UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INCINERACIÓN PARA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTAN:

EDUARDO RAMÍREZ NIETO

LUIS PERCEO ZUÑIGA BELMONT

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ

MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA 2014

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: **Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz**

VOCAL: **Dra. Alejandra Castro González**

SECRETARIO: **Dr. Federico Mendez Lavielle**

1er. SUPLENTE: **Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo**

2do. SUPLENTE: **M.I. Luis César Vázquez Segovia**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

ASESORA DEL TEMA:

Dra. Alejandra Castro González _____

SUSTENTANTES:

Eduardo Ramírez Nieto _____

Luis Perceo Zuñiga Belmont _____

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ofrecerme el privilegio de formar parte su comunidad, por desarrollar mi espíritu universitario e inculcarme un alto compromiso hacia la sociedad. Por dejar marcada en mí la identidad universitaria y los recuerdos del hermoso campus de mi Universidad.

A la Facultad de Ingeniería y a sus profesores, que me brindaron los conocimientos que forjaron mi formación profesional, por la constante orientación y por el trato humano. A mis compañeros ingenieros, que me brindaron lecciones que se transformaron en experiencias de vida.

A la Dra. Alejandra Castro, por dirigir este proyecto de investigación con paciencia, compromiso y constante orientación. Por encausar mi conocimiento.

A mis padres Irma Nieto y Juan Ramírez, por el amor, el cariño y los cuidados, por alentarme e inspirarme, por su inmenso apoyo. A mis hermanos Gustavo, Ricardo y Claudia por acompañarme en tantos procesos de aprendizaje.

Al ingeniero Carlos Gózales por darme la oportunidad de trabajar en sus instalaciones, por su supervisión, por aportar gran parte de los recursos de este proyecto y por compartir su conocimiento y experiencia profesional.

A Natalia Carvajal, por ser mi compañera, por su apoyo y amor incondicional. Por ser la merecedora de los mejores días de mi vida, pero sobre todo por contribuir de forma activa en este proyecto.

Eduardo Ramírez Nieto

AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar esta tesis a mi abuelo Jesús Belmont que me brindó su total confianza y apoyo, por alentarme en momentos difíciles y brindarme la oportunidad de poder compartir su conocimiento en este trabajo, hoy ya no estás para ver este gran paso, pero estoy seguro que en donde quiera que te encuentres estarás feliz. Gracias.

A mi asesora la Dra. Alejandra Castro González que gracias a su valioso conocimiento y su dedicación fue posible la conclusión de este trabajo, en especial agradezco que haya sido la artífice de esta gran idea.

A mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México que me dio la oportunidad de desarrollarme personal e intelectualmente dentro de sus instalaciones, es un orgullo pertenecer a esta gran institución y poder representarla en el mundo laboral y profesional con el compromiso, ética y el gran compromiso para con la sociedad y el medio ambiente.

A mis padres Victoria Belmont y Victor Zuñiga que gracias a su amor, paciencia y consejos no hubiera sido posible llegar a esta instancia, la cual es la herencia más valiosa que pudiera recibir.

A mi hermano Victor Paris Zuñiga Belmont quien fue pieza fundamental en esta gran meta, ya que sin sus consejos el haber estudiado la universidad no hubiera sido posible, que gracias a su gran confianza y esfuerzo esta meta se ha concluido.

A la empresa Calor Controlado S.A de C.V, representada por el Ing. Jaime Enrique Chavira Larreynaga y mi gran amigo Carlos González Chavira que gracias a su conocimiento, el apoyo profesional de su equipo de trabajo y su ética profesional, han sido de gran importancia para la realización de este trabajo.

A mis amigos Pablo Lechuga y Pablo Ricardo de la Facultad de Ingeniería que hicieron de mi instancia en la universidad una época maravillosa.

A la Facultad de Ingeniería y mis profesores, por haberme dado las herramientas y el conocimiento necesario para competir en el mundo laboral y profesional.

Luis Perceo Zuñiga Belmont

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **IV**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **VII**

RESUMEN ..... **VIII**

INTRODUCCIÓN **1**

OBJETIVO **2**

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES **3**

1.1. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA 3
1.2. CENTRALES TERMOELÉCTRICAS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
1.2.1. Central térmica convencional ***7***
1.3. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS 8
1.4. CENTRALES EÓLICAS 122
1.5. CENTRALES FOTOVOLTAICAS 16
1.6. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PEQUEÑA ESCALA 18
1.6.1 Grupo electrógeno ***18***
1.6.1.1. Diversos tipos de grupos electrógenos ***18***8
1.6.2. Pila voltaica *19*
1.6.3. Pilas de combustible o celda de combustible ***20***
1.7. GENERADOR TERMOELÉCTRICO DE RADIOISÓTOPOS 211

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS **233**

2.1. MOTOR TÉRMICO 233
2.1.2. Clasificación de los motores térmicos ..... *¡Error! Marcador no definido.3*
2.1.2.1. Máquina de combustión interna ..... *¡Error! Marcador no definido.4*
2.1.2.2. Máquina de combustión externa *29*
2.2. GENERADOR DE VAPOR ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
2.2.1. Partes de un generador de vapor ..... *¡Error! Marcador no definido.0*
2.2.2. Ciclo termodinámico ..... *¡Error! Marcador no definido.4*
2.2.2.1. Ciclo Carnot ..... *¡Error! Marcador no definido.4*
2.2.2.2. Ciclo Otto ..... *¡Error! Marcador no definido.7*
2.2.2.3. Ciclo Brayton ..... *¡Error! Marcador no definido.0*
2.2.2.4. Ciclo Rankine ..... *¡Error! Marcador no definido.3*
2.3. TURBINA DE VAPOR ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**8
2.3.1. Clasificación de las turbinas ..... *¡Error! Marcador no definido.8*
2.3.2. Principio de funcionamiento ..... *¡Error! Marcador no definido.1*
2.3.2.1. El ciclo Rankine o ciclo básico de la turbina de vapor ..... *¡Error! Marcador no definido.2*

2.4. PROCESOS TERMOQUÍMICOS PARA TRANSFORMACIÓN DE BIOMASA EN ENERGÍA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**5
2.4.1. Gasificación ..... *¡Error! Marcador no definido.6*
2.4.1.1. Evolución de la gasificación ..... *¡Error! Marcador no definido.7*
2.4.2. Tipos de gasificadores ..... *¡Error! Marcador no definido.0*
2.4.2.1. La gasificación aplicada a la biomasa *¡Error! Marcador no definido.0*
2.4.3. Pirólisis ..... *¡Error! Marcador no definido.1*
2.4.2.1. Pirólisis de biomasa para generación de electricidad ..... *¡Error! Marcador no definido.4*
2.5. INCINERACIÓN ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**4
2.5.1. Tipos de incineradores ..... *¡Error! Marcador no definido.6*
2.5.1.1. Incineradores usados convencionalmente para residuos sólidos con alto cargo de humedad *70*
2.5.2. Principio químico de la conversión de energía en la incineración ..... *¡Error! Marcador no definido.4*
2.5.3. Instalaciones actuales ..... *¡Error! Marcador no definido.8*
2.5.3.1. Planta de incineración con recuperación energética. Delaware Valley *79*
2.5.3.2. Planta de incineración Amsterdam WFPP/WTE *¡Error! Marcador no definido.1*
2.5.3.3. Planta de incineración SYSAV Sjölunda ..... *¡Error! Marcador no definido.3*
2.5.3.4. Planta de incineración ASM Brescia ... *¡Error! Marcador no definido.5*
2.5.3.5. Plantas de incineración Haraldrud y Klemetsrud ... *¡Error! Marcador no definido.6*
2.5.3.6. Planta de incineración Maishima *89*
2.5.4. China: un caso particular ..... *¡Error! Marcador no definido.1*
2.6. PARÁMETROS DE CONTROL EN INSTALACIONES ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**5
2.6.1. Gas de combustión ..... *¡Error! Marcador no definido.5*
2.6.2. Generador de vapor ..... *¡Error! Marcador no definido.4*
2.6.3. Turbina de vapor ..... *¡Error! Marcador no definido.8*
2.6.4. Generador sincrónico ..... *¡Error! Marcador no definido.*
2.6.4.1. Características del rotor y estator ..... *¡Error! Marcador no definido.4*
2.6.4.2 Protecciones convencionales en un generador síncrono ..... *¡Error! Marcador no definido.5*

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA **1200**

3.1. PROTOTIPOS DEL CASO DE ESTUDIO 1200
3.1.1. Incinerador ***122***
3.1.2. Generador de vapor ***123***

3.1.3. Turbina de vapor.....*1244*
3.2. IMPORTANCIA DE LOS PROTOTIPOS EN LA EDUCACIÓN DE LA INGENIERÍA..... 1266
3.3. ÁREAS DE INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO DEL CASO DE ESTUDIO..... 1288
3.3.1. Ubicación.....*1288*
3.3.2. Requerimientos previos a la instalación *1288*
3.4. PARÁMETROS DE SEGURIDAD A CONSIDERAR EN LA EXPERIMENTACIÓN..... 12929

CAPÍTULO 4. RESULTADOS 130

4.1. DISEÑO DE INCINERADOR 1300
4.1.1. Dimensionamiento del prototipo de incineración.....*1411*
4.1.2. Construcción de incinerador.....*1433*
4.2. ACOPLAMIENTO DEL GENERADOR DE VAPOR AL INCINERADOR 1522
4.3. TRATAMIENTO DE GASES DE INCINERACIÓN..... 1522
4.3.1. Post-combustión.....*1544*
4.3.2. Análisis de los gases de combustión por el método del peso molar.....*1566*
4.4. TABLERO ELÉCTRICO 1600
4.4.1. Diseño de Tablero eléctrico *1611*
4.5. MANUAL PARA EL USO DEL GENERADOR DE VAPOR 1655
4.6. PROCESO DE CALENTAMIENTO..... 1677
4.7. PROCESO DE OPERACIÓN DE TURBINA 16868
4.8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE INCINERACIÓN..... 1711

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....1744

5.1. CONCLUSIONES..... 174
5.2. SUGERENCIAS..... 1755

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....1766

ANEXO A.....1833

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Generación bruta por tecnología valores dados en MWh	5
Figura 1.2	Central solar térmica	6
Figura 1.3	Diagrama de central térmica convencional de carbón	8
Figura 1.4	Esquema de aprovechamiento en derivación	9
Figura 1.5	Diagrama de central hidroeléctrica	12
Figura 1.6	Aerogenerador horizontal	15
Figura 1.7	Diagrama de central eólica	16
Figura 1.8	Diagrama de central fotovoltaica	17
Figura 1.9	Esquema del funcionamiento de una pila de hidrógeno	21
Figura 1.10	Generador termoeléctrico de radioisótopos modelo SNAP-27usado en la misión espacial Apollo 12	22
Figura 2.1	Turbina de gas de ciclo abierto	26
Figura 2.2	Sección esquemática de un motor de émbolo rotativo	27
Figura 2.3	Esquema de una máquina de vapor	30
Figura 2.4	Ciclo de potencia Carnot	36
Figura 2.5	Diagrama *p vs v* del ciclo Carnot	37
Figura 2.6	Gráficas *p vs v* y *T vs s* del ciclo Otto	38
Figura 2.7	Diagramas de propiedades para el ciclo Brayton ideal	40
Figura 2.8	Diagrama *p vs v* del ciclo Brayton	41
Figura 2.9	Diagrama presión-volumen ciclo y Temperatura-entropía ciclo Rankine	44
Figura 2.10	Descripción de una central térmica	45
Figura 2.11	Principales transferencias de calor de una central térmica	47
Figura 2.12	Diagrama *T vs s* del ciclo Rankine ideal	48
Figura 2.13	Turbina de vapor	52
Figura 2.14	Tipos de biomasa	56
Figura 2.15	Procesos de transformación de la biomasa en energía	57
Figura 2.16	Etapas del proceso de gasificación de residuos	60
Figura 2.17	Horno de tambor con cámara de postcombustión	73
Figura 2.18	Tipos de horno de lecho fluidizado	73
Figura 2.19	Planta de incineración Delaware Valley	80
Figura 2.20	Características de la planta de incineración Delaware Valley	81
Figura 2.21	Planta de incineración Afval Energie Bedrijf, Amsterdam, Holanda	82
Figura 2.22	Características de la planta de incineración Afval Energie Bedrijf	83
Figura 2.23	Planta de incineración SYSAV, Mälmo, Suecia	84
Figura 2.24	Características de la planta de incineración SYSAV	84
Figura 2.25	Planta de incineración ASM Brescia, Italia	85
Figura 2.26	Características de la planta de incineraciónde Brescia, Italia	86
Figura 2.27	Planta de incineración Haraldrud en Oslo, Noruega	87
Figura 2.28	Planta de incineración de Klemestrud, Noruega	88
Figura 2.29	Características de la planta de incineración Haraladrud, Oslo	88
Figura 2.30	Características planta de incineración Maishima, Osaka	90
Figura 2.31	Planta de incineración de Maishima	90

Figura 2.32	Crecimiento de la capacidad WtE en China	92
Figura 2.33	Escalera de gestión sustentable en China	94
Figura 2.34	Partes de un colector mecánico	99
Figura 2.35	Relación entre la caída de presión, tamaño de partículas y eficiencia en un depurador húmedo	100
Figura 2.36	Depurador húmedo de aletas	101
Figura 2.37	Depurador dinámico	102
Figura 2.38	Depurador Venturi	103
Figura 2.39	Depurador multi-Venturi	104
Figura 2.40	Depurador torre de absorción	105
Figura 2.41	Diagrama esquemático y vista de corte transversal de un generador síncrono de 500 MW típico y excitador de dc de 2,400 kW	113
Figura 2.42	Rotor de un generador trifásico para una turbina de vapor, de 1,530 MVA	115
Figura 2.43	Conexión del relevador diferencial de porcentaje de pendiente variable	116
Figura 2.44	Protección de voltaje de secuencia cero	117
Figura 3.1	Etapas para la elaboración del prototipo	121
Figura 3.2	Modo secuencial del proceso de desarrollo de producto	121
Figura 3.3	Fotografía frontal del incinerador del caso de estudio	122
Figura 3.4	Configuración del equipo de generación de vapor del caso de estudio	124
Figura 3.5	Diagrama y fotografía de la turbina de vapor modelo TUR84274-1serie 2432421 del caso de estudio	125
Figura 4.1	Esquema de los componentes en un sistema de combustión	130
Figura 4.2	Diseño general de prototipo con todos sus componentes	134
Figura 4.3	Diagrama de quemador de pre-mezcla a instalar en el incinerador del caso de estudio	136
Figura 4.4	Instalación de quemadores, gas y sistema de inyección de aire en incinerador del caso de estudio	137
Figura 4.5	Fotografía y diagrama de quemador de baja presión modelo QA-12 marca PYPESA	137
Figura 4.6	Plano de la instalación de tubería para gas y quemadores en el incinerador del caso de estudio	138
Figura 4.7	Diagramas de láminas para construcción de incinerador del caso de estudio	144
Figura 4.8	Ladrillo refractario para revestimiento del horno prototipo	145
Figura 4.9	Fotografía de la abertura de conexión con cámara secundaria y soporte para cámara secundaria	146
Figura 4.10	Instalación de fibra cerámica dentro del incinerador	147
Figura 4.11	Tornillos autorroscables para sujeción de tapa superior del horno del caso de estudio	147
Figura 4.12	Tapa de cámara secundaria con anclas de acero inoxidable para soporte de fibra cerámica en la parte superior del incinerador prototipo	148
Figura 4.13	Vista superior del horno con recubrimiento de fibra de vidrio	148

Figura 4.14	Esquema de tren de válvulas para la inyección de gas LP	149
Figura 4.15	Vista exterior e interior de la inyección de aire desde el colector de la cámara primaria	150
Figura 4.16	Termopar industrial con tubo protector cerámico instalado en cámaras de incinerador para censar temperatura de gases	151
Figura 4.17	Cámara primaria del incinerador: vista frontal	151
Figura 4.18	Fotografía del acoplamiento del horno al generador de vapor del caso de estudio	152
Figura 4.19	Modelo de lavador de gases del tipo atomizador	154
Figura 4.20	Botones instalados en el tablero de control para el caso de estudio	162
Figura 4.21	Diagrama y fotografía de pirómetro Honeywell DC 1010 instalados en el tablero de control	162
Figura 4.22	Diagrama eléctrico respecto al control de incinerador, turbo ventilador y bomba de agua	163
Figura 4.23	Diagrama de flujo del proceso de operación del incinerador	164
Figura 4.24	Configuración general del generador de vapor para el caso de estudio	165
Figura 4.25	Configuración del tren de válvulas para el combustible (gas LP) e inyección de aire en el caso de estudio	168
Figura 4.26	Configuración del tablero de control respecto al funcionamiento de incinerador, turbo ventilador y bomba de agua del caso de estudio	169
Figura 4.27	Accionamiento del tablero de control para el proceso de calentamiento	
Figura 4.28	Tablero de control con respecto al funcionamiento de la turbina	170
Figura 4.29	Descripción del proceso de incineración del caso de estudio	173
Figura A.1	Plano de la configuración general del prototipo de incineracióndel caso de estudio	183

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.1	Generación bruta de energía por tecnología datos medidos en MWh	4
Tabla 1.2	Tipos de centrales termoeléctricas	5
Tabla 2.1	Oxidantes más utilizados en cohetes de propelente líquido	29
Tabla 2.2	Combustibles más utilizados en cohetes de propelente líquido	29
Tabla 2.3	Clasificación de la máquina de combustión externa	29
Tabla 2.4	Gases obtenidos en el proceso de gasificación	59
Tabla 2.5	Procesos de pirólisis	62
Tabla 2.6	Ventajas y desventajas de la pirólisis	63
Tabla 2.7	Comparación de los procesos de pirólisis convencional alotérmicos y autotérmicos	64
Tabla 2.8	Clasificación de los hornos de incineración	67
Tabla 2.9	Residuos de origen vegetal	76
Tabla 3.1	Descripción del desarrollo del prototipo	127
Tabla 4.1	Criterios de combustión implementador para la operacióndel incinerador del caso de estudio	131
Tabla 4.2	Límites de funcionamiento y dimensionado del horno para el caso de estudio	133
Tabla 4.3	Especificaciones de la generación de vapor para el caso de estudio	134
Tabla 4.4	Balance másico de la reacción en el proceso de incineración	138
Tabla 4.4	Composición química para los RSU de la Ciudad de México	142
Tabla 4.5	Porcentaje en volumen de los gases de combustión en base húmeda	140
Tabla 4.6	Porcentaje de masa de los gases de combustión en base húmeda	140
Tabla 4.7	Composición química para los RSU de la Ciudad de México	142
Tabla 4.8	Límites máximos permisibles (NOM-085-SEMARNAT-1994)	155
Tabla 4.9	Cálculo del peso molar del oxígeno en la combustión estequiométrica	157
Tabla 4.10	Factores de moles para una combustión completa	158
Tabla 4.11	Moles de aire necesarios para llevar a cabo una combustión completa	159
Tabla 4.12	Posicionamiento de las válvulas antes del vertido del agua al generador de vapor	166
Tabla 4.13	Posicionamiento de las válvulas después del vertido del agua al generador de vapor	167
Tabla 4.11	Cuadro de ventajas y desventajas del proceso de incineración	171

RESUMEN

El presente trabajo es un estudio basado en un prototipo de incineración para la producción de energía eléctrica a partir de la biomasa y los residuos sólidos urbanos. Este tipo de tratamiento ha sido utilizado a gran escala en países de la Unión Europea, Estados Unidos y gran parte de Asia como es el caso en particular de China.

Como antecedente se tomo en cuenta que en la República Mexicana no se tiene información sobre la existencia de una planta de incineración de biomasa o RSU con el fin de producir energía eléctrica o un prototipo de incineración para el estudio e investigación de lo que conlleva todo el proceso de una planta incineradora.

Dentro de las actividades que se realizaron se conformó un punto de partida como es el tener un mayor conocimiento de los diferentes tipos de generación de energía eléctrica y a su vez conocer el funcionamiento de máquinas térmicas y sus respectivos ciclos termodinámicos, en esta parte se hace mención de los procesos térmicos utilizados para la biomasa y los RSU como son la pirólisis, gasificación y la incineración.

El prototipo de incineración utilizado en el presente estudio se compuso de dos etapas:

- La primer etapa consistió en la implementación de un incinerador, un generador de vapor y una turbina, en la cual se realizó una única prueba donde se comprobó la producción de energía eléctrica a partir de la incineración de biomasa.
- La segunda etapa se compone del diseño, implementación y cálculos respectivos de un incinerador que cuenta con sistemas de seguridad más propicios para llevar a cabo este proceso térmico.

Así este prototipo servirá como plataforma experimental para uno o varios estudios posibles a realizar, el cual también será utilizado como modelo didáctico con el objetivo de hacer presentaciones a los estudiantes de forma práctica para que puedan ratificar su conocimiento sobre los modelos de generación de energía con el menor uso de combustibles fósiles. El uso de este prototipo puede ser un patrón para saber la viabilidad de la incineración de biomasa y RSU aplicada a la República Mexicana.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el desarrollo de la sociedad humana en la República Mexicana ha logrado rebasar el límite asignado para los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) o como coloquialmente se le conoce de “basura”, es por esto que en el presente trabajo se propone la incineración como un proceso de reciclado, reutilización y recuperación energética de los residuos sólidos urbanos y de la biomasa.

Actualmente en la República Mexicana la generación de RSU se está convirtiendo en un problema muy grave ya que conlleva infecciones para las personas que habitan cerca de los vertederos, una mala imagen en lo que respecta a la urbanización y la contaminación ambiental que esto sugiere.

