pirogas.pdf>

Consultado: Marzo, 2009.

(Posluszny, 2004). Ing. José Antonio Posluszny. Energía De La Biomasa, Tecnologías Para Emprendimientos De Mediana Escala. MSc Universidad nacional de misiones. Agosto 23 de 2004.

(Rapun, 1999) José Luis Rapun Jiménez, Modelo Matemático del comportamiento de ciclos combinados de Turbinas de gas y vapor. Tesis Doctoral, Departamento de ingeniería energética y fluido mecánica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, 1999.

(Roberto Román, 2009). Roberto Román L. Conceptos Básicos para Diseño de motor Stirling con baja diferencia de temperatura. Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Chile.

Consultado: Mayo 2009.

(RWEDP, 2002). "Wood energy basics". Regional Wood Energy Development. Programme in Asia, Bangkok, Thailand.

Disponible en: <http://www.rwedp.org>.

(Senovilla-Antolin). Laura Senovilla Arranz, Gregorio Antolín Giraldo. Revalorización Energética de los Residuos de la Industria Vitivinícola, Disponible en: http://www.eis.uva.es/energias-renovables/trabajos_05/SenovillaArranz.pdf.

Consultado: Mayo 2009.

(Silva, 2009) Electo Silva Lora, Motores Stirling utilizando biomasa como combustible, NEST Instituto de Ingeniería mecánica Universidad Federal de Itajubá

Disponible: <http://www.nest.unifei.edu.br/english/pags/downloads/files/Biocomb-Colombia%20I.pdf>

Consultado: Enero 2009

(Térmicos 2009). Procesos térmicos.

Disponible: <http://www.cps.unizar.es/~proter/Gasificaci%F3n.htm>

Consultado: Marzo 2009.

(Treviño, 2009) Tecnología de gasificación integrada en ciclo combinado: GICC; Aplicación real en España: ELCOGAS. Puertollano. **Manuel Treviño Coca** *Consejero Delegado de ELCOGAS S.A.* Disponible en:

http://212.170.221.11/elcogas_body/images/IMAGEN/TECNOLOGIAGICC/GICCtecnologiaimpiadelcarbon.pdf.

Consultado: Febrero 2009.

(Triana, 2001), Álvaro Alyamani y PORTO Eberto Darío. Normas de Competencia laboral: Perfil Ocupacional del Personal de Mantenimiento de Protecciones Eléctricas y Operación de Subestaciones Eléctricas de INTERCONEXION ELECTRICA S.A. E.S.P. – I.S.A. Trabajo de Grado Ingeniería Eléctrica. Dirigido por: Gilberto carrillo Caicedo. Codirigido por: Cristian Augusto Remolina. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, UIS. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones, 2001.

(Vera, 2005), VERA, Edwin. Lineamientos para la elaboración de programas de formación por competencia laboral para el personal técnico de ISA S.A. E.S.P. Trabajo de Maestría Ingeniería Eléctrica. Dirigido por: Gilberto carrillo Caicedo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, UIS. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones, 2005.

(Wikipedia, 2009). Wikipedia la Enciclopedia Libre.

Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Generador_el%C3%A9ctrico

Consultado: Junio 2009.

(Wyman et al, 1992). Renewable energy, sources for fuels and electricity, island press, Washington D.C 1992.

(Zuñiga, 2003). Zuñiga, Luis Enrique. Metodología para la Elaboración de Normas de Competencia Laboral. Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA. Bogotá Colombia 2003.

ANEXOS

ANEXOS BIOMASA

Composición química de la biomasa

Tabla 1. Composición química de diferentes formas de biomasa.