La incineración es un proceso de valorización de los residuos sólidos urbanos (RSU) que se caracteriza por eliminarlos de forma rápida y fiable, con un nivel bajo de impacto sobre el medio ambiente, y que resulta muy adecuado para zonas densamente pobladas y con dificultades para encontrar superficies amplias de terreno para el vertido de los mismos. La incineración no es un método de eliminación total de los RSU ya que genera por si mismo cenizas, escorias y gases, por lo cual existen una serie de pasos que deben formar parte del mismo para una gestión integral:

- El sistema de incineración no elimina otros tratamientos para los RSU como el compostaje, reciclado o en su caso la generación de biogás por medio de digestores, la incineración debe entenderse como un complemento a los tratamientos antes mencionados.
- Reducción de un 80 a 90% en volumen en los vertederos así como una reducción en peso del 70% y recuperación de espacios.
- El impacto producido por los sistemas de incineración está por debajo de los impactos que producen tecnologías convencionales (carbón, petróleo, gas, etc), esto se logra al cumplir con las normativas nacionales e internacionales para emisiones al medio ambiente.

Al implementar un sistema de gestión integral de residuos sólidos urbanos se pueden recuperar espacios utilizados para la disposición final de los mismos, se reduce el impacto ambiental, aumentando la vida útil de los vertederos.

En el presente trabajo se plantea la incineración como método idóneo para ayudar a resolver el problema de las basuras domiciliarias, enfocándose en el tema de la reutilización, reciclado y recuperación energética, aplicándolo cuando y donde sea posible apegándose a las normas establecidas en la República Mexicana.

OBJETIVO

Instalar y operar un prototipo de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) y biomasa para la producción de energía eléctrica usando un incinerador, un generador de vapor y una turbina de vapor a escala piloto.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1. Generación de energía eléctrica

La generación de energía eléctrica se consigue gracias al fenómeno de la inducción electromagnética descubierta por Michael Faraday en 1830. Lenz demostró que cuando en una bobina se induce una fuerza electromotriz, la corriente tiende a circular en un sentido tal que se opone al movimiento o cambio de flujo que induce la fuerza electromotriz.

Oersted demostró que todo conductor por el cual está circulando una corriente eléctrica lleva asociado un campo magnético a su alrededor. Gracias a que la producción de esta forma de energía es relativamente simple, el hombre ha contado con ella desde finales del siglo XIX. En efecto, se puede obtener energía eléctrica con sólo mover una serie de espigas de cobre (bobina) en el seno de un campo magnético producido por un imán. En las terminales de la bobina se generará un voltaje. Si se conecta un foco a ellas, se observará que su filamento se torna incandescente debido al paso de una corriente de electrones.

El conjunto que forman el campo magnético y la bobina se denomina “generador” y no es otra cosa que una máquina que transforma la energía mecánica utilizada para mover una bobina, en electricidad. De acuerdo con lo anterior, la energía eléctrica no es más que energía mecánica transformada. Basándose en este principio, desde hace tiempo el hombre ha podido obtener gran parte de la electricidad que requiere, empleando diferentes medios de generación, todo depende del agente que mueva al conjunto generador para darle el nombre al tipo de producción de energía eléctrica (CFE, 2008).

Los sistemas de energía eléctrica se estructuran en partes o niveles de *generación, transporte (líneas de transmisión) y distribución*. La interconexión de esos niveles se realiza en las subestaciones y centros de transformación, donde además se localizan dispositivos de maniobra y protección del sistema.

- **Generación:** La producción de energía eléctrica tiene lugar en las centrales que dependiendo del tipo de energía primaria utilizada, son hidráulicas, térmicas clásicas o térmicas nucleares principalmente. La generación de energía eléctrica se realiza mediante la máquina eléctrica denominada alternador trifásico. Con frecuencia de 50 Hz en Europa y 60 Hz en gran parte de América (Barero, 2004).

- **Líneas de transmisión y distribución.** Es el conjunto de dispositivos para transportar o guiar la energía eléctrica desde una fuente de generación a los centros de consumo (las cargas). Y estos son utilizados normalmente cuando no es costeable producir la energía eléctrica en los centros de consumo o cuando afecta el medio ambiente (visual acústico o físico), buscando siempre maximizar la eficiencia, haciendo las perdidas por calor o por radiaciones lo más pequeñas posibles (Jiménez y col., 2006).

Cuando se inició el desarrollo de los sistemas de energía eléctrica, a finales del siglo XIX y principios del XX, era típica la estructura en la que uno o varios generadores se conectaban directamente a una instalación de consumo (estructura típica también hoy día en instalaciones independientes alimentadas por un grupo electrógeno).

En la actualidad la transmisión de energía eléctrica se realiza normalmente en corriente alterna (c.a) trifásica, se han realizado instalaciones en corriente continua (c.c). Para ello la energía eléctrica del generador producida en forma de c.a. es convertida en c.c. mediante sistemas electrónicos, denominados rectificadores. Una vez la energía eléctrica en forma de c.c. llega a su destino se convierte nuevamente en c.a., esta vez mediante sistemas electrónicos denominados inversores, para proceder a su distribución (Barero, 2004).

En México la generación de energía eléctrica es producida en diversas formas de las cuales se proporcionan datos de los últimos cuatro años de acuerdo al tipo de tecnología utilizada como se puede observar en la Tabla 1.1 y en la Figura 1.1.

Tabla 1.1 Generación bruta de energía por tecnología datos medidos en MWh (elaboración a partir de SENER, 2013)

Tecnología/Año	2009	2010	2011	2012	2013
Termoeléctrica	160,351,866	160,025,506	171,580,248	178,890,729	125,608,773
Vapor	43,111,721	40,569,622	47,868,928	53,917,756	37,651,971
Ciclo combinado	112,264,458	114,817,553	118,454,542	117,606,004	83,793,119
PIE	76,496,307	78,441,992	84,005,751	80,174,988	55,234,623
Turbogas	3,735,158	3,396,012	4,125,470	6,216,616	3,177,373
Combustión interna	1,240,529	1,242,319	1,131,308	1,150,353	986,310
Dual	12,298,606	15,577,758	15,395,879	16,233,964	11,025,021
Carboeléctrica	16,886,210	16,485,076	18,158,431	17,724,103	11,393,374
Geotermoléctrica	6,739,666	6,618,460	6,506,614	5,816,642	4,033,065
Nucleoeléctrica	10,501,079	5,879,241	10,089,195	8,769,599	7,946,331
Eólica	249,247	166,392	357,283	1,744,144	1,204,495
Hidroeléctrica	26,444,964	36,738,462	35,795,896	31,316,574	14,357,372
Fotovoltaica	0	0	0	2,076	9,598

1.2 Centrales termoeléctricas

Una central termoeléctrica es una instalación en donde la energía mecánica que se necesita para mover el rotor del generador se obtiene a partir del vapor formado al hervir agua en una caldera y por tanto se obtiene la energía eléctrica. El vapor generado tiene una gran presión, y se hace llegar a las turbinas para que en su expansión sea capaz de mover los álabes de las mismas.

Se puede conseguir vapor de muchas maneras: quemando carbón, petróleo, gas o residuos urbanos, o bien aprovechando la gran cantidad de calor que generan las

reacciones de fisión nuclear. Incluso se puede producir vapor concentrando la energía del sol (Manzano, 2008).

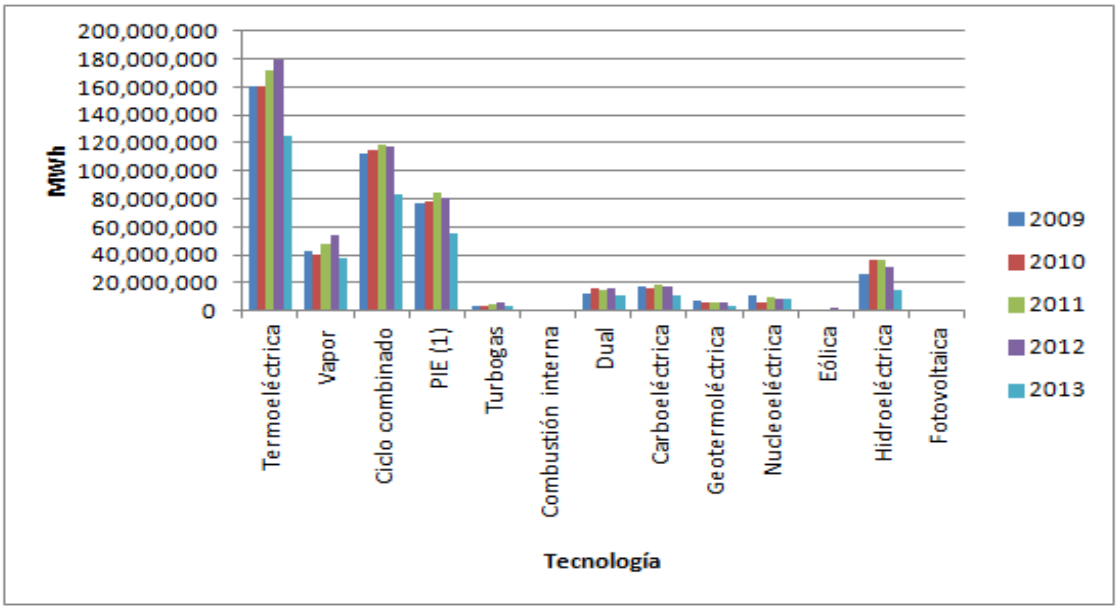

Figura 1.1 Generación bruta por tecnología valores dados en MWh (elaboración a partir de SENER, 2013)

Independientemente de cuál sea el combustible fósil que se utilice (combustóleo, carbón o gas), el esquema de funcionamiento de todas las centrales termoeléctricas clásicas es prácticamente el mismo. Las únicas diferencias consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y en el diseño de los quemadores de la misma, que varía según cuál sea el tipo de combustible empleado. Los diferentes tipos de centrales termoeléctricas se mencionan en la Tabla 1.2 (Sancho y col., 2006).

Tabla 1.2 Tipos de centrales termoeléctricas (Elaboración a partir de Sancho y col., 2006)

Tipo	Función
Termoeléctrica de carbón	El mineral (hulla, antracita, lignito, etc) se tritura previamente en molinos hasta quedar convertido en polvo, de estos molinos el mineral pulverizado es enviado a la caldera de la central mediante chorros de aire precalentado.
Termoeléctrica de gas	Se hacen quemadores especiales para quemar dicho combustible.
Termoeléctrica de fuel	El combustible es precalentado para que fluidifique, y después inyectado en quemadores adecuados a este tipo de combustible.

Otra fuente de calor para la generación de electricidad diferentes al carbón o gas natural, son una gran variedad de materiales de biomasa y de subproductos de procesos industriales, como la turba, la madera y sus desechos, la paja, los posos del café, las cáscaras de cereales, los desechos de las minas de carbón. El calor residual de factorías siderúrgicas, las energías geotérmica y solar, así como los procesos de generación de vapor asociados a los de recuperación de subproductos en determinados procesos, como la fabricación de pasta de papel, los ***residuos sólidos urbanos (RSU)*** y la destrucción de residuos sanitarios peligrosos.

La radiación solar también se puede usar para la generación de electricidad a partir de su captación en gran escala y su concentración sobre una caldera mediante espejos especiales (heliostáticos), para producir vapor de agua capaz de accionar turbinas convencionales de vapor como las de cualquier central termoeléctrica de combustibles fósiles o nucleares. Se trata entonces de una central solar térmica Figura 1.2.

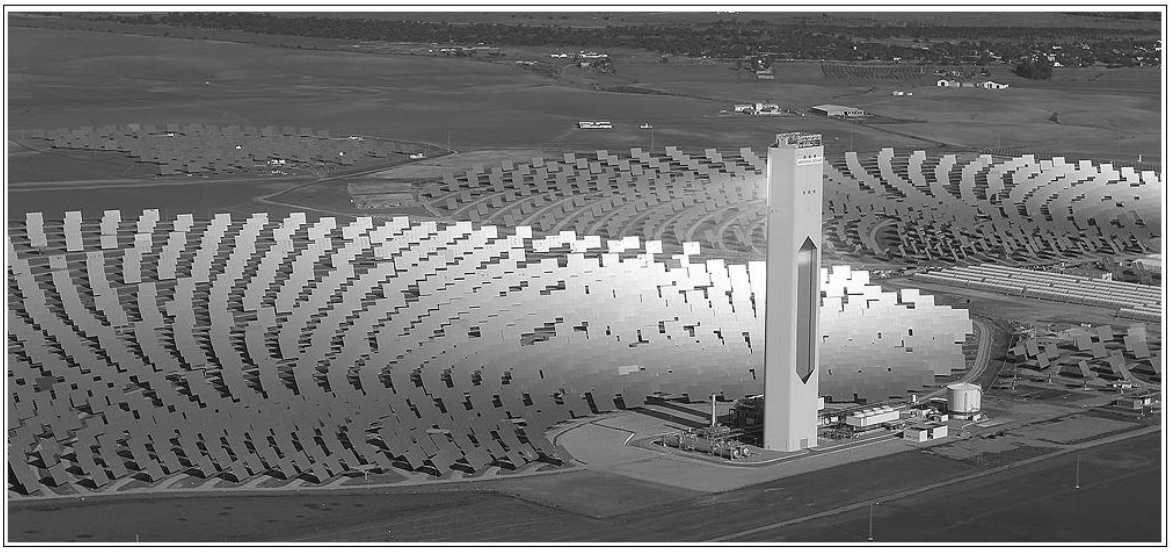

Figura 1.2 Central solar térmica (ATMOSFERIS, 2013)

Todas las centrales térmicas (convencionales o nucleares) constan de cuatro partes principales:

- Generador de calor (puede ser una caldera para quemar carbón, fuel, gas, biogás, biomasa o residuos urbanos, etc.).
- Circuito cerrado por donde circula el fluido que porta la energía cinética necesaria (agua líquida y en fase de vapor). El generador de vapor tiene una gran superficie de contacto para facilitar la transferencia de calor de la caldera. (En las centrales de gas de ciclo combinado, el fluido es el propio gas en combustión).

- Condensador o circuito de enfriamiento que convierte el vapor de baja densidad en agua líquida de alta densidad, apta para ser convertida en vapor. El calor residual del vapor “muerto” se transfiere a otro medio.
- La turbina convierte la energía cinética del vapor “vivo” en movimiento rotatorio. Las ruedas de paletas se disponen una tras otra, con diferentes configuraciones, para aprovechar toda la energía contenida en el vapor a presión a medida que se expande y pierde fuerza. El generador convierte el giro en corriente eléctrica, gracias al proceso de inducción electromagnética (Manzano, 2008).

1.2.1 Central térmica convencional

En las centrales térmicas de vapor se utilizan como máquinas motrices las máquinas de vapor, o las turbinas de vapor o, en algunos casos, ambos tipos de máquinas; además de accionar los generadores eléctricos principales, en las centrales térmicas de vapor, también se utilizan máquinas anteriormente citadas, para el accionamiento de equipos auxiliares, tales como bombas, hogares mecánicos, ventiladores, excitatrices, etc. El vapor necesario para el funcionamiento de las máquinas motrices, se produce en calderas, quemando combustible en los hogares que forman parte integrante de las propias calderas; desde éstas, el vapor se conduce por medio de canalizaciones hasta las máquinas o las turbinas de vapor.

Las centrales térmicas de vapor comprenden tres partes constructivas esenciales:

1. Sala de calderas
2. Sala de máquinas
3. Sala de distribución (UNICAN, 2012).

En la Figura 1.3 se observa que el carbón almacenado en el parque (1) adyacente a la central es conducido mediante una cinta transportadora hacia una tolva (2) que alimenta al molino (3). En este elemento el carbón es pulverizado finamente para aumentar la superficie de combustión. Una vez pulverizado, el carbón se inyecta en una caldera (4) mezclando el aire caliente para su combustión. La caldera está formada por numerosos tubos por donde circula el agua, que es convertida en vapor a alta temperatura. Los residuos sólidos de esta combustión caen al cenicero (5) para transportarlos posteriormente a un vertedero. Las partículas finas y los humos se hacen pasar por los precipitadores (6) y los equipos de desulfuración (7) con el objeto de retener un elevado porcentaje de los contaminantes que llevan, previamente a su descarga a la atmósfera a través de la chimenea (8). El vapor de agua generado en la caldera acciona los álabes de las turbinas de vapor (9), haciendo girar el eje de estas turbinas que se mueve solidariamente con el rotor del generador eléctrico (12). En el generador, la energía mecánica es convertida en electricidad de media tensión y alta intensidad. Con el objetivo de disminuir las pérdidas del transporte a los puntos de consumo, la tensión de la electricidad generada es elevada en un transformador

(13), antes de ser enviada a la red general mediante las líneas de alta tensión (14) (UNESA, 2011).

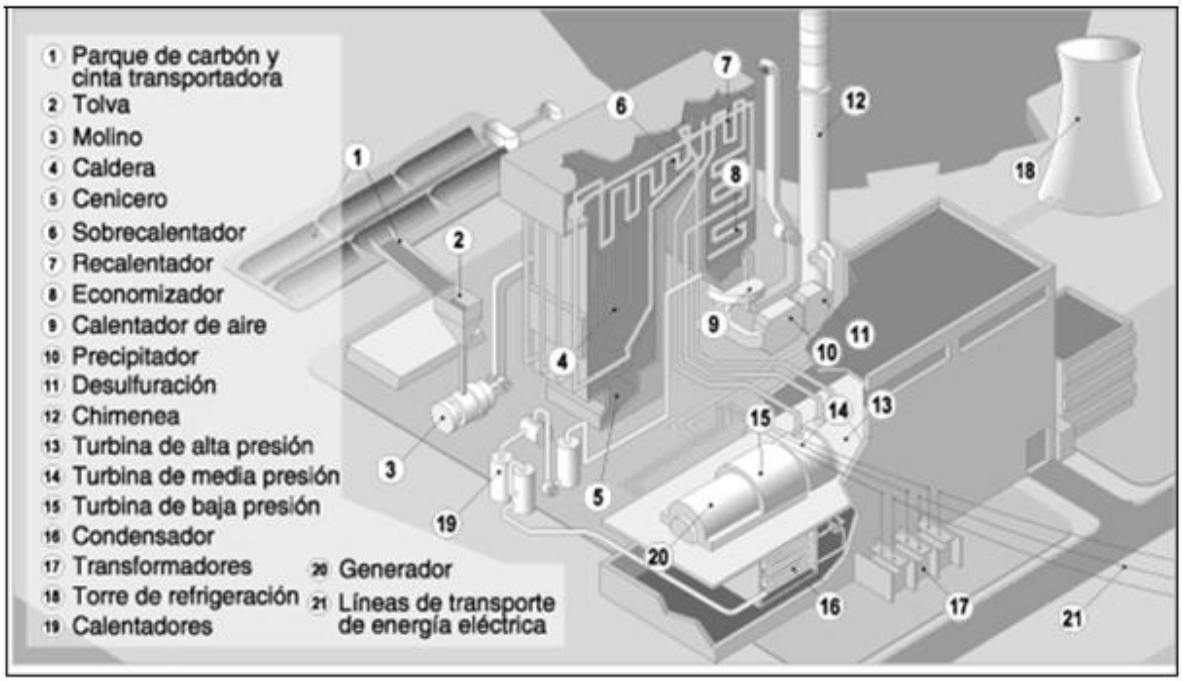

Figura 1.3 Diagrama de central térmica convencional de carbón (UNESA, 2011)

1.3. Centrales hidroeléctricas

La energía procedente del sol que incide realmente en la superficie de la Tierra, y los océanos, provoca la evaporación diaria de 280 km^3 de agua. En términos de potencia ello equivale a más de 8,000 TW, o bien al 20% de la radiación solar que alcanza nuestro planeta. En términos de precipitaciones supone, si el reparto fuera homogéneo, la cantidad de 200 litros/m^2 por año.

El agua que, dentro del círculo hidrológico, fluye por los ríos al descender de un nivel superior a un nivel inferior genera una energía cinética que el hombre lleva siglos aprovechando. Hace más de cien años, esa energía que hasta entonces se usaba fundamentalmente para moler el trigo, comenzó a emplearse en la generación de electricidad (Castells y Alsina, 2012).

El aprovechamiento de la energía hidráulica no hubiera sido posible sin la turbina; pero este aprovechamiento hubiera sido muy limitado sin la conversión de la energía mecánica de la turbina, en energía eléctrica que, como se sabe, puede transportarse a grandes distancias. Actualmente la tendencia es realizar grandes aprovechamientos con embalses de cabecera, que determina la regulación anual del río y depósitos reguladores, situados en lugares apropiados, con los que se

consigue la regulación diaria o semanal. Una central hidroeléctrica permite aprovechar las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarla en energía eléctrica. El valor de esta energía depende de dos factores: la altura de la caída y el volumen (peso) del agua que cae por segundo.

Las centrales hidroeléctricas también se clasifican de la siguiente forma:

a) **Centrales de pasada:** Se utiliza el agua mientras ésta fluye por el cauce de un río, se sitúan en los lugares en que la energía hidráulica ha de emplearse en el momento mismo que se tiene disposición de ella, con el fin de accionar las turbinas hidráulicas. Generalmente son construidas formando presa sobre el cauce de los ríos, con el objetivo de mantener un desnivel constante en el caudal del agua.

b) **Centrales de agua embalsada:** Se consigue un embalse artificial o pantano, en el cual se acumula el agua, que se puede aprovechar en la central, según las necesidades. El embalse se consigue, por medio de una presa situada en lugares apropiados del río (Figura 1.4).