| Tipo de biomasa | Porcentaje del peso (sin humedad) | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|------|------|-------|-------|------|--------|
| | C | H | N | O | S | Cl | Ceniza |
| Madera | | | | | | | |
| Sauce | 47,66 | 5,2 | 0,3 | 44,70 | 0,03 | 0,01 | 1,45 |
| Madera suave | 52,10 | 6,10 | 0,20 | 39,90 | - | - | 1,70 |
| Madera dura | 50,48 | 6,04 | 0,17 | 42,43 | 0,08 | 0,02 | 0,78 |
| Eucalipto | 50,43 | 6,01 | 0,17 | 41,53 | 0,08 | 0,02 | 1,76 |
| Corteza de pino | 52,30 | 5,80 | 0,29 | 38,76 | 0,03 | 0,01 | 2,90 |
| Aserrín pino | 52,49 | 6,24 | 0,15 | 40,45 | 0,03 | 0,04 | 0,80 |
| Sub-productos agrícolas | | | | | | | |
| Brizna de trigo | 39,07 | 4,77 | 0,58 | 50,17 | 0,08 | 0,37 | 4,96 |
| Caña de azúcar | 44,80 | 5,35 | 0,38 | 39,55 | 0,01 | 0,12 | 9,79 |
| Bagazo de caña | 46,95 | 5,47 | 0,38 | 39,55 | 0,01 | 0,12 | 9,79 |
| Paja de arroz | 39,65 | 4,88 | 0,92 | 35,77 | 0,12 | 0,50 | 18,16 |
| Cascarilla de arroz | 38,68 | 5,14 | 0,41 | 37,45 | 0,05 | 0,12 | 18,15 |
| Paja de maíz | 46,91 | 5,47 | 0,56 | 42,78 | 0,04 | 0,25 | 3,99 |
| Fibra de coco | 50,29 | 5,05 | 0,45 | 39,63 | 39,63 | 0,28 | 4,14 |

Fuente: (RWEDP, 2002)

Valor calorífico de la biomasa

Tabla 2. Poder calórico de algunas formas de biomasa.

| Tipo de Biomasa | Valor calorífico bruto (MJ/kg) |
|---------------------------------|--------------------------------|
| Madera | |
| Astilla de madera | 20,89 |
| Corteza de pino | 20,95 |
| Desechos industriales de madera | 19,00 |
| Sub-productos agrícolas | |
| Paja de trigo | 18,94 |
| Caña | 18,06 |
| Bagazo | 18,09 |
| Cáscara de coco | 18,60 |
| Cascarilla de arroz | 15,58 |
| Aserrín | 19,34 |

Fuente: (RWEDP,2002)

ANEXOS GASIFICACION

Pre calentador de aire: El precalentador de aire es utilizado, para aportar el aire a la temperatura requerida del reactor de gasificación, aprovechando parte de la energía que posee el vapor sobrecalentado generado en la caldera de recuperación.

El más frecuente consiste en un calentador de aire tubular. El vapor procedente del intercambiador pasa por dentro de los tubos, mientras que el aire frío circula por la parte exterior de éstos. Esta disposición permite una limpieza más sencilla, ya que la accesibilidad al interior de los tubos es posible sin el desmantelamiento del envolvente. El gas generado lleva consigo más impurezas que el aire.

Depósito de cenizas: El depósito de cenizas acumula estos materiales hasta que son recogidos para ser depositados en vertederos o tratados en las plantas correspondientes. Es importante que cumplan las medidas de seguridad necesarias para prevenir escapes de materia y olores.

Sistema de alimentación de aire: Este sistema es el encargado de proporcionar el aire a los reactores de gasificación. El sistema incluye principalmente un compresor, un depósito de aire a presión, los diferentes distribuidores de aire, las tuberías y las válvulas de interconexión.

Sistema de refrigeración: Este sistema es el encargado de la evacuación de calor de aquellos puntos de la planta que así lo requieran. Es el caso de la camisa del tornillo sinfín de la alimentación.