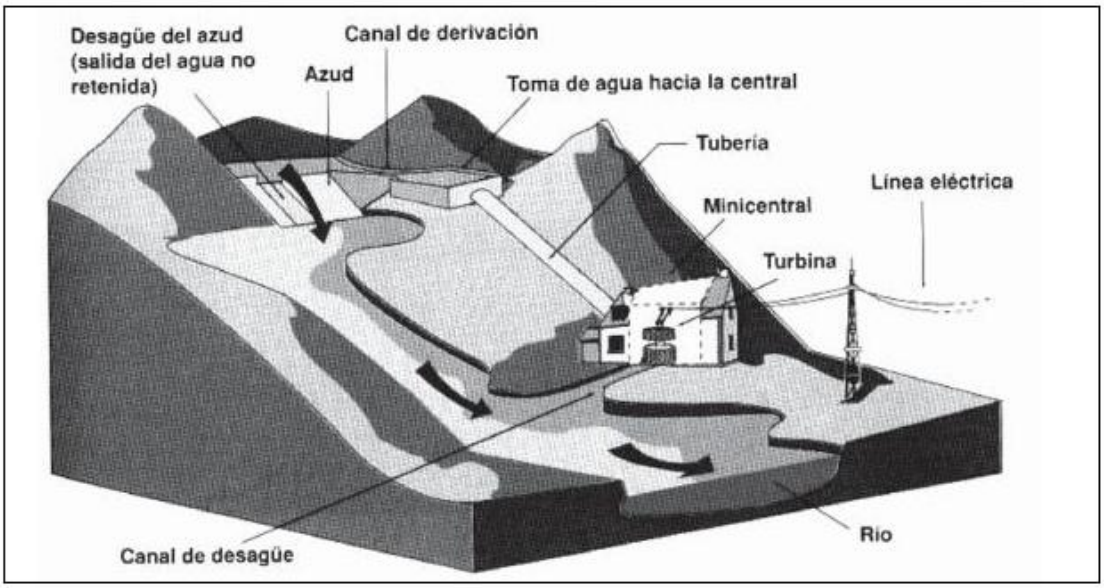

Figura 1.4 Esquema de aprovechamiento en derivación (Castells y Alsina, 2012)

Estas últimas se clasifican a su vez en:

- **Centrales de regulación.** Esta clase de central de embalse se caracteriza por los volúmenes de agua que son capaces de acumular en el embalse, los cuales representan periodos de aportes de caudales medios anuales, más o menos duraderos.

Esta característica le da la posibilidad de asistir cuando los caudales se encuentran bajos, así como también cubrir eficientemente las horas pico de consumo.

- **Centrales de bombeo.** Son centrales de embalse que aglomeran caudales a través del bombeo.

Según sea la altura del salto de agua existente, o desnivel, las centrales también pueden clasificarse en:

1. **Centrales de alta presión:** Alturas de salto hidráulico superiores a los 200 m. Los caudales desalojados a través de estas centrales son pequeños, de solo 20 m^3/s por máquina. El lugar de emplazamiento suele ser en zona de alta montaña, debido que aprovechan el agua de torrentes que desemboca en los lagos naturales. Como máquinas motrices se utilizan, generalmente, turbinas Pelton o, para los saltos de menor altura turbinas tipo Francis lentas.
2. **Centrales de media presión:** Alturas de salto hidráulico comprendidas entre 200 y 20 m. Esta característica les permite desaguar caudales de hasta 200 m^3/s por cada turbina. El funcionamiento de estas centrales está condicionado por embalses de gran tamaño, formados en valles de media montaña. Las máquinas motrices empleadas son las turbinas Francis medias y rápidas, correspondiendo estas últimas a los saltos de menor altura, dentro de los límites indicados.
3. **Centrales de baja presión:** Alturas de salto hidráulico, inferiores a 20 m. Es la zona de uso de las turbinas Francis extrarápidas, de las turbinas de hélice, y sobre todo, de las turbinas Kaplan.

Los componentes de una central hidroeléctrica son:

a) **Nivel y cota:** Se denomina nivel a la horizontal de la superficie de un terreno, o a la que logra la superficie libre de los líquidos. También se define como nivel a la altitud de aquellas superficies o de un punto cualquiera respecto de otro u otros puntos de referencia.
   Por cota se entiende el valor de la altura de una superficie o punto respecto del nivel del mar.

b) **Caudal y aforo:** El caudal es la cantidad de líquido por tiempo, expresada en metros cúbicos o en litros, que circula a través de cada uno de los fragmentos de una conducción, abierta o cerrada.
   Por aforo se entiende el proceso mediante el cual se mide el valor de un caudal. Las mediciones pueden realizarse teniendo en cuenta la sección del conducto, la altura de lámina o calado, la presión en algunos puntos, etc.

c) **Salto de agua:** Se entiende por salto de agua al paso violento o descenso de masas de agua desde un nivel, más o menos constante, a otro inmediatamente menor.

d) **Embalse:** Un embalse surge de acumular las aguas que fluyen del territorio sobre el cual está asentado, identificando como cuenca vertiente. El propósito es encauzar las aguas para un correcto empleo de las mismas,

teniendo en cuenta los requerimientos de la instalación. La cuenca es la superficie receptora de las aguas caídas que lo nutren; ya sea por escurrimiento inmediato o por infiltraciones. La cuenca se mide en kilómetros cuadrados (km^2) y se refieren a la proyección horizontal de dicha superficie.

Las dimensiones de un embalse están condicionadas por los caudales que contribuye el río encauzado y sus afluentes y, principalmente, de las características de producción de la central para la cual se ha construido.

e) Presa: Una presa es una estructura cuya función es servir de barrera, impidiendo el curso del agua por sus cauces normales. Su disposición está condicionada al relieve del lugar de emplazamiento. La construcción de una presa, sobre el cauce del río y transversalmente a éste, origina un estancamiento de agua y consecuentemente la creación de un salto de agua. Un pantano artificial es un embalse o lago artificial surgido a partir del uso de la presa como depósito de agua.

Las presas tienen un doble propósito:

1. La creación de un salto.
2. La construcción de un depósito con el fin de almacenar y controlar el empleo del agua.

Algunas de las aplicaciones de estas barreras son principalmente la producción de energía eléctrica, provisión de agua a poblaciones, etc.

f) Cimentación o fundamento: Es la base sobre la que se apoya casi la totalidad de la presa. El terreno que compone la misma puede ser de roca, pizarra, lava, etc. Y debe poseer la necesaria impermeabilidad para evitar filtraciones y subpresiones.

g) Estribos o apoyos laterales: Los estribos están compuestos por las áreas extremas de la presa, las cuales se encargan del cierre, encajonándose en el terreno de las orillas. El terreno presenta las mismas características que el requerido en la cimentación.

h) Coronamiento: Es la zona más elevada de la obra y está construida por caminos accesibles para personas y vehículos de la presa. Funciona como un asentamiento de diferentes maquinarias.

i) Paramentos: Se denominan así a las superficies de la presa. Los paramentos de aguas arriba son aquellas superficies que sufren la corriente y la presión del agua; por el contrario el paramento de aguas abajo es la superficie opuesta a las de aguas arriba.

j) Aliviaderos: Se trata de desagües por los que se encauza el agua, cuando las grandes crecidas originan que la misma rebase las presas. Los aliviaderos protegen las presas contra la erosión y el arrastre normalmente permiten regular la cantidad de los caudales derramados (Balairón, 2002).

Así se tiene que la generación de electricidad en una central hidroeléctrica se da cuando una presa (2) está situada en el lecho de un río, en donde acumula artificialmente un volumen de agua para formar un embalse (1), esto permite que el agua adquiera una energía potencial que luego se transformará en electricidad. Para ello, para ello se sitúan en el parámetro aguas arriba de la presa o en sus proximidades una toma de agua protegida por una rejilla metálica (3), con una

válvula que permite controlar la entrada del agua en la galería de presión, previa a una tubería forzada (4) que conduce finalmente el agua hasta la turbina situada en la sala de máquinas de la central.

El agua a presión de la tubería forzada va transformando su energía potencial en cinética, es decir, va perdiendo altura y adquiriendo velocidad. Al llegar a las máquinas actúa sobre los álabes de la turbina hidráulica (5), transformando su energía cinética en energía mecánica de rotación. El eje de la turbina está unido al del generador eléctrico (6), que al girar convierte la energía rotatoria en corriente alterna de media tensión y alta intensidad. Mediante transformadores (7), es convertida en corriente de baja intensidad y alta tensión para ser enviada a la red general mediante las líneas de transporte (8) (Figura 1.5) (UNESA, 2011).

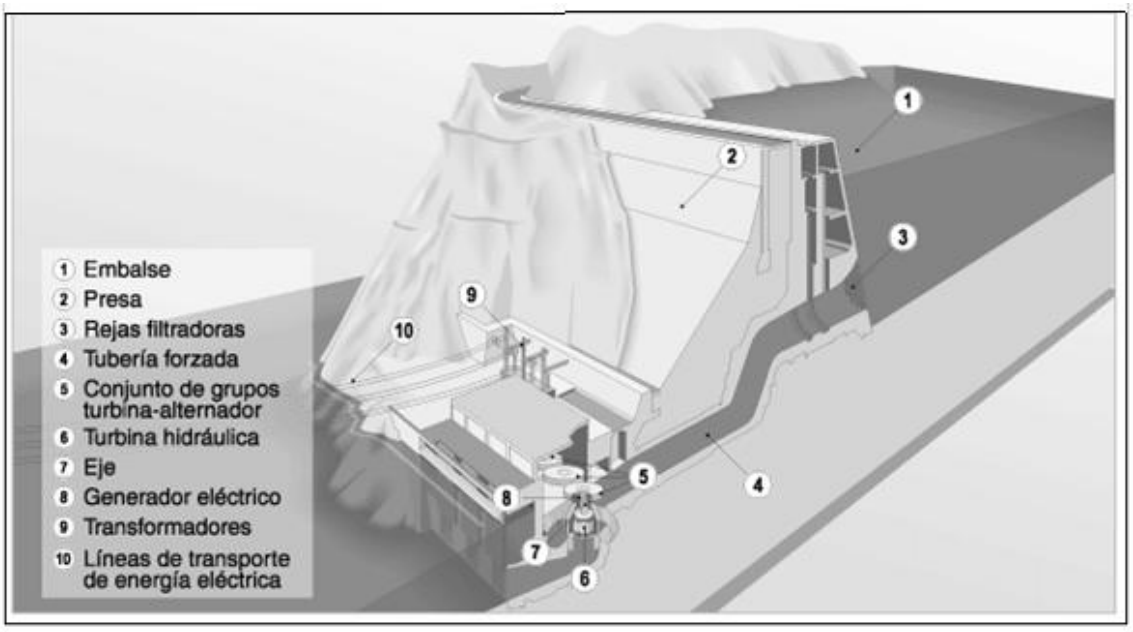

Figura 1.5 Diagrama de central hidroeléctrica (UNESA, 2011)

1.4. Centrales eólicas

La obtención de energía eléctrica a partir del viento se consigue con el empleo de aerogeneradores eólicos, ya que la energía cinética del viento puede transformarse en energía mecánica de rotación (Azcarate y Mingorance, 2007).

Las máquinas que se emplean para producir electricidad de energía eólica suelen llamarse aerogeneradores o turbinas eólicas. Según la posición de las hélices en el rotor se pueden diferenciar dos tipos de aerogeneradores (Sancho y col., 2006):

a) **Eje horizontal:** Consta de una hélice o rotor acoplado a un soporte, en donde se encuentra el alternador y la caja de engranajes. Ambos van montados sobre una torre de hormigón o metálica. Este tipo de

aerogeneradores no pueden variar la posición de las hélices según la dirección del viento. Su funcionamiento es muy simple ya que el viento hace girar las palas del rotor, generando energía cinética

Los aerogeneradores de eje horizontal, de mayor uso, constan de tres partes principales: la hélice-rotor, la navecilla o góndola y la torre:

- ***La hélice y el rotor*** forman el elemento más problemático de un aerogenerador, además del más costoso. Están diseñados con un número de palas que varían de una a seis, las cuales en un principio se construían de acero pero debido a los problemas que suponía este material, la tendencia actual es de fabricar las palas con fibra de vidrio o carbono. En cualquier caso, se emplean materiales ligeros que permitan aumentar el tamaño del generador incrementando así su potencia instalada.
- ***La navecilla o góndola;*** es el aerogenerador propiamente dicho, donde están situados los equipos mecánico y eléctrico y donde se transforma la energía cinética del rotor que transmite la hélice en la energía eléctrica del generador. Este elemento del aerogenerador suele estar protegido por placas de aluminio que actúan de aislante tanto del ruido como del calor. Normalmente tiene incorporado un microprocesador que controla con bastante precisión el ángulo de inclinación de las hélices del rotor respecto al viento, para obtener el mayor rendimiento posible.
- ***La torre;*** es elemento desarrollado en altura para conseguir un mayor aprovechamiento de la intensidad del viento haciendo girar las palas del rotor, que origina una energía cinética que se transmite a través del eje principal del alternador-generador situado en la navecilla (Azcarate, 2007).

Dentro de este mismo tipo de aerogeneradores (eje horizontal) existen las siguientes clases:

- ✓ ***Monopala:*** Tienen, en mayor medida, los mismos inconvenientes que los bipala, necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo.
- ✓ ***Bipala:*** Ahorra el peso y coste de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala, pero necesitan mayores velocidades de giro para producir la misma energía que aquellos, Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho más complejo, con un rotor basculante y amortiguadores que eviten el choque de las palas contra la torre.
- ✓ ***Tripala:*** Es el más empleado en la actualidad, consta de tres palas colocadas formando 120° entre sí. Un mayor número de palas aumenta el peso y coste del aerogenerador, por lo que no se emplean diseños de mayor número de palas para fines generadores de energía de forma comercial, aunque si para fines mecánicos como bombeo de agua etc.
- ✓ ***Orientadas a barlovento:*** Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante, consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento que en la opción contraria o sotavento, pero necesita un

mecanismo de orientación hacia el viento. Es el caso inmensamente preferido para el diseño actual de aerogeneradores.

- ✓ ***Orientadas a sotavento:*** Cuándo el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, la estructura de la torre y la góndola disminuye el aprovechamiento del viento por el rotor, en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza la góndola, por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad. Las palas y la góndola son construidos con una mayor flexibilidad que en el caso de orientadas a barlovento.
- ✓ ***Torres de celosía*****:** Son las construidas mediante perfiles de acero unidos mediante tornillería.
- ✓ ***Torres tubulares:*** Consisten en grandes tubos de acero de forma tubular o cónica que ofrecen en su interior espacio para los equipos de suelo y para el acceso a resguardo hacia la góndola. Necesitan de una instalación más laboriosa y cara, pero ofrecen una mayor resistencia y menos mantenimiento necesario que las torres de celosía. Son las más empleadas en equipos de generación de energía.

- **Eje vertical:** Se trata de turbinas auto-orientables, ya que las hélices están acopladas perpendicularmente al suelo, pueden aprovechar el viento sea cual sea la dirección. Son muy poco usadas para la generación de electricidad debido a que su diseño no les permite girar a altas velocidades; su rendimiento es muy bajo para la generación de electricidad.

Actualmente los dos tipos de aerogeneradores de eje vertical más extendidos son:

- El aerogenerador Savonius el cual su máximo rendimiento se alcanza a bajas revoluciones, debido a la gran resistencia que ofrece al viento. Para la producción de energía eléctrica debe acoplarse un multiplicador al conjunto, el cual reduce enormemente el rendimiento (Escudero, 2008).

- El aerogenerador de tipo Darrieus, patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de Troposkien, aunque pueden utilizarse también centenarias. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas como los necesarios en los aerogeneradores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, pero necesita de un sistema externo de arranque (OPEXenergy, 2013).

La Figura 1.6 muestra un esquema de un aerogenerador de eje horizontal tripala. En el mismo se distinguen los siguientes elementos principales:

1. Base y cimientos
2. Punto de conexión a la estación transformadora de baja a alta tensión
3. Torre de sustentación
4. Escalera interior del rotor hacia el viento
5. Sistema de orientación del rotor hacia el viento
6. Góndola
7. Generador eléctrico (asíncrono o síncrono)
8. Anemómetro y veleta
9. Freno para fijación del rotor
10. Caja multiplicadora de velocidad (*gear box*)
11. Pala o álabe del rotor
12. Punto de inserción de la pala en el buje
13. Buje o raíz del aerogenerador (Villarubia, 2012).

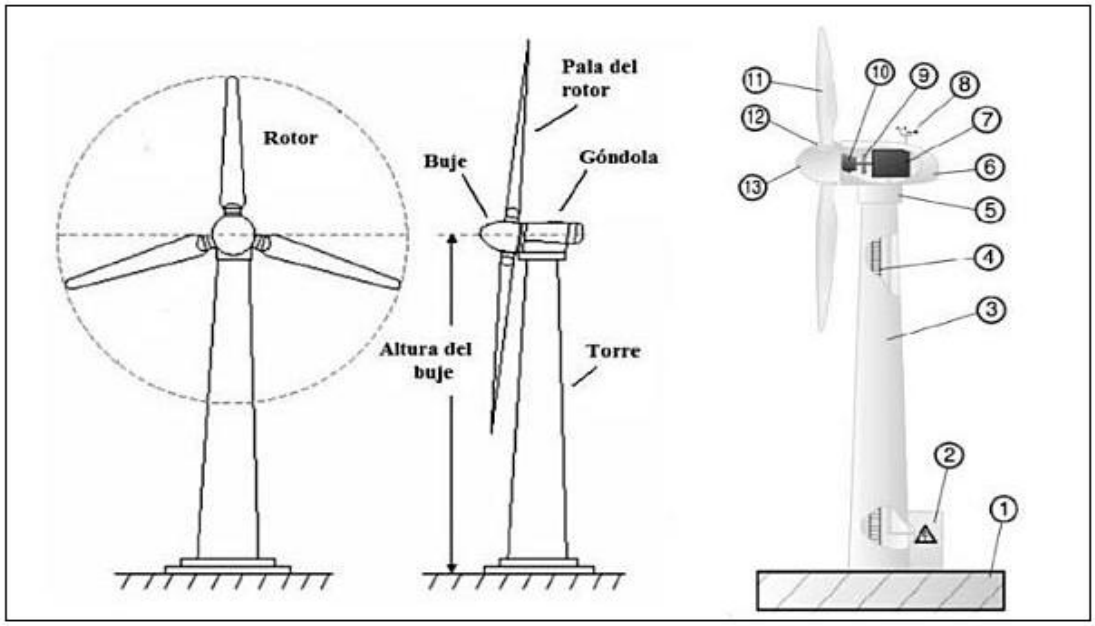

Figura 1.6 Aerogenerador horizontal (Villarubia, 2012)

El funcionamiento de una central eólica con un aerogenerador de eje horizontal se lleva a cabo de la siguiente forma:

Sobre una torre soporte (3) se coloca una góndola (2), que aloja en su interior un generador, el cual está conectado, mediante una multiplicadora, a un conjunto de palas (1). La energía eléctrica producida por el giro del generador es transportada mediante cables conductores (4) a un centro de control (6) desde donde, una vez elevada su tensión por los transformadores (8), es enviada a la red general mediante las líneas de transporte de alta tensión (9).

Dado el carácter aleatorio de la producción de energía eléctrica por vía eólica, las centrales de este tipo deben disponer de una fuente auxiliar (7) para tener garantizado en todo momento el suministro de energía eléctrica.

Debido a la altura en la que se encuentra el generador y al rozamiento que el aire produce sobre éste, es conveniente que el equipo tenga una toma a tierra (5), para evitar la electricidad estática. Asimismo, para el control de la velocidad del generador existen tecnologías que permiten regular, dentro de unos límites, las revoluciones de las palas, independientemente de la velocidad del viento como se observa en la Figura 1.7 (UNESA, 2011).

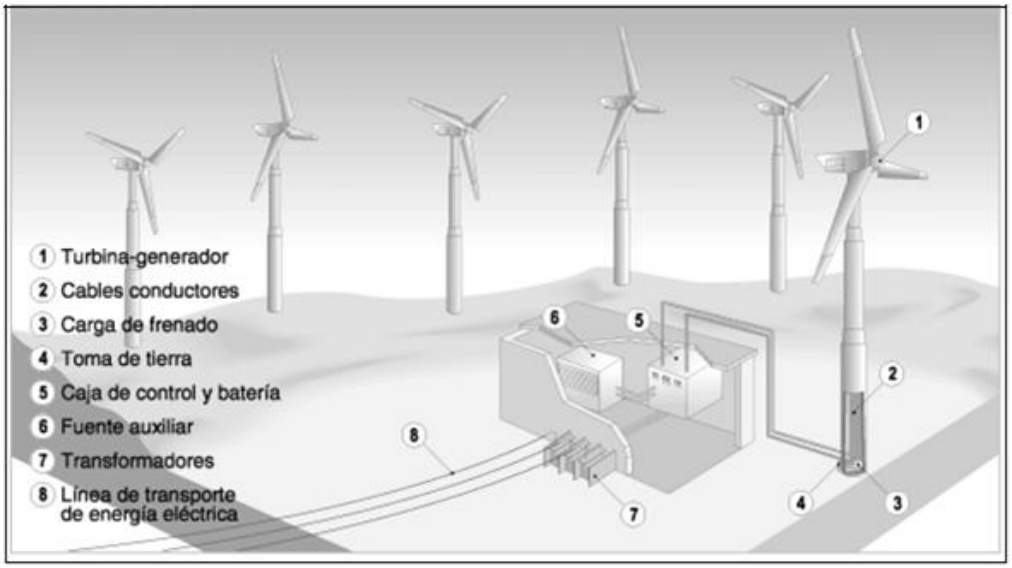

Figura 1.7 Diagrama de central eólica (UNESA, 2011)

1.5. Centrales fotovoltaicas

La luz está formada por fotones, que son partículas energéticas cuya energía es proporcional a la frecuencia a la cual vibran, por lo tanto, la luz es una mezcla de fotones de distinta energía. La conversión directa de la energía solar en energía eléctrica se debe al fenómeno físico de la interacción de la radiación luminosa con los electrones en los materiales semiconductores, fenómeno conocido como “efecto fotovoltaico”. Las células fotovoltaicas producen electricidad directamente, convirtiendo la energía que llega del sol.

A pesar de ser descubierto en 1839, el proceso de producción de corriente eléctrica en un material sólido con la ayuda de la luz solar no se logró entender por completo hasta mediados del siglo XX. Los primeros avances hacia su comercialización se producen en los años cuarenta, periodo en el que se desarrolla el proceso Czochraslki para la producción de silicio monocristalino de alta pureza (Romero, 2010).