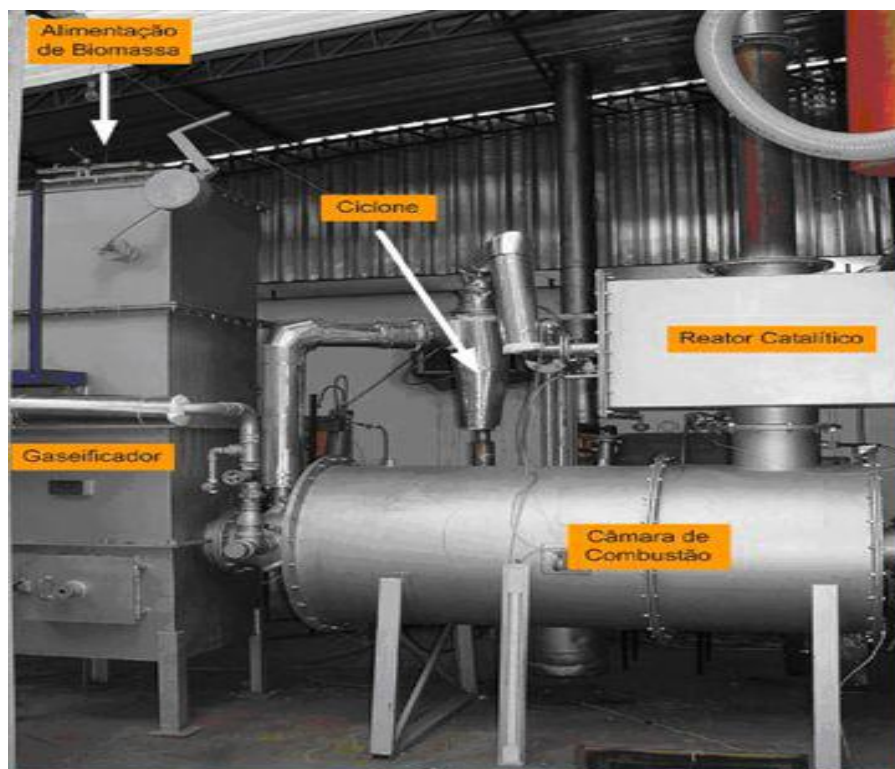
Medidores de temperatura: La temperatura, y el caudal, es la variable que más se va a medir a lo largo del proceso, aunque también mediremos la presión en diferentes puntos.

Los instrumentos que se utilizan para medir la temperatura en el proceso de gasificación deben ser resistentes, y tener una exactitud acorde a los resultados deseados, los más utilizados en la industria química son los termopares.

Estos sensores deben ser colocados estratégicamente para controlar la evolución de la temperatura en el gasificador como son:

Temperatura sobre el distribuidor de agente gasificante (aire primario),

- Controlar el caudal de aire primario.
- Temperatura del lecho previa a la inyección de aire secundario.
- Temperatura del lecho posterior a la inyección de aire secundario.
- Temperatura del freeboard, previa a la salida de los gases del gasificador.
- Temperatura del aire primario a la entrada del gasificador.
- Temperatura de descarga de cenizas.
- Temperatura del vapor inyectado como agente gasificante.
- **Figura.** Prototipo del proceso de gasificador.



Fuente [Silva 2009]

ANEXOS MOTOR STIRLING

ANEXOS MOTOR STIRLING

Figura. Motor Stirling de 35 kW



Fuente [Silva 2009]tor Stirling tipo β .

- ✓ Posee 4 cilindros.
- ✓ Su potencia es de 35 [Kw] eléctrico
- ✓ 102 [Kw] térmico
- ✓ El fluido de trabajo es el Helio
- ✓ Su velocidad nominal 1010 rpm
- ✓ Combustible: Gas pobre, producto de la gasificación de la biomasa.

Tabla. Resultados de pruebas hechas en Ansanger- Dinamarca 4 de junio del 2002.

| | | Test | Simulación |
|----------------------------------|---|------|------------|
| Energía eléctrica | Salida eléctrica del motor, [Kw] | 34,7 | 34,7 |
| | Succiónador, [Kw]. | 2,34 | 1,33 |
| | Soplador del gasificador, [Kw]. | 0,9 | 0,27 |
| Refrigeración del sistema | Poder calorífico, [Kw]. | 101 | 97,6 |
| | Salida de calor, [Kw]. | 63 | 49,2 |
| | Refrigeración del motor, entrada [T °C] | 41,9 | 25 |
| | Refrigeración de motor, salida [T °C] | 57,2 | 40 |
| | Economizador, Salida [T °C] | 63 | 40 |
| Combustion del sistema | Tubos calentadores, medio [T °C] | 717 | |
| | Culatas de los cilindros, medio [T °C] | 639 | |

Fuente [Silva Lora, 2002]

ANEXOS PROCESO GENERAL