Los primeros trabajos de investigación referentes a la energía solar fotovoltaica se desarrollaron con miras a su aplicación en naves espaciales. En 1958 se lanzó el primer satélite y las células de silicio se convirtieron en la casi exclusiva fuente de alimentación. Esta energía también es utilizada en las centrales fotovoltaicas las cuales producen electricidad sin necesidad de turbinas ni generadores, utilizando la propiedad que tienen ciertos materiales de generar una corriente de electrones cuando incide sobre ellos una corriente de fotones.

La clave de funcionamiento de las células fotovoltaicas está en la disposición en forma de sándwich de materiales dopados de diferente forma, de manera que unos tengan exceso de electrones y otros, por el contrario “huecos” con déficit de electrones. Los fotones de la luz solar portan una energía que arranca los electrones sobrantes de una capa y los hace moverse en dirección a los “huecos” de la otra capa.

El resultado es la creación de flujo de electrones excitados y por lo tanto un voltaje eléctrico. Este voltaje conseguido es muy pequeño: por ejemplo, una iluminación con una potencia de 1kW por metro cuadrado genera apenas un voltaje de 0.5 voltios (UNESA, 2011).

El elemento básico de una central fotovoltaica es el conjunto de células fotovoltaicas, que captan energía solar, transformándola en corriente eléctrica continua mediante el efecto fotoeléctrico. Están integradas en módulos con los cuales se forman los paneles fotovoltaicos (1). La producción de energía eléctrica depende de las condiciones meteorológicas (fundamentalmente de la insolación). Dichas condiciones son medidas y analizadas con una torre meteorológica (2), la corriente continua generada en los paneles solares tiene que ser transformada en corriente alterna. Para ello es conducida a un armario de corriente continua (4), para ser convertida en corriente alterna por medio de un inversor (5) y ser finalmente transportada a un armario de corriente alterna (6). Posteriormente la energía eléctrica producida pasa por un centro de transformación (7) donde se adapta a las condiciones de intensidad y tensión de las líneas de transporte (8) (Figura 1.8), para su utilización en los centros de consumo (UNESA, 2011).

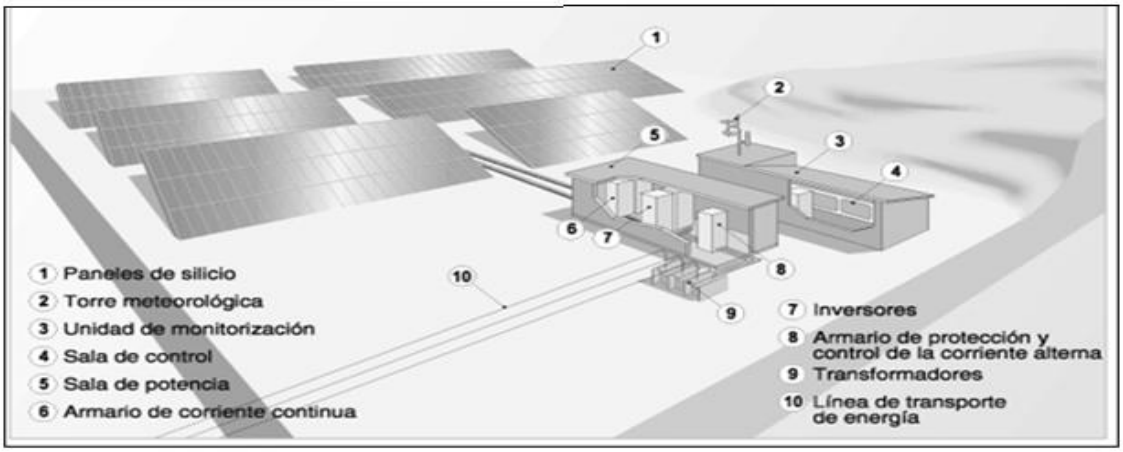

Figura 1.8 Diagrama de central fotovoltaica (UNESA, 2011)

1.6. Generación de energía eléctrica a pequeña escala

1.6.1. Grupo electrógeno

Son motores de combustión alimentados por derivados del petróleo (gasóleo, gasolina, queroseno), al ser su tecnología muy difundida, son de bajo coste y se utilizan con relativa frecuencia, importándose.

Presentan ciertos inconvenientes:

a) Problemas de suministro de combustible: genera una dependencia del exterior a lo largo de todo el tiempo de vida de los equipos
b) Arranque no instantáneo
c) Exigencias de mantenimiento constante
d) Contaminación acústica y medio ambiental

Por el contrario, su potencia permite, además de la iluminación de seguridad, garantizar el funcionamiento de otras instalaciones esenciales tales como ascensores y bombas de la red de incendios.

Su duración de funcionamiento no está limitada y la potencia suministrada es constante. Los grupos electrógenos son obligatorios para los edificios de gran altura, cualquiera que sea su destino, y en la mayor parte de los establecimientos que reciben público. Para los hospitales, las telecomunicaciones, la permanencia de la corriente eléctrica es vital. En la industria, su empleo evita pérdidas importantes en caso de corte accidental de la corriente.

Su puesta en marcha es automática en el momento de fallo en el sector, pero como son motores de combustión necesitan gran cantidad de aire fresco tanto para su consumo como para la evacuación del calor que desprenden durante su funcionamiento. Además, la reserva de combustible no debe ser susceptible de contaminar la capa freática y debe estar resguardado del fuego.

1.6.1.1 Diversos tipos de grupos electrógenos

Un grupo electrógeno se compone de un motor térmico, de un generador de electricidad y de un armario de distribución y de mando. Se completa con sistema de aprovisionamiento de combustible. El motor térmico de combustión interna funciona con gasolina para pequeñas potencias y con gas-combustible para potencias superiores.

Estos grupos se ponen en marcha manual o automáticamente con un retraso extremadamente breve, no excediendo de diez segundos.

Se distinguen las siguientes categorías:

- **Grupos electrógenos de arranque automático.** Un dispositivo especial los mantiene calientes y arrancan entre 5 y 10 segundos después del corte

de corriente, empujados por un motor de arranque eléctrico o de aire comprimido según las potencias.

- **Grupos sin paro.** Entre el motor térmico y el generador eléctrico se coloca un pesado volante movido en marcha normal por el generador funcionando como motor, o por un motor auxiliar.
- **Grupos estabilizadores.** La corriente eléctrica se suministra permanentemente en condiciones de tensión y frecuencia fijas (1 a 2%) por un alternador movido por un generador con volante de inercia alimentado por el sector.

Se utilizan dos tipos de grupos electrógenos: el grupo de una maquina (el alternador funciona sincronizado con el sector) o el grupo de dos máquinas (un motor eléctrico alimentado por el sector, mueve un generador que suministra corriente al circuito de utilización) (Bayon, 1978).

Un grupo electrógeno consta de las siguientes partes:

1. Motor de combustión interna
    - Sistema de combustible
    - Sistema de lubricación
    - Sistema de enfriamiento
    - Sistema de gases de escape
    - Sistema de arranque
2. Generador de corriente alterna
    - Sistema de excitación
    - Sistema de regulación de voltaje
3. Sistema de control, protección, medición y alarmas
4. Sistema de transferencia automática (Bayon, 1978)

Se han desarrollado grupos electrógenos que emplean biogás (sistemas de encendido por chispa) o, de forma mixta, biogás y gasóleo. Sin embargo, ambos presentan el inconveniente de necesitar cierta presión en el biogás, lo cual requiere una tecnología adicional no siempre disponible (García, 1999).

1.6.2 Pila voltaica

El término voltaico procede del nombre del científico italiano Alejandro Volta que fue el primero que inventó la pila de este tipo (Seippel, 1977). Gracias al invento de la pila voltaica se hicieron posibles los experimentos de electrólisis, electromagnetismo y descargas eléctricas (Gromer, 2006)

Supóngase dos placas una de zinc y una de cobre en ácido diluido conectadas por un hilo de cobre se produce una diferencia de potencial donde el hilo de cobre toca la placa de zinc. En el ácido diluido hay átomos de hidrógeno electrizados positivamente, los iones positivos También hay grupos de átomos cargados negativamente los iones negativos. Ya que el zinc está electrizado positivamente atrae a los iones negativos y se une a ellos formando sulfato de zinc. Los iones de hidrógeno se mueven hacia la placa de cobre electrizada negativamente, y como

no son capaces de combinarse con el cobre, adoptan electricidad negativa y se liberan en forma de hidrógeno gaseoso (Ambrose, 2007).

1.6.3 Pilas de combustible o celda de combustible

Una celda o pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica, mientras se suministra combustible y oxidante a sus electrodos, sin más limitaciones que los procesos de degradación o mal funcionamiento de los componentes.

La reacción global que tiene lugar en una pila de combustible es, la combinación de hidrogeno y oxígeno para formar agua:

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

En el ánodo tiene lugar la oxidación del combustible, mientras que en el cátodo se consumen iones positivos del electrolito y los electrones generados en el ánodo

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e - \quad en\ el\ ánodo$$

$$O_2 + 4H^+ 4e - \rightarrow 2H_2O \quad en\ el\ cátodo$$

El ánodo y el cátodo están separados por una capa electrolítica que permite el movimiento de los iones a través de ella pero no el de los electrones generados en el ánodo. El resultado de la reacción es agua y electricidad.

Como combustibles están principalmente el hidrógeno (H_2), el metanol (CH_3OH) y según las condiciones también el metano (con temperaturas muy elevadas). Como los combustibles habituales no se pueden utilizar directamente, deben transformarse en H_2 por medio de una reacción química de reformado. Las pilas de combustible trabajan con un alto rendimiento y unas bajas emisiones de contaminantes. Están estructuradas en módulos y, en consecuencia, se pueden emplear en una amplia gama de potencias que va desde algunos vatios hasta el megavatio.

Una nueva tecnología que resulta interesante es la de la pila de biocombustible, que es como una pila de combustible convencional; sin embargo, en lugar de un catalizador de platino, utiliza enzimas o incluso organismos enteros. La electricidad se obtiene a través de moléculas orgánicas que pueden soportar la transferencia de electrones. Una aplicación será como fuente de energía para implantes médicos, por ejemplo, marcapasos, tal vez utilizando como combustible la glucosa presente en la corriente sanguínea (Atkins y Jones, 2007).

En la actualidad productores de líneas automotrices desarrollan automóviles impulsados por pilas de combustible de hidrógeno, como ejemplo Hyundai será el primer fabricante automovilístico del mundo en producir en seria vehículos con pila de combustible de hidrógeno. El modelo de Hyundai ix35 FCEV será alimentado por hidrógeno, a través de una pila de células de combustible que convierte el

hidrógeno en electricidad, lo que enciende su motor. La única emisión generada por la pila de combustible del ix35 es agua (AUTOCAR, 2013.).

Para el funcionamiento de un vehículo de hidrógeno, en primer lugar es necesario obtener el hidrógeno que se va a utilizar como combustible. Para ello se parte de agua destilada que haciéndola pasar a través de los electrolizadores y mediante aplicación de una fuente de energía eléctrica o placas solares, se descompone en hidrógeno y oxígeno.

El hidrógeno y oxígeno pasan a través de conductos a los electrodos de la pila de combustible, en este caso de tipo PEM (pila de combustible de membrana polimérica). En los electrodos se producirán las reacciones químicas explicadas anteriormente, de manera que los protones H+ pasan a través del electrólito, y se combinan con el oxígeno generando la energía suficiente para que el coche se ponga en funcionamiento (Figura 1.9) (CNH2, 2013).

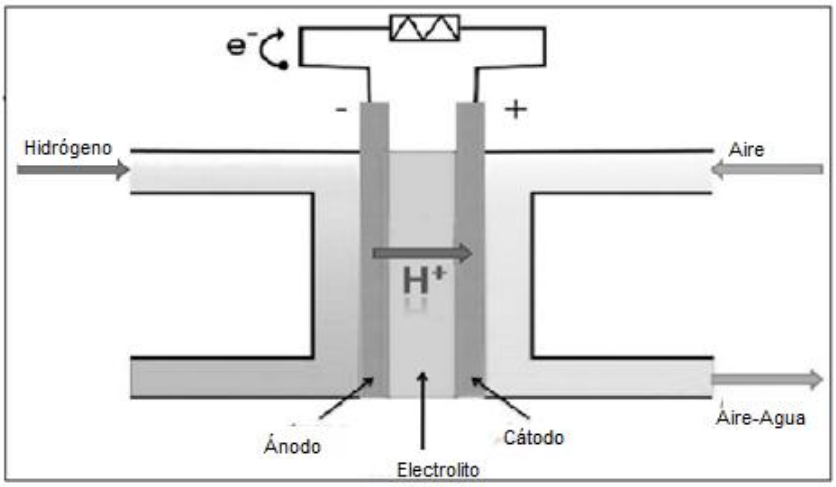

Figura 1.9 Esquema del funcionamiento de una pila de hidrógeno (CNH2, 2013)

1.7 Generador termoeléctrico de radioisótopos

Radioisótopos

Por definición los radioisótopos liberan energía la cual en su mayoría se transforma en calor, el calor puede alimentar un motor y producir electricidad. También se puede utilizar un termopar que producirá directamente la energía sin unidades en movimiento, esto es un Generador Termoeléctrico de Radioisótopos (RGT). El isótopo utilizado debe tener un periodo de vida media eficiente para aplicaciones espaciales o médicas. Los radionucleoides son emisores alfa (Métivier, 2010).

Un generador termoeléctrico de radioisótopos (RTG: por sus siglas en inglés) es simplemente un generador eléctrico que obtiene su energía de la que liberan otros

elementos por la desintegración radioactiva. El calor liberado por la desintegración de un material radiactivo se convierte en energía eléctrica gracias al uso de termopares.

Los RTG se pueden considerar un tipo de batería y se han usado en satélites, sondas espaciales no tripuladas e instalaciones remotas que no disponen de otro tipo de fuente eléctrica o de calor. Son los dispositivos más adecuados en situaciones donde no hay presencia humana y se necesitan potencias de varios centenares de vatios durante largos periodos. El más adecuado y usado en RTG destinados a uso espacial es el plutonio-238 ya que le da un periodo de vida de 90 años. El plutonio-238 ha alimentado docenas de naves, incluidas las sondas Voyager, la misión Galileo y la sonda Cassini (Russell y Ronald, 2012).

Para reducir al mínimo los riesgos de fuga radiactiva, el combustible nuclear se almacena en módulos con blindaje térmico individual. Éstos se envuelven en capa de iridio y se sellan dentro de bloques de grafito. Ambos materiales son resistentes a la corrosión y al calor. Alrededor del bloque de grafito se sitúa una protección contra el calor de la reentrada (aeroshell).

Un ejemplo de RTG es el modelo SNAP-27 (Figura 1.10), el cual fue desarrollado por la NASA e implementado en la misión del Apollo 12, este modelo fue una elección natural ya que tenía una masa muy baja, confiable y la habilidad de producción de energía eléctrica durante el ciclo lunar de noche-día (Rowe, 2006).

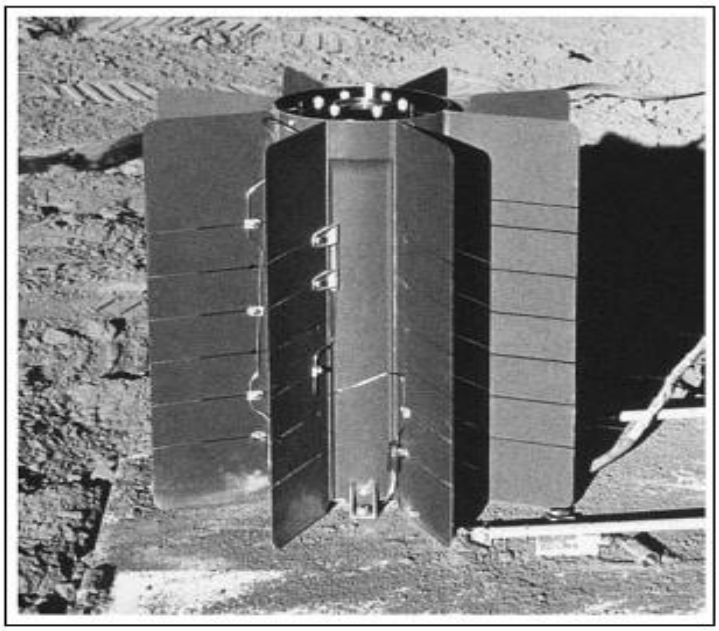

Figura 1.10 Generador termoeléctrico de radioisótopos modelo SNAP-27 utilizado en la misión espacial Apollo 12 (Rowe, 2006)

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

2.1. Motor térmico

El motor térmico es un conjunto de elementos mecánicos que permiten obtener energía mecánica a partir del estado térmico aportado a un fluido operante a través de un proceso de combustión o reacción nuclear. En general, el término motor térmico se aplica cuando se trata de una unidad compacta (centrales termoeléctricas de gran tamaño) se habla frecuentemente de "plantas de potencia".

Con la ayuda de las máquinas y los motores térmicos ha sido posible transformar la energía química de los combustibles, la nuclear del átomo, la solar o la geotérmica en otras formas de energía más útiles para el hombre (Arrègle y col., 2002).

2.1.2. Clasificación de los motores térmicos

Los motores térmicos se pueden dividir en motores de combustión interna (M.C.I) y motores de combustión externa (M.C.E). Los cuales se subdividen en diferentes clasificaciones, estas son resumidas de la siguiente manera (Arrègle y col., 2002):

a) Motores de combustión externa

- Flujo condensable:
  - ✓ Rotativos: Turbomáquinas- turbinas de vapor
    Volumétricos- no desarrollados como motores
  - ✓ Alternativos- Máquina de vapor
  - ✓ Reacción- No desarrollados
- Flujo no condensable:
  - ✓ Rotativos: Turbomáquinas- turbinas de gas (ciclo cerrado)
    Volumétricos- no desarrollados
  - ✓ Alternativos- Motor de aire caliente (Stirling)
  - ✓ Reacción- No desarrollados

b) Motores de combustión interna

- Rotativos:
  - ✓ Turbomáquinas- Turbina de gas (ciclo abierto)
  - ✓ Volumétricos- Motores Rotativos (Wankel)
- Alternativos:
  - ✓ Encendido provocado (explosión)
  - ✓ Encendido por compresión (Diesel)
- Reacción:
  - ✓ Cohetes-Químicos:
    - o Propulsante líquido

- Propulsante sólido

✓ Aerorreactores

✓ Sin Compresor:

- Estatorreactor
- Pulsorreactor

✓ Con compresor:

- Turborreactor
- Turbofán
- Turbohélice

2.1.2.1. Máquina de combustión interna

Las máquinas de combustión interna pueden clasificarse según el método utilizado para transformar la energía del fluido en trabajo mecánico. Según este convenio, existen tres tipos generales:

- De pistón: Pertenecen las máquinas ordinarias de ignición por chispa e ignición por compresión.
- De turbina: corresponde a las turbinas de combustión de gas.
- De chorro: cohetes y el estatorreactor.

El motor de turbo-propulsión, ampliamente utilizado en aviación, es una combinación de los tipos de turbina y chorro.

1. Motores de ignición por chispa

Los motores de ignición por chispa pueden catalogarse en dos tipos generales: motores de cuatro tiempos y motores de dos tiempos.

a) Motor de cuatro tiempos

En el motor de cuatro tiempos se requieren cuatro desplazamientos del pistón para completar un ciclo. En el tiempo de aspiración el pistón se desplaza hacia abajo con la válvula de entrada abierta y la de escape cerrada, absorbiendo mediante el carburador una mezcla de aire y combustible vaporizado y atomizado.

Durante el tiempo de compresión la mezcla aire-combustible se comprime con ambas válvulas cerradas. En la posición del punto muerto superior a la mezcla de aire y combustible se quema por la acción de una chispa y comienza el tiempo de expansión con ambas válvulas cerradas. Al aproximarse al punto muerto inferior se abre la válvula de escape, y la presión del cilindro desciende al valor exterior. Durante el tiempo de expulsión el pistón se desplaza hacia arriba con la válvula de escape abierta y se completa el ciclo. Las paredes del cilindro se refrigeran durante todo el ciclo mediante líquido que circula por las paredes del mismo o mediante aletas refrigeradoras sobre las cuales sopla aire frío.

El funcionamiento del motor de cuatro tiempos depende del cronometraje preciso entre las secuencias de las válvulas y la chispa de ignición. Las válvulas actúan mediante un juego de levas situado en un árbol engranado a la manivela del

cigüeñal, por esta razón, la sincronización de las válvulas se fija de ordinario independientemente de la carga o velocidad.

La chispa de ignición tiene lugar en la bujía gracias a una corriente de alto voltaje procedente de la bobina. Los intervalos de encendido de la chispa vienen determinados por un disyuntor que interrumpe periódicamente la corriente que fluye de la batería al primario de la bobina y produce una corriente de alto voltaje en el secundario.

El disyuntor y el distribuidor actúan mediante levas engranadas a la manivela del cigüeñal. Sin embargo un dispositivo permite variar el tiempo de encendido de la chispa desde una posición avanzada hasta una posición retardada con respecto al punto muerto superior en el tiempo de compresión. En los motores más recientes el período de la chispa varía automáticamente con la velocidad y la carga, a fin de conseguir una potencia y un rendimiento óptimos. Cuando la velocidad crece, el encendido de chispa se adelanta mediante un dispositivo de avance centrífugo que varía el tiempo de apertura de las conexiones del interruptor.

b) Motor de dos tiempos

En el motor de dos tiempos las etapas de admisión y escape se eliminan utilizando la carga de combustible pre-comprimida para desplazar o borrar los gases de escape cuando el pistón llega al punto inferior muerto.

La mezcla de combustible y aire procedente del carburador penetra en el cárter a través de una válvula en el período de compresión. Durante el período de expansión la mezcla es comprimida en el cárter, y al final del mismo el pistón descubre las lumbreras de admisión y expulsión situadas en las paredes del cilindro. La mezcla comprimida penetra por la lumbrera de admisión y expulsa los gases residuales cuando el pistón está próximo al punto muerto inferior. La lumbrera de expulsión se abre en primer lugar de modo que se produce un flujo saliente antes de que se abra la lumbrera de admisión. Cuando el pistón asciende, ambas están cerradas y se inicia el periodo de compresión (Watson y col., 1982).

2. Turbina de gas

Una turbina de gas es un motor térmico rotativo de combustión interna, donde a partir de la energía aportada por un combustible se produce energía mecánica y se genera una importante cantidad de calor en forma de gases calientes y con un alto porcentaje de oxígeno. La máquina sigue un ciclo abierto (Figura 2.1), puesto que se renueva continuamente el fluido que pasa a través de ella.

El aire es aspirado de la atmósfera y comprimido para después pasar a la cámara de combustión, donde se mezcla con el combustible y se produce la ignición. Los gases calientes, producto de la combustión, fluyen a través de la turbina, allí se expanden y mueven el eje, que acciona el compresor de la turbina y el alternador, las pérdidas se desprenden en forma de calor que evacuar del sistema, normalmente no son superiores al 3% de la energía aportada.

Estas turbinas pueden clasificarse según el origen de su desarrollo, por el diseño de su cámara de combustión y por su número de ejes.

- **Turbina de gas aeroderivadas:** Provienen del diseño de turbinas para fines aeronáuticos, pero adaptadas a la producción de energía eléctrica en plantas industriales como micro turbinas. Sus principales características son su gran fiabilidad y alta relación potencia/peso, además cuentan con una gran versatilidad de operación y su arranque no es una operación tan crítica como en otros tipos de turbinas de gas.
- **Turbina de gas industrial:** Su potencia de diseño puede llegar a los 500 MW, moviendo grandes cantidades de aire a bajas velocidades, que pueden aprovecharse en posteriores aplicaciones de cogeneración (RENOVETEC, 2013)

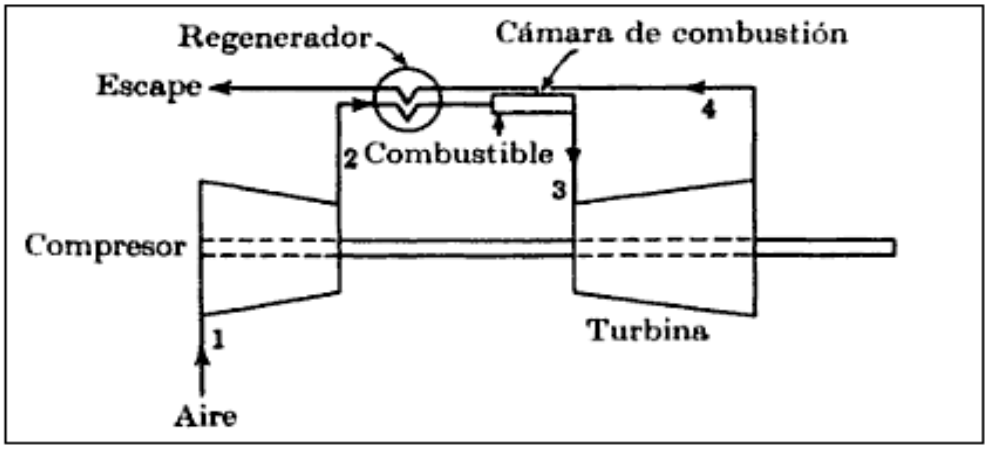

Figura 2.1 Turbina de gas de ciclo abierto (Watson y col., 1982)

3. Motor rotativo "Wankel"

El motor Wankel es un motor de combustión interna rotativo desarrollado por Félix Wankel, el cual no dispone de un pistón con movimiento rectilíneo alternativo y una biela, sino que todos sus elementos móviles describen una rotación (Font y Dols, 2004).

Este tipo de motor está constituido por una carcasa (1) que en su centro tiene un hueco de paredes verticales, con la forma aproximada de una elipse (recibe el nombre de epitrocoide), la cámara de refrigeración (2), la lumbrera de admisión (A), la lumbrera de escape (E) y los alojamientos para una o dos bujías (Figura 2.2).

En el interior de la cámara epitrocoidal, que hace las funciones del cilindro en los motores alternativos, gira de manera excéntrica un rotor (3), que hace las funciones del émbolo con forma de triángulo equilátero. Las caras externas del rotor están curvadas e incluyen unos vaciados (7) que hacen de cámara de

compresión. El centro del rotor está formado por una corona dentada interior (5) que engrana con el piñón del árbol motriz (6). En los vértices del triángulo que forma el rotor hay unas juntas de estanqueidad (4) (CEAC, 2004).

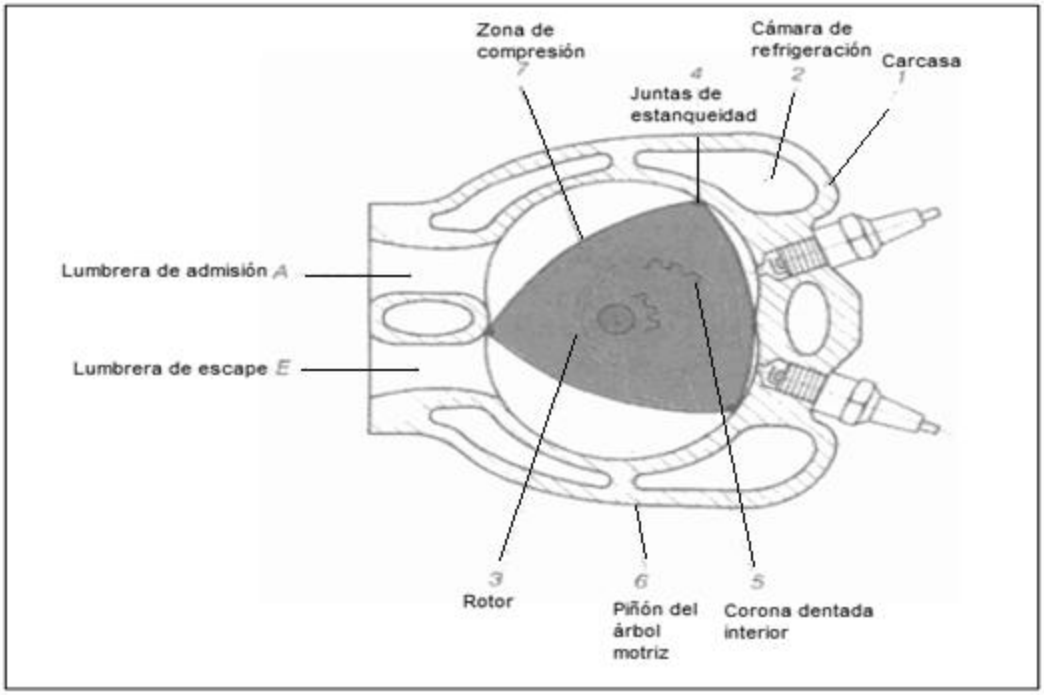

Figura 2.2 Sección esquemática de un motor de émbolo rotativo (CEAC, 2004)

4. Motor cohete químico

El proceso químico que lo alimenta es la combustión de determinados propulsores que desarrollan las partículas gaseosas a alta temperatura y velocidades responsables del empuje. Los cohetes de propulsión química se clasifican a su vez según el tipo de propelente que utilizan, y pueden ser de tres tipos: de propulsor sólido, líquido o híbridos:

i. Motor cohete químico de propelente líquido

Lo cohetes de propulsor líquido por lo general llevan el combustible y el oxidante en dos depósitos separados. Los dos líquidos son enviados por medio de una bomba a la cámara de combustión donde, al entrar en contacto, desarrollan el proceso químico que da lugar a un potente flujo de partículas gaseosas (llamadas gases de combustión o productos de combustión). Una de las combinaciones más empleadas para los cohetes de propulsor líquido es la de hidrógeno líquido con oxígeno líquido.

Otra combinación de propulsores líquidos es la de hidracina (combustible) y peróxido de nitrógeno (oxidante), utilizados en los motores principales de los transbordadores espaciales.

También existen cohetes de propulsión líquida que recurren al llamado monopropulsor, es decir, a un único compuesto químico en estado líquido que se hace pasar a través de un catalizador, presente en el interior de la cámara de combustión que tiene el poder de descomponerlo en una mezcla gaseosa que se quema. Es el caso del peróxido de hidrógeno que, en contacto con un catalizador de platino, se descompone en oxígeno y vapor de agua sobrecalentado.

El cohete de propulsión líquida es el más utilizado para la exploración espacial debido a que el empuje que se logra con él es alto en relación con los cohetes de propulsión sólida. Estos motores cohete pueden ser:

- **Monopropelentes:** Constan de un solo componente, un propelente mezclado previamente, por lo cual el oxidante no necesita ser suministrado. Sin embargo, es peligroso que la combustión se desarrolle en el tanque de almacenamiento, además posee bajo poder calorífico.

- **Bipropelente:** Consta de dos componentes líquidos oxidante y combustible que se suministran separadamente en la cámara de combustión y se mezclan allí mismo o en los inyectores. Estos se dividen en: hipergólicos o autoinflamables que reaccionan cuando sus chorros entran en contacto y diergólicos o no-autoinflamables que necesitan un sistema de ignición para iniciar la combustión. Para una combinación de propelentes, la temperatura de combustión, depende de la relación en peso entre el comburente y el combustible, es decir de la relación de la mezcla y de la presión estática a la que se realiza la combustión. Cuando el gasto de los propelentes líquidos iguala a la de los gases de escape, la presión de combustión permanece constante.
  Estos cohetes usan para su funcionamiento la energía termoquímica de los ergoles, que son las sustancias que componen los propergoles o propelentes, (propelente es cualquier sustancia líquida, sólida gaseosa o plasma empleada en la propulsión del cohete). La Tabla 2.1 y la Tabla 2.2 resumen los oxidantes y combustibles más utilizados en este tipo de cohetes.

ii. Motor cohete químico de propelente sólido

En los cohetes de propulsor sólido, el combustible y el oxidante se mezclan conjuntamente bajo la forma de un polvo compacto y solidificado, llamado grano. Este se acumula en la cámara de combustión adhiriéndose perfectamente a las paredes y dejando un agujero cilíndrico central. La ignición se lleva a cabo por medio de un ignitor, que proporciona un impulso eléctrico (Garzón y col., 2004)

Tabla 2.1 Oxidantes más utilizados en cohetes de propelente líquido (Elaboración a partir de Garzón y col., 2004)

Compuesto	Pto. de fusión (°C)	Pto. de ebullición (°C)	Densidad (kg/m^3)	Observaciones
Oxígeno líquido	-218	-183	1140	Utilizado en el V2, R7, Saturno V, transbordador espacial
Tetróxido de Nitrógeno	11	21	-	Almacenable a temperatura ambiente
Ácido nítrico	-0,5	150	1560	Usado por los soviéticos
Flúor líquido	-223	-183	1110	Agente muy corrosivo

Tabla 2.2 Combustibles más utilizados en cohetes de propelente líquido (Elaboración a partir de Garzón y col., 2004)

Compuesto	Pto. de fusión (°C)	Pto. de ebullición (°C)	Densidad (kg/m^3)	Observaciones
Hidrógeno líquido	-259	-252	70	Es inflamable
RP-1	44	182	-	No tóxico
Hidrozina	1,6	113	1010	Muy tóxico

2.1.2.2. Máquina de combustión externa

En las máquinas de combustión externa es necesario transportar el calor desde el lugar en que se produce o se consume hasta la máquina para ello se utiliza un fluido al que genéricamente se denomina agente de transformación. El agente de transformación más comúnmente utilizado con fines industriales es el vapor de agua, dada su abundancia, bajo precio y fácil manejo (Lucas, 2007).

Este tipo de máquinas dependiendo del tipo de movimiento que tengan se clasifican de la siguiente manera como se muestra en la Tabla 2.3.

En las máquinas y en las turbinas de vapor el fluido es agua que se vaporiza en una caldera y se expansiona en un cilindro (máquina de vapor) o en una turbina.

Tabla 2.3 Clasificación de la máquina de combustión externa (Lucas, 2007)

Tipo	Turbomáquinas.
Alternativas	Máquina de vapor, Compresores alternativos
Rotativas	Turbina de vapor, Turbocompresores, Turbosoplantes

2.2. Generador de vapor

Se entiende por generador de vapor o caldera, a un recipiente cerrado herméticamente destinado a producir vapor de agua a mayor presión que la atmosférica, absorbiendo el calor que desarrolla en el hogar (Varetto, 2012).

En una máquina de vapor típica (Figura 2.3) se calienta agua a una presión muy elevada (normalmente hasta varios cientos de atmósferas) hasta que se vaporiza dando vapor de agua a alta temperatura (del orden de 500°C). El vapor se expansiona contra un pistón (o las palas de una turbina) realizando trabajo, escapa después a una temperatura mucho menor y se enfría aún más en el condensador, donde se le extrae calor para producir condensación. A continuación el agua se bombea e introduce de nuevo en la caldera, donde se calienta otra vez.

El segundo principio de la termodinámica exige que, para lograr el funcionamiento de cualquier máquina térmica, se utilicen como mínimo dos niveles térmicos, de tal modo que la máquina tome calor del de mayor temperatura y ceda una parte al otro de menor temperatura, transformando la diferencia de trabajo.

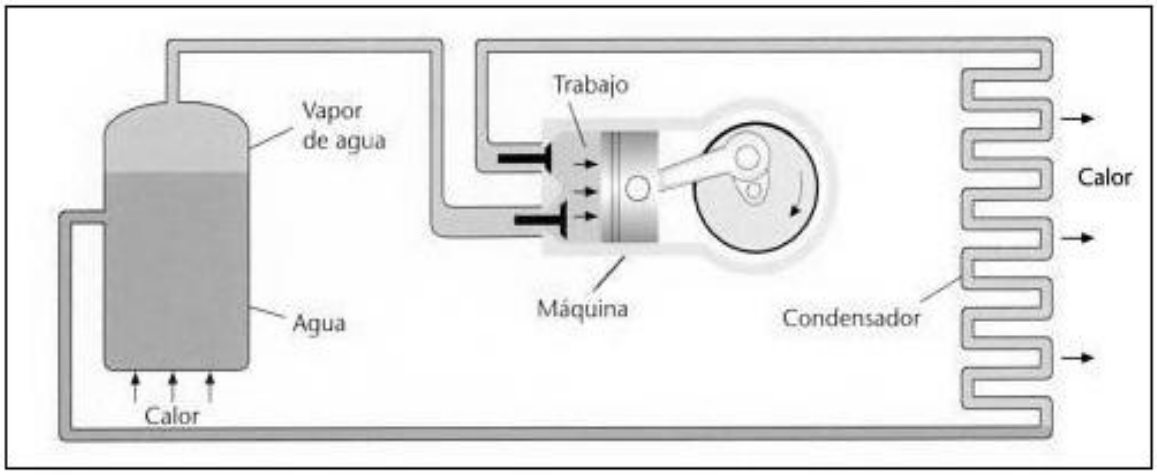

Figura 2.3 Esquema de una máquina de vapor (Tipler y Gene, 2006)

2.2.1. Partes de un generador de vapor

Los componentes principales de un generador de vapor son:

1. **Domo principal o Hervidor**

Este componente es también llamado caldera, es un recipiente metálico diseñado con las condiciones de presión a las que debe trabajar el generador de vapor. En algunas calderas que poseen economizador, el agua del sistema de alimentación de calderas, (Boiler Feed Water, BFW sus siglas en inglés) pasa primeramente por

el economizador y luego de ganar temperatura, pasa hacia el domo después de haberse precalentado el agua. El domo es diseñado para dar cabida al volumen de vapor requerido en conjunto con el equipo de combustión y sus sistemas de control de nivel asociado. En el domo se realizan las siguientes funciones:

- Propiciar el espacio suficiente para facilitar la separación de agua-vapor en el proceso de evaporación, para la producción de vapor en la caldera y para hacer estable el proceso.
- Mantener un volumen adecuado para la alimentación a los tubos bajantes de la caldera y garantizarle un flujo continuo a los tubos generadores de vapor.
- Disponer del área suficiente para acomodar la llegada de los tubos evaporadores o *risers*, la salida de los tubos *descendentes* o *downcomers* y la salida de los tubos de vapor hacia el sobrecalentador.

La calidad del vapor depende del contenido de humedad y es una variable de alto valor para el proceso que depende de dos factores: diseño y operación. Desde el punto de vista del diseño, depende de la presión de diseño, del tamaño del domo, de su longitud y su diámetro, del volumen de vapor generado, de la relación de circulación, del tipo de arreglo de los separadores mecánicos, de la salida del agua (BFW) y del arreglo de las tuberías de los tubos bajantes y elevadores.

En cuanto a la operación depende de la estabilidad del control de nivel de agua en la caldera, de la presión de operación, de la carga de producción de vapor de la caldera, del tipo de carga que sirve y la calidad química del agua dentro de la caldera

El vapor y el agua dentro del domo se separan por acción de la gravedad, el vapor sube y el agua con mayor peso escurre y cae, aunque esto ocurre en condiciones muy pobres dentro del domo. Para calderas dedicadas sólo a suministrar vapor para turbinas de generación de energía eléctrica, estos sistemas de separación son más exigentes, con el fin de proteger los álabes de las turbinas de los impactos por partículas de agua que dañarían gravemente estos equipos.

2. Horno u hogar

El horno de la caldera es el recinto dentro del cual se realiza el proceso de transferencia de calor por radiación. El horno debe cumplir básicamente con las siguientes funciones:

- Capacidad de admitir el volumen de aire necesario para la combustión a plena carga.
- Capacidad suficiente para asegurar circulación adecuada de agua por los tubos.
- Dimensiones proporcionadas, para asegurar un inventario de gases para la generación de vapor y propiciar la absorción térmica óptima en todas las partes.

- Soportar los esfuerzos mecánicos por eventuales explosiones internas dentro de la caldera, evitando daños en equipos externos o daños a personas.

Uno de los elementos importantes del horno y del proceso de combustión es el registro de aire. Para tener una eficiente combustión, es necesario considerar los siguientes tres parámetros, que se interrelacionan de manera estrecha: el conocimiento operacional de los registros, el conocimiento sobre el proceso de la combustión y sus características físico-químicas y la asistencia rutinaria a este proceso.

Los principales mecanismos de transferencia de calor se efectúan de forma simultánea, estos mecanismos incluyen la radiación entre sólidos, que proviene del lecho del combustible, o de las partículas de combustible, la radiación no luminosa de los productos de la combustión, la transferencia de calor por convección de los gases del hogar, y la conducción de calor a través de los materiales metálicos de los depósitos y tubos. La eficacia de la absorción de la superficie del hogar es influida por los depósitos de cenizas y escorias.

3. Sobrecalentador

El sobrecalentador, es un equipo que ofrece una superficie de intercambio de calor para elevar la temperatura del vapor saturado y conseguir una temperatura de sobrecalentamiento, para cumplir los requerimientos del proceso aguas abajo.

Una de las justificaciones más importantes para adicionar más temperatura al vapor saturado es que, sobrecalentado, tiene menos tendencia a condensarse en las últimas etapas de álabes de las turbinas. Aunque la ganancia en la eficiencia total varía de acuerdo con la presión. Pero en general, el sobrecalentamiento depende de las condiciones que exija la carga que va a atender.

Entre las principales razones para realizar esto se tiene:

- Obtener un vapor seco.
- Mejorar la eficiencia total de la unidad.
- Adecuar el vapor a las necesidades nominales del equipo que lo requiere.

Los sobrecalentadores son de varias formas y tipos. La manera más fácil de clasificarlos es teniendo en cuenta su posición dentro de la caldera.

4. Sobrecalentador tipo convección

El vapor absorbe el calor de los gases calientes cuando estos pasan, externamente, sobre la superficie de sus tubos. La temperatura del vapor tiende a elevarse con los aumentos de carga de producción de vapor porque el volumen de gases se incrementa más rápido que el flujo de vapor dentro de los tubos.

5. Sobrecalentador radiante

Puede estar localizado en la parte baja, en las paredes o colgado en el techo del horno de la caldera, en otros diseños, la superficie se dispone en forma de espiras tubulares o planchas, con amplio esparcimiento lateral extendiéndose hacia el hogar. Esta superficie se expone a los gases a alta temperatura del hogar que se mueve a velocidades relativamente bajas, así que la transferencia de calor se hace por radiación.

6. Sobrecalentador de fuego separado o externo

Son usados cuando no es económico tener un sobrecalentador dentro de la caldera o por ejemplo, cuando el vapor es generado en un intercambiador o evaporador en algún sistema de recuperación de calor de un proceso químico.

7. Zona de convección de la caldera

Dentro de las áreas de transferencia de calor, la zona de convección es una de las zonas de mayor cuidado, ya que su mantenimiento es difícil de realizar por lo incómodo del acceso, el cuidado debe enfocarse a una permanente continuidad en el sistema de soplado de hollín, para mantener la superficie en estado óptimo de limpieza. La limpieza de hollín de esta zona normalmente se realiza soplando con vapor la misma caldera.

8. Economizador

Una forma de recuperar calor de los gases de la caldera consiste en hacer pasar por un intercambiador comúnmente llamado economizador, los gases de combustión que recalientan el agua BFW, a una temperatura cercana a la temperatura de saturación del agua dentro del domo.

La localización del economizador varía con el diseño global de la caldera. En calderas donde no existe calentador de aire, los economizadores son instalados en el flujo de gases, entre la salida de gases de la caldera y el ventilador o chimenea. Es conveniente que la ubicación quede de tal modo que los gases fluyan hacia abajo del economizador, y el agua ingrese por la parte de abajo y fluya hacia arriba a través de los tubos. Este diseño de contraflujo reduce a un mínimo la superficie y las pérdidas de la chimenea. El flujo de agua hacia arriba elimina inestabilidad en el flujo, da más uniformidad a la distribución de gases y hace posible un apropiado uso como la vaporización del economizador, lo que significa que algo de vapor es generado en una proporción del agua saliendo. En calderas de altas presiones el economizador es colocado después del calentador de aire.

9. Precalentador de aire

Los precalentadores de aire al igual que los economizadores extraen calor de los gases de combustión con temperaturas relativamente bajas. La temperatura del aire de entrada es menor que la del agua que entra al economizador y por tanto es

posible reducir aún más la temperatura de los productos gaseosos de la combustión, antes de que se descarguen en las chimeneas.

Los calentadores de aire se clasifican en general como: recuperativos y generativos. En ambos se usa la transferencia por convección del calor, de la corriente del gas a un metal o a una superficie sólida.

- **Recuperativos:** Está compuesto por un haz de tubos expandido en una lámina plana de base perforada y encerrado en una caja hermética. Los gases fluyen en un solo paso por el interior de los tubos y el aire fluye en contracorriente cruzando los tubos por su parte exterior, para absorber el calor por convección.
- **Regenerativos:** Hay dos tipos básicos, en el primer tipo los elementos de transferencia de calor se mueven alternadamente a través de corrientes de gas y aire que pasan por ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento y reciben la transferencia de calor por la capacidad de almacenamiento térmico de los elementos. En el otro tipo se tienen elementos estacionarios y el flujo alterno del gas y del aire se controla al hacer girar las conexiones de entrada y salida.

10. La chimenea

Es el conducto vertical disponible para llevar a la salida final de la caldera los gases de la combustión. El efecto chimenea es la diferencia de presión causada por la elevación entre dos localizaciones en ductos que transportan gases calientes por tubos verticales. Este efecto se da por convección.

Para grandes unidades de generación de vapor, equipadas con economizadores, sobrecalentadores y en especial calentadores de aire, no es práctico ni económico operarlas con el solo tiro de la chimenea, debido a los altos niveles de tiro que estos equipos deben manejar. Estas unidades requieren ventiladores adicionales al efecto de tiro natural. La combinación de tiro inducido y chimenea no es comúnmente utilizada.

La altura y diámetro de la chimenea, para unidades de tiro natural, tienen que ver con:

- Las pérdidas de tiro a través de la caldera, desde el horno a la entrada de la chimenea.
- El flujo de gases requerido.
- La presión barométrica del lugar (Rodríguez, 2000)

2.2.2. Ciclo termodinámico

Se entiende por ciclo todo proceso en el cual la sustancia que evoluciona, después de sufrir una serie de transformaciones, vuelve a recuperar su estado inicial, posibilitando así la repetición del ciclo.

2.2.2.1. Ciclo Carnot

En 1824 Sadi Carnot describió una máquina teórica, ahora llamada máquina de Carnot, que es de gran importancia desde los puntos de vista práctico y teórico. Él demostró que una máquina térmica que opera en un ciclo ideal, reversible, llamado ciclo de Carnot, entre dos reservorios de energía es la máquina más eficiente posible. Tal máquina ideal establece un límite superior sobre las eficiencias de todas las otras máquinas. Esto es, el trabajo neto realizado por una sustancia de trabajo llevada a través del ciclo Carnot, es la máxima cantidad de trabajo posible para una cantidad dada de energía suministrada a la sustancia a la más alta temperatura. El teorema de Carnot se puede expresar como sigue:

Ninguna máquina térmica real que opere entre dos reservorios de energía puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que opere entre los mismos dos reservorios.

Para explicar la validez de este teorema imagine dos máquinas térmicas que operen entre los mismos reservorios de energía. Una es una máquina de Carnot con eficiencia β_C, y la otra es una máquina con eficiencia *e*, donde suponemos que $e>\beta_C$. La máquina más eficiente se utiliza para mover la máquina de Carnot como un refrigerador de Carnot.

La salida por trabajo de la máquina más eficiente se compra con la entrada por trabajo del refrigerador de Carnot. Para la combinación de la máquina y refrigerador, no ocurre intercambio por trabajo con el entorno. Debido a que suponiendo que la máquina es más eficiente que el refrigerador, el resultado neto de la combinación es una transferencia de energía del reservorio frío al caliente sin trabajo realizado sobre la combinación. Por lo tanto, la suposición de que $e>\beta_C$ debe de ser falsa. **Todas las máquinas reales son menos eficientes que la máquina de Carnot, porque no operan a través de un ciclo reversible.** La eficiencia de una máquina real se reduce aun más por dificultades prácticas como son la fricción y pérdidas de energía por conducción.

Para describir el ciclo de Carnot que tiene lugar entre temperaturas T_c y T_h, suponemos que la sustancia de trabajo es un gas ideal contenido en un cilindro equipado con un émbolo móvil en un extremo.

Las paredes del cilindro y el émbolo son térmicamente no conductoras. En la Figura 2.4 se ilustran cuatro etapas del ciclo de Carnot, y el diagrama *PV* del ciclo se muestra en la Figura 2.5. El ciclo de Carnot está formado por dos procesos adiabáticos y dos procesos isotérmicos, todos reversibles, los cuales se describen a continuación (Serway y Jewett, 2005).

- Proceso 1-2: El gas se comprime adiabáticamente hasta el estado 2, cuya temperatura es T_C.
- Proceso 2-3: El dispositivo se pone en contacto con el reservorio a T_C. El gas se expande isotérmicamente mientras recibe la energía Q_C del reservorio caliente por transferencia de calor.

- Proceso 3-4: El dispositivo se coloca de nuevo sobre la base aislada y se permite que el gas continúe expandiéndose, ahora adiabáticamente, hasta que la temperatura caiga a T_F.
- Proceso 4-1 El dispositivo se pone en contacto con el reservorio a T_F. EL gas se comprime isotérmicamente hasta su estado inicial mientras cede la energía Q_F al reservorio frío por transferencia de calor (Morán y Shapiro, 2005).

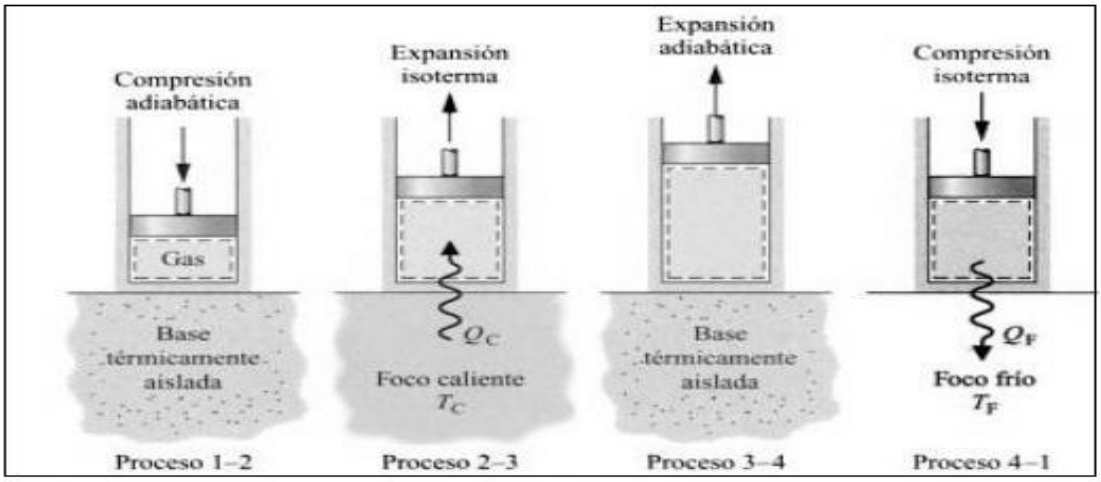

Figura 2.4 Ciclo de potencia Carnot (Morán y Shapiro, 2005)

El trabajo neto realizado en este proceso cíclico, irreversible, es igual al área encerrada por la trayectoria 1234 de la Figura 2.5. Como el cambio en energía interna es cero, el trabajo neto $W_{máq}$, realizado por el gas en un ciclo es igual a la energía neta transferida en el sistema $|Q_h| - |Q_c|$. La eficiencia térmica de la máquina está dada por la ecuación 2.1:

$$e = \frac{W_{máq}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} \qquad \text{Ec 2.1}$$

Para un ciclo de Carnot se tiene que:

$$\frac{|Q_c|}{|Q_h|} = \frac{T_c}{T_h} \qquad \text{Ec. 2.2}$$

Por lo tanto, la eficiencia térmica de una máquina de Carnot es:

$$e_c = 1 - \frac{T_c}{T_h} \qquad \text{Ec 2.3}$$

Este resultado indica que todas las máquinas de Carnot que operen entre las mismas dos temperaturas tienen la misma eficiencia.

La ecuación 2.3, se puede aplicar a cualquier sustancia de trabajo que opere en un ciclo de Carnot entre dos reservorios de energía. Según esta ecuación, la

eficiencia es cero si T_c=T_h, como se espera. La eficiencia aumenta cuando T_c baja y cuando T_h sube.

No obstante, la eficiencia puede ser la unidad (100%) sólo si T_c= *0 K*. Tales reservorios no existen, por lo tanto, la máxima eficiencia siempre es menor a 100%. En casi todos los casos prácticos, T_c es casi la temperatura ambiente, que es unos 300 K. En teoría, una máquina térmica del ciclo de Carnot que funcione a la inversa constituye la bomba térmica más efectiva posible, y determina el máximo coeficiente de operación (COP) para una combinación dada de temperaturas caliente y fría de un reservorio. Por lo tanto se tiene que el máximo COP para una bomba térmica en su modo de calefacción es:

$$COP_c(modo\ de\ calefacción) = \frac{|Q_A|}{W}$$

$$= \frac{|Q_h|}{|Q_h| - |Q_c|} = \frac{1}{1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}} = \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_h}} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

El coeficiente de operación de Carnot para una bomba térmica en el modo de enfriamiento es:

$$COP_c(modo\ de\ enfriamiento) = \frac{T_c}{T_c - T_h} \qquad \text{Ec 2.4}$$

A medida que la diferencia entre las temperaturas de los dos reservorios se aproxima a cero en esta expansión, el COP teórico se aproxima al infinito. En la práctica, la baja temperatura de los serpentines y la alta temperatura en el compresor limitan el COP a valores debajo de 10 (Serway y Jewett, 2005).

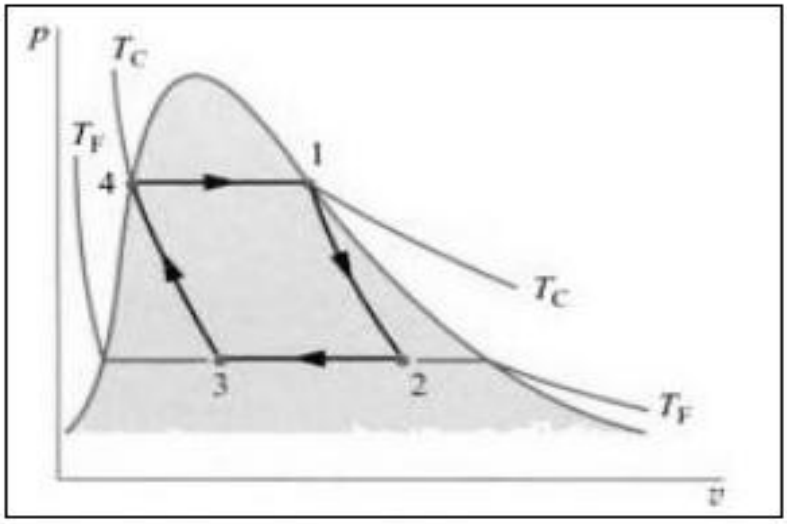

Figura 2.5 Diagrama *p vs v* del Ciclo Carnot (Morán y Shapiro, 2005)

2.2.2.2. Ciclo Otto

El ciclo Otto de aire-estándar es un ciclo ideal que supone que la absorción de calor ocurre instantáneamente mientras que el pistón está en el punto muerto superior. Los diagramas *p-v* y *T-s* del ciclo Otto aparecen representados en la Figura 2.6. El ciclo consta de cuatro procesos internamente reversibles y en serie, los cuales se describen a continuación:

- El proceso 1-2 es una compresión isoentrópica del aire, cuando el pistón evoluciona desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior.
- En el proceso 2-3 el aire absorbe calor a volumen constante, desde una fuente externa, mientras el pistón está en el punto muerto superior. Este proceso representa la ignición de la mezcla aire-combustible y la combustión rápida consiguiente.
- El proceso 3-4 es una expansión isoentrópica (carrera de trabajo).
- El ciclo se completa con el proceso 4-1 a volumen constante, en el cual el aire cede calor mientras el pistón está en el punto muerto inferior.

Como el ciclo Otto de aire-estándar está compuesto por procesos internamente reversibles, las áreas en los diagramas *T-s y p-v* de la Figura 2.6, se interpretan como calor y trabajo, respectivamente. En el diagrama *T-s,* el área 2-3-a-b-2 representa el calor absorbido por unidad de masa y el área 1-4-a-b-1 es el calor cedido por unidad de masa. En el diagrama *p-v*, el área 1-2-a-b-1 representa el trabajo recibido por unidad de masa en el proceso de expansión. El área cerrada de cada figura se puede interpretar como el trabajo neto obtenido o, equivalentemente, como el calor neto intercambiado.

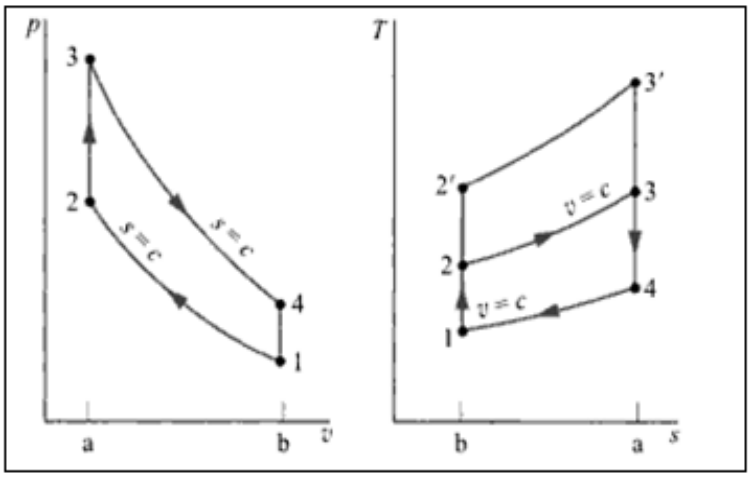

Figura 2.6 Graficas *p vs v* y *T vs s* del ciclo Otto (Morán y Shapiro, 2005)

Como el ciclo Otto de aire-estándar está compuesto por procesos internamente reversibles, las áreas en los diagramas *T-s y p-v* de la Figura 2.6, se interpretan como calor y trabajo, respectivamente. En el diagrama *T-s,* el área 2-3-a-b-2 representa el calor absorbido por unidad de masa y el área 1-4-a-b-1 es el calor cedido por unidad de masa. En el diagrama *p-v*, el área 1-2-a-b-1 representa el

trabajo recibido por unidad de masa en el proceso de expansión. El área cerrada de cada figura se puede interpretar como el trabajo neto obtenido o, equivalentemente, como el calor neto intercambiado.

El ciclo Otto de aire-estándar consta de dos procesos en los que hay trabajo pero no transferencia de calor (procesos 1-2 y 3-4) y dos procesos en los que hay calor transferido pero no trabajo (procesos 2-3 y 4-1). Las expresiones para estas energías transferidas se obtienen del balance de energía para sistemas cerrados, suponiendo despreciables las variaciones de energía cinética y potencial. Los resultados son:

$$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1 \qquad \frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4 \qquad \text{Ec. 2.5}$$

$$\frac{Q_{23}}{m} = u_3 - u_2 \qquad \frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1 \qquad \text{Ec. 2.6}$$

Cuando se analizan estos ciclos es a menudo conveniente considerar todos los calores y trabajos como cantidades positivas. Entonces, $W_{12/m}$ es un número positivo que representa el trabajo que entra durante la compresión y $Q_{41/m}$ es un número positivo que representa el calor cedido en el proceso 4-1. El trabajo neto del ciclo se expresa como:

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{34}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1) \qquad \text{Ec.2.7.}$$

Alternativamente, el trabajo neto puede evaluarse como el calor neto intercambiado:

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} - \frac{Q_{41}}{m} = (u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)$$

que, reordenada, adopta la misma forma que la expresión anterior para el trabajo neto.

El rendimiento térmico es el cociente entre el trabajo neto del ciclo y el calor absorbido

$$\eta = \frac{(u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)}{u_3 - u_2} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2} \qquad \text{Ec.2.8}$$

Cuando se utilizan los datos tabulados del aire para analizar el ciclo Otto de aire-estándar, la energía interna específica necesaria en la Ec.2.8 Se obtiene de las tablas de vapor del presente ciclo.

Para los procesos isoentrópicos 1-2 y 3-4 pueden aplicar las siguientes relaciones

$$v_{r2} = v_{r1}\frac{V_2}{V_1} = \frac{v_{r1}}{r}$$

$$v_{r4} = v_{r3}\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = r v_{r3} \qquad \text{Ec.2.9}$$

Donde *r* es la razón de compresión. Note que $V_3 = V_2$ y $V_4=V_1$, $r=V_1/V_2=V_4/V_3$ (Morán y Shapiro, 2005)

2.2.2.3. Ciclo Brayton

El ciclo Brayton ideal modela el comportamiento de una turbina, como las empleadas en las aeronaves. Este ciclo se define por los cuatro procesos reversibles siguientes los cuales están representados gráficamente en la Figura 2.7:

- 1-2 Compresión adiabática del estado 1 al estado 2.
- 2-3 Adición de calor a presión constante.
- 3-4 Expansión adiabática.
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante para llegar al estado 1.

La Figura 2.7 muestra los diagramas *p-V* y *T-s* de un ciclo Brayton típico, donde los números representan los estados de equilibrio que corresponden a los de la definición del ciclo. El ciclo Brayton se usa con más frecuencia para describir el funcionamiento del motor de una turbina de gas, motor que se ha usado para mover vehículos, como los aviones, por ejemplo, donde su nombre común es motor de reacción, o de turboreacción. También se usa la turbina de gas en aplicaciones estacionarias para generación de electricidad, sea como unidad de reserva para proporcionar energía eléctrica en forma ocasional, o como generador eléctrico continuo (Rolle, 2006).

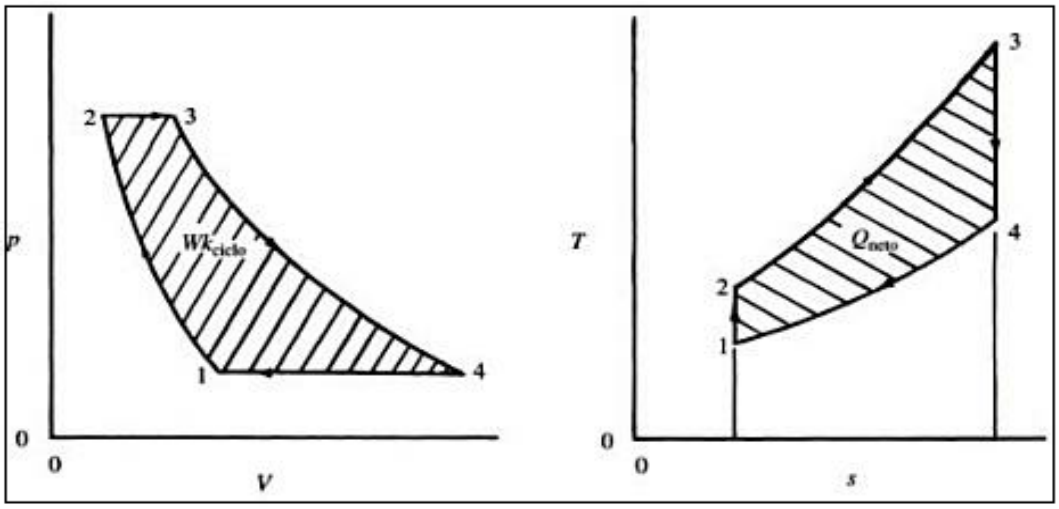

Figura 2.7 Diagramas de propiedades para el ciclo Brayton ideal (Rolle, 2006)

Las anteriores etapas vistas en el comportamiento de una turbina de gas quedarían detalladas de la siguiente forma como se observa en la Figura 2.8:

- *Admisión.* El aire frío y a presión atmosférica entra por la boca de la turbina.
- *Compresor.* El aire es comprimido y dirigido hacia la cámara de combustión mediante un compresor (movido por la turbina). Puesto que esta fase es muy rápida se modela mediante una compresión adiabática. A-B.
- *Cámara de combustión.* En la cámara, el aire es calentado por la combustión del queroseno. Puesto que la cámara está abierta el aire puede expandirse, por lo que el calentamiento se modela como un proceso isóbaro B-C.
- *Turbina.* El aire caliente pasa por la turbina, a la cual mueve. En este paso el aire se expande y se enfría rápidamente, lo que se describe mediante una expansión adiabática C-D.
- *Escape.* Por último el aire enfriado (pero a una temperatura mayor que la inicial) sale al exterior. Técnicamente, este es un ciclo abierto ya que el aire que escapa no es el mismo que entra por la boca de la turbina, pero dado que sí entra en la misma cantidad y a la misma presión, se hace la aproximación de suponer una recirculación.

En este modelo el aire de salida simplemente cede calor al ambiente y vuelve a entrar por la boca ya frío. En el diagrama *PV* esto corresponde a un enfriamiento a presión constante D-A.

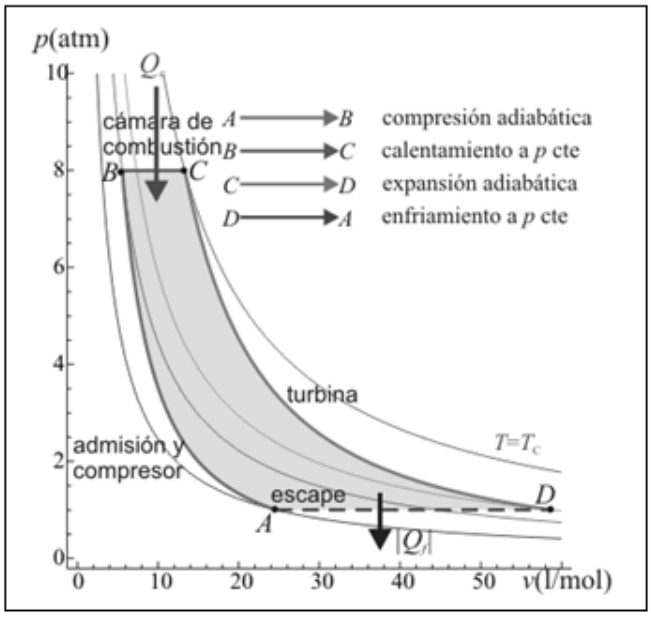

Figura 2.8 Diagrama *p vs v* del Ciclo Brayton (US, 2009)

a) Eficiencia en función del calor

De los cuatro procesos que forman el ciclo cerrado, no se intercambia calor en los procesos adiabáticos A-B y C-D, por definición. Sí se intercambia en los dos procesos isobáros. En la combustión B-C, una cierta cantidad de calor Q_c

(procedente de la energía interna del combustible) se transfiere al aire. Dado que el proceso sucede a presión constante, el calor coincide con el aumento de la entalpía.

$$Q_C = \Delta H = nc_p(T_C - T_B) \qquad \text{Ec. 2.9}$$

El subíndice "c" viene de que este calor se intercambia con un supuesto foco caliente.

En la expulsión de los gases D-A el aire sale a una temperatura mayor que la entrada, liberando posteriormente un calor al ambiente. En el modelo de sistema cerrado, en el que nos imaginamos que es el mismo aire el que se comprime una y otra vez en el motor, modelamos esto como que el calor $|Q_f|$ es liberado en el proceso D-A, por enfriamiento. El valor absoluto viene de que siendo un calor que sale del sistema al ambiente, su signo es negativo. Su valor, análogamente al caso anterior es:

$$|Q_f| = |\Delta H| = nc_p|\Delta T| = nc_p(T_D - T_A) \qquad \text{Ec. 2.10}$$

El subíndice "f" viene de que este calor se cede a un foco frío, que es el ambiente.

b) Trabajo realizado

En este ciclo se realiza trabajo en los cuatro procesos, En dos de ellos el trabajo es positivo y en dos es negativo.

En la compresión de la mezcla A-B, se realiza un trabajo positivo sobre el gas. Al ser un proceso adiabático, todo este trabajo se invierte en incrementar la energía interna, elevando su temperatura:

$$W_{A\to B} = \Delta U - Q = nc_v(T_B - T_A) \qquad \text{Ec. 2.11}$$

En la combustión el gas se expande a presión constante, por lo que el trabajo es igual a la presión por el incremento de volumen, cambiado de signo:

$$W_{B\to C} = -p_B\Delta V_B = -p_B(V_C - V_B) \qquad \text{Ec. 2.12}$$

Este trabajo es negativo, ya que es el aire, al expandirse, el que realiza trabajo. Aplicando la ecuación de los gases ideales y que p_B=p_C , el trabajo se expresa como:

$$W_{B\to C} = p_BV_B - p_CV_C = nR(T_C - T_B) \qquad \text{Ec. 2.13}$$

En la expansión C-D es el aire el que realiza trabajo sobre el pistón. De nuevo este trabajo útil equivale a la variación de la energía interna

$$W_{C\to D} = \Delta U - Q = nc_v\Delta T = nc_v(T_D - T_C) \qquad \text{Ec. 2.14}$$

este trabajo es negativo, por ser el sistema el que lo realiza.

En el enfriamiento en el exterior se tiene una compresión a presión constante:

$$W_{D\to A} = -p_A\Delta V = p_A(V_D - V_A) = nR(T_D - T_A) \qquad \text{Ec. 2.15}$$

El trabajo neto realizado sobre el gas es la suma de los cuatro términos

$$W = nc_v(T_B - T_A) - p_B(V_C - V_B) + nc_V(T_D - T_C) - p_A(V_A - V_D)$$

$$= nc_V(T_B - T_A + T_D - T_C) + nR(T_B - T_C - T_A + T_D)$$

Aplicando la ley de Mayer

$$c_p = c_V + R$$

Este trabajo se puede expresar como

$$W = nc_V(T_B - T_A + T_D - T_C) = -Q_c - Q_f \qquad \text{Ec. 2.16}$$

Por tratarse de un proceso cíclico, la variación de la energía interna es nula al finalizar el ciclo. Esto implica que el calor neto introducido en el sistema es igual al trabajo neto realizado por este, en valor absoluto.

c) Rendimiento

El rendimiento de una máquina térmica se define, en general como la relación entre la energía que se desea obtener de dicha máquina (trabajo realizado) y la energía consumida en su funcionamiento (energía suministrada). En este caso, lo que se obtiene es el trabajo neto útil $|W|$. Lo que se consume es el calor Q_C, que se introduce en la combustión. No se puede restar el calor $|Q_f|$ ya que ese calor se cede al ambiente y no es reutilizado. Por lo tanto;

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_c|}$$

Sustituyendo el trabajo como diferencia de calores

$$\eta = \frac{|Q_c| - |Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} \qquad \text{Ec. 2.17}$$

Esta es la expresión general del rendimiento de una máquina térmica (US, 2009).

2.2.2.4. Ciclo Rankine

El ciclo Rankine es una idealización, y se definirá y comparará con el funcionamiento del ciclo real de una turbina de vapor. Los componentes principales del sistema de ciclo cerrado, caldera o generador de vapor,

condensador, bombas de alimentación de agua y la turbina de vapor, se describirán para mostrar los procesos físicos que corresponden al ciclo Rankine, y para ayudar en su análisis. El ciclo termodinámico que describe con más fidelidad el funcionamiento de la turbina ideal de vapor es el ciclo Rankine, que se define por cuatro procesos reversibles:

- 1-2 Compresión adiabática de líquido (gas).
- 2-3 Adición de calor isobárica para convertir el líquido a vapor.
- 3-4 Expansión adiabática del vapor hasta una presión baja.
- 4-1 Rechazo isobárico de calor para condensar el vapor.

Las Figuras 2.9 muestra los diagramas típicos de propiedades del ciclo Rankine. Obsérvese que en los diagramas de propiedades hay trazada una línea de saturación, que le dará una idea de la relación aproximada del proceso y el cambio de fase del agua, que se presenta “bajo” la línea de saturación (Rolle, 2006).

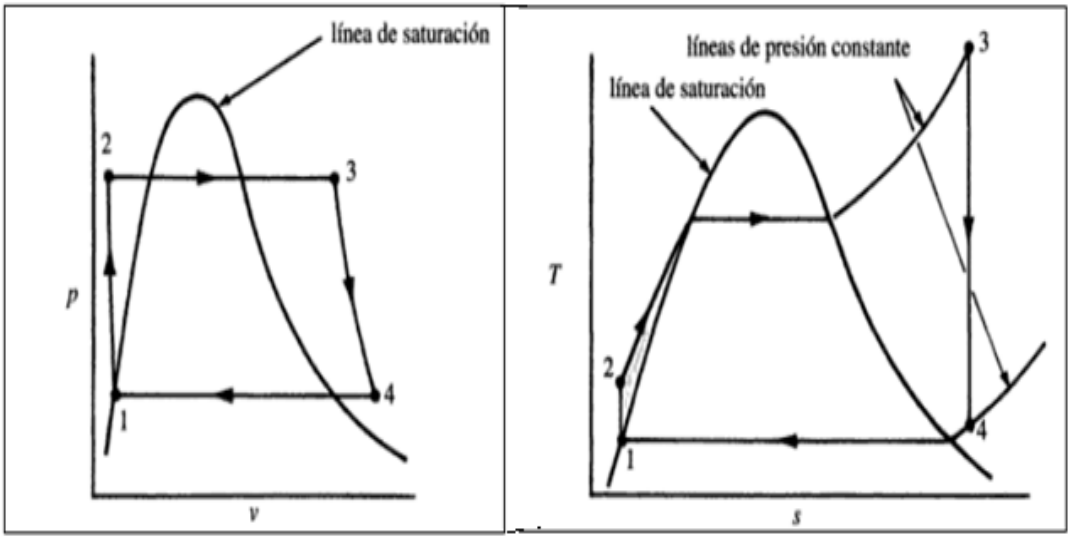

Figura 2.9 Diagramas de presión-volumen y Temperatura-entropía ciclo Rankine (Rolle, 2006)

El ciclo Rankine es utilizado en las centrales térmicas de vapor en específico del subsistema A, mostrado en la Figura 2.10 de la cual se hará una breve explicación de sus componentes. Las principales transferencias de calor y trabajo del subsistema A se ilustran en la Figura 2.11.

a) Turbina

El vapor generado en la caldera en el estado 1, con presión y temperatura elevadas, se expande en el interior a través de la turbina para producir trabajo, descargándose en el condensador en el estado 2 a baja presión. Despreciando el calor transferido al ambiente, los balances de masa y energía en términos de

potencia para el volumen de control de la turbina se reducen en estado estacionario a:

$$\frac{\dot{W}_1}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \qquad \text{Ec. 2.18}$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo másico del fluido de trabajo y $\dot{W}/_{\dot{m}}$ es el trabajo desarrollado por unidad de masa que circula por la turbina.

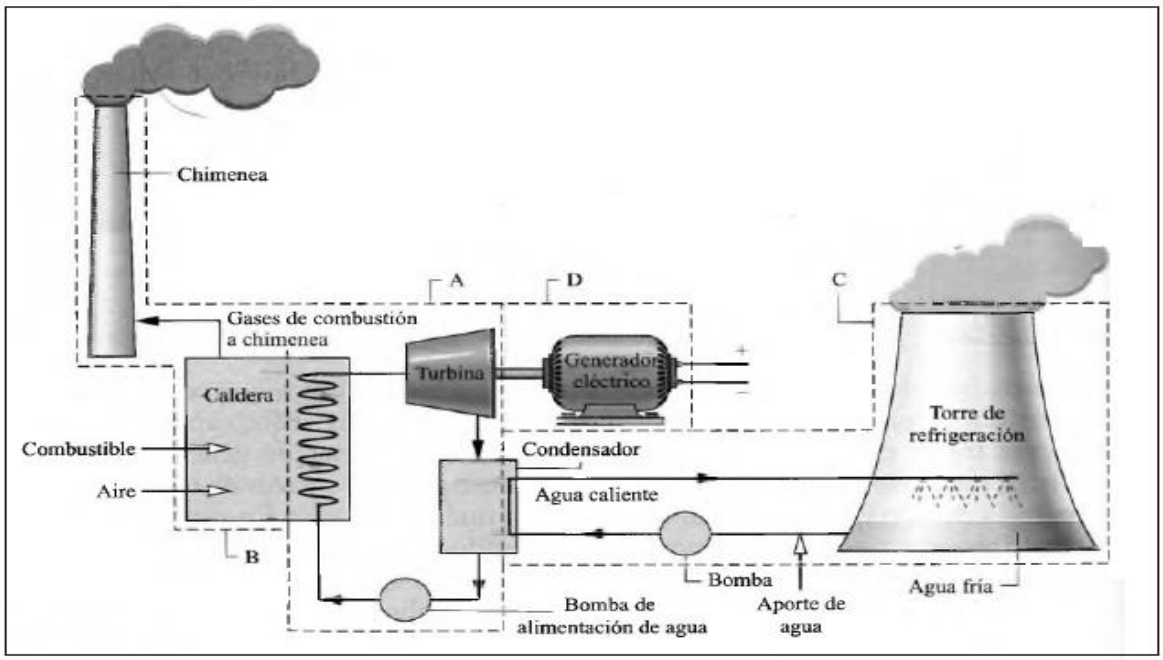

Figura 2.10 Descripción de una central térmica (Morán y Shapiro, 2005)

b) Condensador

En el condensador se transfiere calor del vapor al agua de refrigeración que circula en un flujo separado. El vapor se condensa y la temperatura del agua de refrigeración aumenta. En estado estacionario, los balances de masa y energía para el volumen de control que incluye el lado de condensación del intercambiador de calor da:

$$\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \qquad \text{Ec. 2.19}$$

dónde $\dot{Q}_s/_{\dot{m}}$ es la energía transferida en forma de calor desde el fluido de trabajo al agua de refrigeración, por unidad de masa del fluido de trabajo que atraviesa el condensador. Esta energía transferida es positiva en la dirección de la flecha en la Figura 2.11**.**

c) Bomba

El líquido procedente del condensador en el estado 3 es bombeado desde la presión del condensador hasta la presión más alta de la caldera. Considerando un volumen de control que rodee la bomba y suponiendo que no hay transferencia de calor con el ambiente, los balances de masa y energía quedan de la siguiente forma

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_4 - h_3 \qquad \text{Ec. 2.20}$$

dónde $\dot{W}_b/_{\dot{m}}$ es el trabajo consumido por unidad de masa que circula a través de la bomba. Esta energía transferida es positiva en la dirección de la flecha en la Figura 2.11.

d) Caldera

El fluido de trabajo completa un ciclo cuando el líquido procedente de la bomba en 4, llamado agua de alimentación de la caldera, se calienta hasta la saturación y se evapora en la caldera. Considerando un volumen de control que incluya tubos y elementos de la caldera que llevan el agua de alimentación desde el estado 4 al estado 1, los balances de masa y energía dan como resultado

$$\frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \qquad \text{Ec 2.21}$$

donde $\dot{Q}_c/_{\dot{m}}$ es el flujo de calor transferido por la fuente de energía al fluido de trabajo por unidad de masa que atraviesa la caldera.

e) Parámetros de funcionamiento

El rendimiento térmico indica la cantidad de energía recibida por el fluido de trabajo en la caldera que se convierte en trabajo neto producido. Utilizando las cantidades y expresiones introducidas antes, el rendimiento térmico del ciclo de potencia de la Figura 2.11 es:

$$\eta = \frac{\dot{W}_1/_{\dot{m}} - \dot{W}_b/_{\dot{m}}}{\dot{Q}_c/_{\dot{m}}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

El trabajo neto producido es igual al calor neto intercambiado. Así, el rendimiento térmico puede expresarse alternativamente como

$$\eta = \frac{\dot{Q}_c/_{\dot{m}} - \dot{Q}_S/_{\dot{m}}}{\dot{Q}_c/_{\dot{m}}} = 1 - \frac{\dot{Q}_s/_{\dot{m}}}{\dot{Q}_C/_{\dot{m}}}$$

$$= \left[1 - \frac{(h_2 - h_3)}{(h_1 - h_4)}\right]$$

El consumo específico de combustible es la cantidad de energía que, como flujo de calor absorbido, medido en KJ o Kcal, necesita el ciclo para producir una unidad de trabajo, medido en kW·h. Por tanto, este consumo específico es el valor inverso del rendimiento térmico expresado en las unidades correspondientes, por ejemplo en Kcal/kW·h (Morán y Shapiro, 2005).

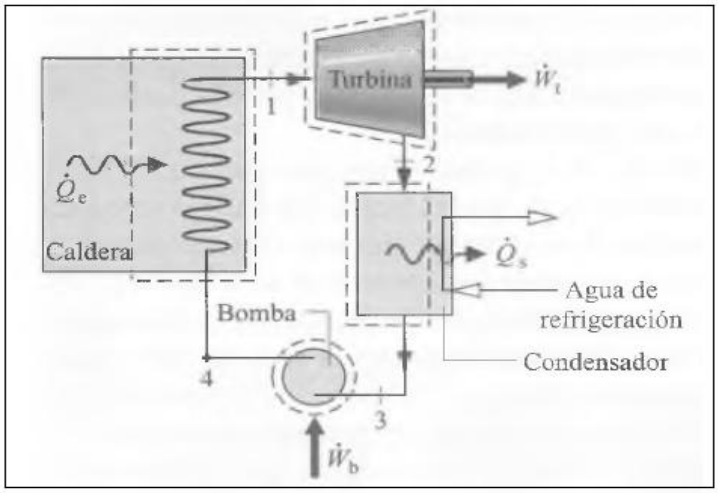

Figura 2.11 Principales transferencias de calor de una central térmica (Morán y Shapiro, 2005)

f) Ciclo Rankine ideal

Si el fluido de trabajo pasa a través de los diversos componentes de un ciclo simple de vapor sin irreversibilidades, no existirán pérdidas de presión por rozamiento en la caldera y el condensador y el fluido de trabajo pasará a través de estos equipos a presión constante. También, en ausencia de irreversibilidades y sin transferencia de calor al entorno, los procesos en la turbina y la bomba serán isoentrópicos. Un ciclo con estas idealizaciones es el ciclo Rankine ideal mostrado en la Figura 2.12.

- Proceso 1-2. Expansión isoentrópica del fluido de trabajo a través de la turbina desde vapor saturado en el estado 1 hasta la presión del condensador.

- Proceso 2-3. Transferencia de calor desde el fluido de trabajo cuando fluye a presión constante por el condensador, siendo líquido saturado hasta el estado 3.
- Proceso 3-4. Compresión isoentrópica en la bomba hasta el estado 4 dentro de la zona de líquido.
- Proceso 4-1. Transferencia de calor hacia el fluido de trabajo cuando circula a presión constante a través de la caldera completándose el ciclo.

El ciclo Rankine ideal tiene también la posibilidad de sobrecalentar el vapor, como en el ciclo 1'-2'-3'-4'-1' (Morán y Shapiro, 2005).

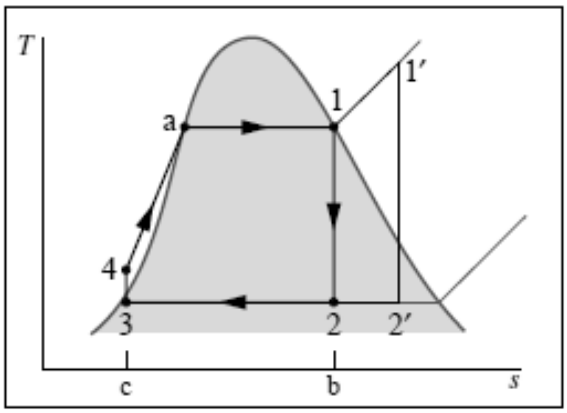

Figura 2.12 Diagrama *T vs s* del ciclo Rankine ideal (Morán y Shapiro 2005)

2.3. Turbina de vapor

Una turbina es una máquina de flujo permanente, en las cuales el vapor entra por las toberas y se expansiona hasta una presión más pequeña. Al hacerlo el chorro de vapor adquiere una gran velocidad. Parte de la energía cinética de este chorro es cedida a los álabes de la turbina (Severns y col., 1973).

2.3.1. Clasificación de las turbinas

Tipos de Turbinas

Las turbinas de vapor pueden ser *axiales o radiales*, según sea la dirección del flujo a su paso por los ductos entre los álabes de la máquina. Las más generalizadas son las de tipo *axial*, en las que el flujo tiene lugar en la dirección del eje de la turbina. En las *radiales*, el flujo sigue la dirección del radio, pudiendo ser hacia adentro o hacia afuera.

Las *turbinas axiales* pueden ser de:

- *Impulso.* En este tipo de turbinas se aprovecha la energía cinética del fluido obtenido en toberas apropiadas.

- *Reacción.* Aquí se utiliza fundamentalmente la energía de presión del fluido, aunque también la cinética.

Las turbinas de vapor se componen de varios pasos, escalonamientos o celdillas, agrupándose en un primer cuerpo de alta presión, los escalonamientos de impulso, y en uno o varios cuerpos de baja presión, los escalonamientos de reacción.

Según sean las aplicaciones las turbinas de vapor se dividen en:

- Condensación: Cuando descargan el vapor húmedo en un *condensador*, a presiones muy bajas.
- Contrapresión: Se lleva a cabo la presión de descarga algunos bares por encima de la presión atmosférica, para emplear el vapor en otros usos.

En ambas pueden realizarse extracciones de vapor a presiones intermedias, para producir recalentamientos y mejorar el título de vapor que realiza la expansión, esto es, operar con vapor de más alta calidad para tener mejores rendimientos y reducir el daño en los álabes.

Las turbinas de vapor pueden ser de alta o baja velocidad, según sirvan para impulsar sistemas mecánicos, compresores, bombas, etc., o sean destinadas a mover alternadores para la generación de energía eléctrica.

Estas últimas suelen girar en un orden de entre 1,500-3,600 rpm, según sea la frecuencia de trabajo y el tamaño de la máquina. Para una potencia determinada, la velocidad y tamaño están en relación.

1. Turbina de Impulso

La turbina de impulso más simple, de fluido compresible, es la llamada De Laval. Consta de un solo rotor provisto de álabes simétricos al que precede una serie de toberas de alimentación del tipo convergente-divergente, que convierten la energía de presión en energía de velocidad, para así tener chorros de vapor de alto poder dinámico que atacan directamente los álabes del rotor y lo hacen girar.

La energía transferida de fluido a máquina, por unidad de masa de fluido, viene dada por la ecuación de Euler

$$w = U_1 V_{u1} - U_2 V_{u2}$$

Como se trata de una máquina axial, $U_1 = U_2 = U$

$$w = U(V_{u1} - V_{u2}) \qquad \text{Ec 2.22}$$

Escalonando la velocidad o la presión pueden lograrse velocidades de giro más bajas, con lo que se reducen los problemas de vibraciones y esfuerzos de acción centrífuga. Así se tienen dos variantes:

- ✓ Escalonamientos de velocidad o tipo Curtis.

- ✓ Escalonamiento de presión o tipo Rateau.

a) Turbina de impulso con escalonamiento de velocidad tipo Curtis

En este tipo de turbinas se trata de aprovechar la energía cinética inicial del vapor en varios pasos, de forma que disminuya la acción dinámica de éste, en forma paulatina, a fin de tener velocidades de giro más bajas, mejorando al mismo tiempo, la transferencia energética.

Como la caída de velocidad es escalonada se tienen acciones más moderadas sobre los álabes, y en consecuencia, velocidades de giro más bajas. Según el número de escalonamientos, las velocidades tangenciales del rotor pueden reducirse cuatro o más veces la velocidad del fluido incidente. Todos los rotores están rígidamente montados sobre el mismo eje.

b) Turbinas de impulso con escalonamiento de presión tipo Rateau

En este tipo de escalonamiento se mantiene constante la presión, con caída de la velocidad. La capacidad de conversión de la energía del fluido en energía en el rotor, es mayor con los escalonamientos de velocidad, lo cual exige menos pasos, y hace más sencilla la construcción. Con escalonamientos de presión se necesitan más pasos para la misma potencia, haciendo más complicado el diseño, pero se pueden lograr mejores rendimientos globales y velocidades de giro menores.

La energía transferida a la máquina en el escalonamiento tipo Rateau, se efectúa siempre en los rotores, los que por tener álabes de acción o impulso absorberán solamente la energía cinética.

2. Turbinas de reacción

En las turbinas de reacción los álabes de los rotores, sobre los que ejerce acción el fluido, son asimétricos. También los álabes de los estatores tienen el mismo perfil, pero invertido, constituyendo verdaderas toberas donde el fluido de trabajo se acelera ganando velocidad a expensas de la presión. En los rotores ceden los gases energía de velocidad y también de presión.

Las velocidades de incidencia del fluido en los álabes del rotor son menores que en el caso de turbinas de impulso. Las velocidades tangenciales serían proporcionalmente menores, por lo que es necesario en los rotores tengan mayor diámetro para mantener la misma velocidad angular. Debido a la caída progresiva de presión los álabes deben ir haciéndose más grandes para lograr acciones equivalentes en los distintos escalonamientos, cuyos rotores van todos montados sobre el mismo eje.

Para un flujo de masa estable, el área de paso debe ir creciendo en virtud del aumento del volumen específico del fluido al reducirse la presión. En efecto, de la ecuación de continuidad

$$\dot{m} = \rho A V = \frac{AV}{v} \qquad \text{Ec 2.23}$$

Donde V representa la velocidad axial y ésta constante, al crecer v (volumen específico) debe aumentar A (área) para poder mantener el flujo de masa.

La energía transferida por unidad de masa puede calcularse por la ecuación 2.22, para una turbina axial, donde el término de acción centrífuga, por ser máquina axial, es nulo, con lo que resulta

$$w = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} - \frac{V_{r2}^2 - V_{r1}^2}{2} \qquad \text{Ec 2.24}$$

en la que el primer término del segundo miembro representa la carga dinámica, y el segundo, la carga estática, esta última debida al cambio en la velocidad relativa del fluido a través del rotor.

2.3.2. Principio de funcionamiento

En una turbina se pueden distinguir dos partes el rotor y estator. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estator, sobre el que se monta el rotor, está compuesto de gran número de toberas. El vapor penetra por un extremo de la turbina y pega contra el primer grupo de álabes móviles. Después de pasar por dicho grupo, el vapor es dirigido por un grupo de toberas fijas y pega contra un segundo grupo de álabes móviles (González, 1996).

De esta forma la entalpía se convierte en energía cinética a medida que el vapor circula por la tobera. En una turbina ideal toda variación de entalpía del vapor aparece en forma de energía cedida al eje. La turbina ideal tiene, por consiguiente, interés al estudiar la velocidad que adquiere el chorro de vapor, su comportamiento y las dimensiones de la tobera (Severns y col, 1973). Como las gotitas condensadas erosionarían gravemente las toberas y los álabes de alta velocidad, las turbinas deben operar en tales condiciones que el vapor expulsado no contenga más de un 5-10% de líquido. Los rotores de todas las etapas están montados sobre un mismo eje y todas las toberas vienen soportadas por un armazón continuo (Watson y col., 1982).

Los diámetros del rotor y el estator son mayores a la salida de la turbina para permitir la expansión del vapor (Figura 2.13) (González, 1996).

Los ciclos de las turbinas de vapor utilizan un fluido que cambia de un estado a otro. Las turbinas de vapor que operan con recalentadores y también con regeneradores son los dispositivos productores de potencia más eficientes disponibles, para grandes demandas de potencia.

Uno de los aspectos más atractivos del ciclo con turbina de vapor es su independencia de la fuente de energía térmica. La turbina de vapor sólo requiere energía para hacer hervir el agua. Esta energía puede provenir de la combustión del carbón, petróleo o gas natural; de los gases de escape a altas temperaturas de alguna otra máquina; de energía solar; o de reactores nucleares. Además de la

unidad generadora de vapor, hay pocas, si es que las hay, alteraciones de diseño necesarias para adaptarse a estas diversas fuentes de calor.

Figura 2.13 Turbina de vapor (RENOVETEC, 2013)

Las tecnologías actuales de los ciclos de turbina de vapor con quemado de carbón alcanzan eficiencias del orden de 30 a 35%. Con el uso de calderas de carbón pulverizado más eficientes, lavadores de gas y otros dispositivos para reducir los óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre, se han alcanzado eficiencias alrededor de 45%, ése parece el límite para la tecnología más avanzada.

La turbina de vapor se ha caracterizado como máquina de velocidad constante, probablemente porque su desempeño más grande ha sido en unidades de grandes potencias. Sin embargo, en unidades pequeñas, la turbina de vapor se puede usar en aplicaciones con velocidad variable, aunque ello no se ha intentado en su potencial (Rolle, 2006)

2.3.2.1. El ciclo Rankine o ciclo básico de la turbina de vapor

El vapor, que sirve de fluido de trabajo en la turbina, se genera por la ebullición de agua en una caldera, a una presión determinada por las condiciones de operación de la propia turbina.

Si se observa la Figura 2.10 en la caldera el agua recibe energía bajo la forma de calor para convertirse en vapor; en el condensador el vapor pierde calor transformándose en líquido; por fin, la bomba recibe trabajo para impulsar el agua en la caldera, con lo que el ciclo se cierra.

Este ciclo está en forma ideal, constituido por cuatro procesos; dos isoentrópicos y dos isobáricos, cuya representación en los diagramas *pv y Ts* se ofrece en la Figura 2.9. Del estado 1 al estado 2 se tiene expansión isoentrópica en la turbina; del 2 al 3, condensación a presión constante; del 3 al 4, comprensión isoentrópica del agua; del 4 al 1 existe primero un calentamiento del agua hasta condiciones de

saturación a la presión de la caldera, seguido de evaporación a la presión de la caldera, presión constante.

a) Rendimiento térmico del ciclo Rankine

El trabajo en el ciclo se compone del trabajo en la turbina *w*, que es positivo, y del trabajo de la bomba de agua, el cual es negativo w_s. El calor entregado al ciclo es el entregado al fluido del trabajo, q_{ent}, luego:

$$n_t = \frac{w_t - w_b}{q_{ent}} \qquad \text{Ec 2.25}$$

El trabajo en la turbina, en el proceso isoentrópico de expansión del vapor, sin cambios sensibles en la energía cinética y potencial, de acuerdo con la 1ª. Ley de la termodinámica aplicada a un sistema abierto de flujo estable, es:

$$w_t = h_1 - h_2 \qquad \text{Ec 2.26}$$

El trabajo en la bomba, es:

$$w_b = h_4 - h_3 \qquad \text{Ec 2.27}$$

En el proceso de toma de calor del fluido a *presión constante:*

$$n_t = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} \qquad \text{Ec 2.28}$$

El cálculo de las entalpías es directo por medio de las tablas de vapor. El trabajo de la bomba puede determinarse en el proceso isoentrópico de compresión del siguiente modo

$$w_b = h_4 - h_3 = \int v dp \approx v_3(p_4 - p_3)$$

ya que la compresión se hace prácticamente a volumen constante, considerando al agua incompresible.

Este trabajo de la bomba es muy pequeño comparado con el de la turbina, del orden de 0.3 a 0.4 por ciento, de forma que puede ser despreciable en la mayor parte de los casos, con lo que el rendimiento en el ciclo queda:

$$n_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4}$$

Como $h_4 = h_3$, se tiene:

$$n_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \qquad \text{Ec 2.29}$$

Esta es una forma sencilla para el cálculo del rendimiento de un ciclo Rankine ideal.

b) Ciclo de vapor con regeneración

Este consiste en trasegar, de uno o varios escalonamientos intermedios, cierta cantidad de vapor, y emplearlo para calentar el agua, producto de la condensación que sale del condensador, con lo cual se alimenta a la caldera. De este modo se *retiene en el ciclo el calor de condensación del vapor trasegado*, evitando su disipación con el agua de enfriamiento en el condensador; se disminuye calor gastado en el ciclo y se mejora su rendimiento térmico del mismo. La potencia de la turbina se reduce, ya que la cantidad de vapor es menor.

Cuando en la turbina se efectúa doble expansión, produciendo extracción con recalentamiento intermedio, se aprovecha parte del vapor extraído, antes de ser recalentado, para propósito de regeneración. Al disminuir la más de vapor que debe recalentarse se tiene una economía de calor. También pueden reducirse las pérdidas de escape si se mantienen las mismas dimensiones en los ductos, ya que al disminuir el gasto se reducirá la velocidad de salida.

c) Expansión real. Rendimiento interno de la turbina

Las pérdidas de energía en la conversión, mientras el fluido pasa a través de la turbina, pueden ser:

- *Pérdidas por fricción* sobre las paredes de los contornos por donde circula el fluido, las cuales son proporcionales al cuadro de velocidad relativa del fluido respecto al contorno, y a la longitud del ducto o canal por donde se mueve el fluido, e inversamente proporcionales al radio hidraúlico de la sección de dicho ducto.
- *Pérdidas por separación* del fluido de los contornos de los álabes o por choques contra éstos, produciéndose turbulencias o vibraciones perjudiciales.
- *Pérdidas por recirculación* del fluido entre el rotor y la carcasa.

Al existir pérdidas se reduce el trabajo útil de conversión, aunque esa energía perdida en las fricciones entre fluidos y contornos y del fluido consigo mismo, se traduce en calor, el cual se transmite al mismo fluido en una máquina aislada. Se tiene así un calor de recalentamiento del fluido que es favorable en la expansión. Pero el proceso no es isoentrópico, sino de entropía creciente como corresponde a un sistema aislado, dando lugar a una caída de entalpía menor en la expansión que la que se tendría en un proceso isoentrópico.

La relación entre las dos caídas de entalpía, real e ideal, o relación de trabajo real e ideal, define el rendimiento interno de la turbina, así

$$n_t = \frac{w_{real}}{w_{ideal}} = \frac{h_1 - h_{2r}}{h_1 - h_{2i}} \qquad \text{Ec 2.30}$$

El rendimiento interno de la turbina viene a ser como la capacidad de la máquina para intercambiar energía con fluido.

Cuando se hacen recalentamientos intermedios, la fricción en la primera expansión disminuye ligeramente el calor de recalentamiento a la salida de la turbina, por escapar el vapor con entalpía más alta.

d) Condensadores

El condensador está constituido por un recinto cerrado de baja presión (35 a 50 mbar) donde se descarga el vapor que sale de la turbina, permitiendo incrementar la gradiente de presión y, por ende, la potencia de la máquina. La baja presión se produce por la condensación del vapor, al reducirse drásticamente su volumen específico. Se debe eliminar el calor liberado en la condensación, y esto se efectúa por medio de agua fría en circulación.

La mayor parte de los condensadores son del tipo llamado de superficie, esto es, intercambiadores de calor con fluidos, caliente (vapor) y frío (agua), independientes. Generalmente se hace circular agua fría por el interior de los tubos del intercambiador, y el vapor descargado por la turbina, por entre la carcasa y los tubos, debido a que el agua puede dejar depósito y resulta más fácil limpiar los tubos por la parte interior. Conviene extraer el aire y los gases no condensables, que vienen con el vapor, por medio de bombas de vacío. Este aire y gases, pueden tener un origen natural en el agua, o entrar en purgadores y juntas de la turbina.

Un condensador de superficie y su equipo auxiliar debe satisfacer las condiciones siguientes:

- ✓ Mínima resistencia al paso de los fluidos.
- ✓ Acertada evacuación del aire, libre de vapor.
- ✓ Recoger el condensado y devolverlo, libre de aire, a la caldera.
- ✓ Circulación del agua de enfriamiento con mínimas energías de sedimentación.

En los condensadores de superficie, los dos fluidos circulan de manera independiente, pudiendo operar con agua tratada en la caldera, para evitar depósitos en la propia caldera, en la turbina, en el condensador y en los demás conductos del ciclo del fluido de trabajo.

2.4. Procesos termoquímicos para transformación de biomasa en energía

La biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono y un elevado contenido de oxígeno y contenidos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo CnHm, y presencia de CO_2, CO y $H_{2)}$ son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad.

Así normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o base húmeda.

En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 3,000 – 3,500 kcal/kg para residuos con composición ligno-celulósicos, los 2,000-2,500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente los 10,000 kcal/kg para combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos.

Desde el punto de vista energético resulta conveniente dividir la biomasa en dos grandes grupos (Figura 2.14).

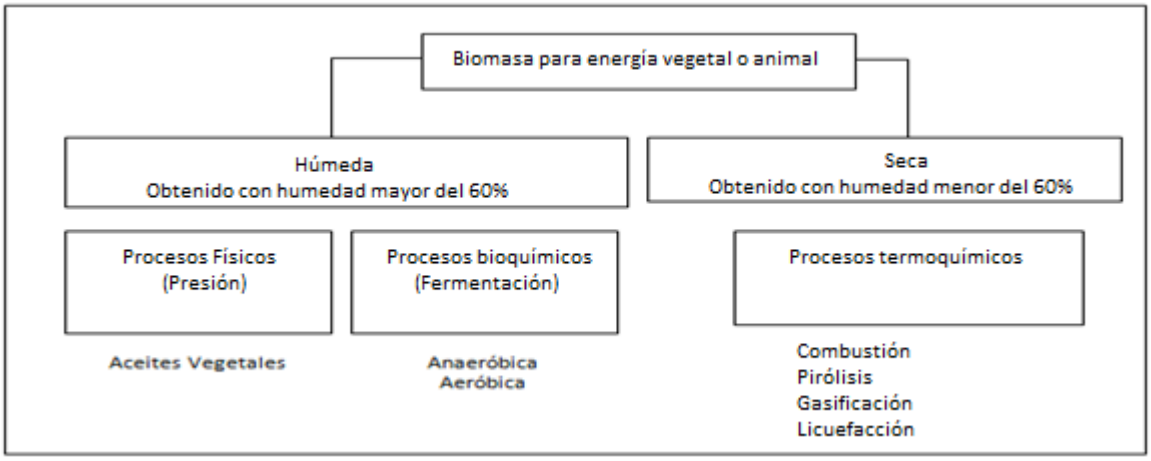

Figura 2.14 Tipos de biomasa (INTI, 2008)

a) **Biomasa seca.** Es aquella que puede obtenerse en forma natural con un tenor de humedad menor al 60% de su contenido, como la leña, paja, etc. Los procesos termoquímicos (Figura 2.15) o fisicoquímicos son los más utilizados para su aprovechamiento energético generalmente de tipo térmico.
b) **Biomasa húmeda.** Se denomina así cuando su porcentaje de humedad supera el 60% como lo son los restos vegetales, residuos animales, vegetación acuática, etc. Y son aprovechados principalmente mediante procesos Químicos (INTI, 2008).

2.4.1. Gasificación

La gasificación es un proceso en el que se convierte, mediante oxidación parcial a temperatura elevada, una materia prima (generalmente sólida) en un gas con un moderado poder calorífico. Normalmente se trabaja con un 25-30% del oxígeno necesario para la oxidación completa.

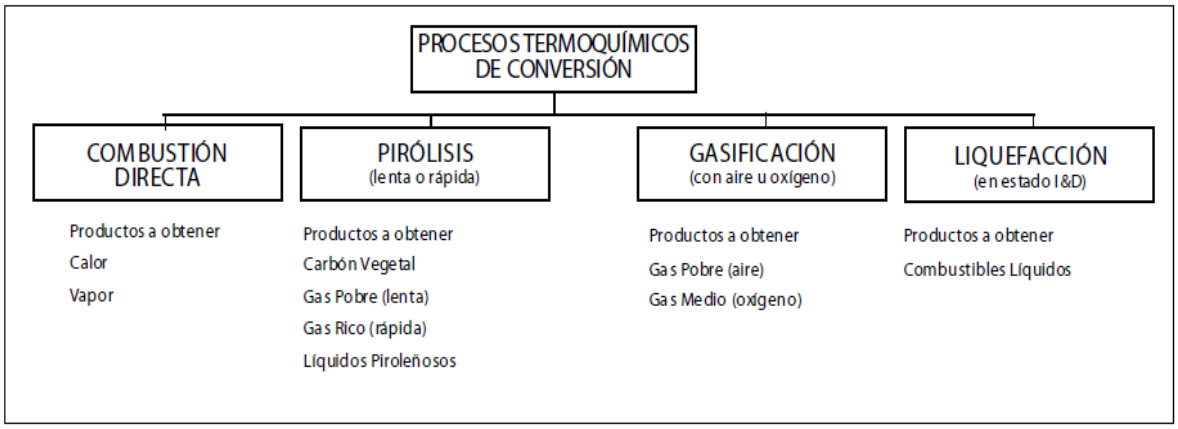

Figura 2.15 Procesos de transformación de la biomasa en energía (INTI, 2008)

En la gasificación, la energía química contenida en el sólido se convierte en energía química contenida en un gas. Las cenizas pueden considerarse un residuo o bien valorizarse, usándolas como material de construcción o como fertilizante, fabricación de vidrio, etc. Si la materia prima es un residuo orgánico con un bajo contenido en cenizas y estas no son aprovechables, se habrá conseguido, en cualquier caso de minimizar considerablemente el volumen de residuo al tiempo que se inertiza y se aprovecha su contenido energético.

La gasificación es una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los residuos sólidos y recuperar su energía, convirtiéndose en una de las vías más adecuadas a mediano y largo plazo para la obtención de energía en el marco de desarrollo sostenible.

Por su origen, los residuos orgánicos se pueden clasificar según:

- Agrícolas: Incluyen un amplia gama de materiales lignocelulósicos generados por el sector agroalimentario.
- Forestales: Incluye madera procedente de la limpieza de bosques, aserraderos y otras industrias de transformación de la madera.
- Industriales: Proceden generalmente de embalajes y palets, que se generan en grandes cantidades.
- Urbanos: Los residuos sólidos urbanos (RSU) también pueden gasificarse si se elimina previamente el vidrio y los metales. El denominado RDF (Refuse Derived Fuel) es el combustible resultante del RSU.
- Mixto: Fangos de depuradora, neumáticos, otros residuos de automóvil y madera procedente de la construcción y demolición de edificios.

2.4.1.1. Evolución de la gasificación

La gasificación es una vieja tecnología con grandes perspectivas de futuro. Desde sus orígenes, se han introducido sustanciales mejoras, convirtiéndola en una

tecnología económicamente más competitiva, térmicamente más eficiente y más respetuosa con el medio ambiente.

Los primeros gasificadores de carbón fueron construidos en Alemania por Bischof 1839, y por Siemens 1861. A principios del siglo XX, la tecnología de los gasificadores había avanzado hasta el punto de que podían gasificarse cualquier tipo de residuos lignocelulósicos, como pepitas de aceitunas, paja y cáscaras de nueces. Estos primeros gasificadores se utilizaron principalmente para proporcionar combustibles a motores de combustión interna fijos para la molienda y otros usos agrícolas.

La utilización de la gasificación para producción de gas en las ciudades para la automoción prácticamente ha desaparecido en la medida que otras fuentes de energía, como el petróleo o el gas natural, han satisfecho esta demanda de forma más ventajosa y económica. La aparición de regulaciones medioambientales cada vez más restrictivas, junto con las presiones y oportunidades para el uso eficiente de fuentes energéticas de bajo coste está promoviendo en la actualidad la investigación y el desarrollo de soluciones tecnológicas apropiadas. Estos avances tecnológicos son los que impulsarán el proceso de la gasificación hacia más altas cotas de aplicación durante el siglo XXI.

A finales del siglo XX, la gasificación se había desplegado ampliamente por todo el mundo. En 1999 existían 128 plantas, con 366 gasificadores en operación. La mayoría de estas instalaciones se encontraban en Europa Occidental, el Pacífico Oriental, África y Norteamérica. Combinadas, estas plantas generaban 42,000 MWth de gas de síntesis.

Comparada con los sistemas de combustión, la gasificación es una tecnología de mayor eficiencia y menor impacto ambiental cuando se trata de producir electricidad a bajo coste a partir de materiales sólidos y puede llegar a aproximarse a la producción de electricidad en ciclo combinado a partir de gas natural. Se puede llegar a conseguir una mayor eficiencia si se integra con el uso de pilas de combustible y otras tecnologías avanzadas. La mayor eficiencia en la producción de electricidad repercute en la disminución de costes de operación y menor producción de dióxido de carbono. Adicionalmente, el proceso de gasificación puede ser adaptado incorporando tecnologías avanzadas para la concentración de CO_2 con un reducido impacto en los costes y la eficiencia térmica. Las plantas de gasificación también pueden configurarse, si es necesario, para alcanzar un nivel cero de emisiones.

Las cenizas y escorias obtenidas como subproducto de la gasificación también han demostrado no ser tan peligrosos. Las cenizas pueden depositarse en vertedero sin costes añadidos de tratamiento o bien pueden usarse como materiales de construcción o ser procesados posteriormente para obtener productos de valor añadido.

La composición del gas depende tanto de la composición del sólido gasificado como de las condiciones de operación del gasificador. La Tabla 2.4 reproduce

algunos ejemplos de composición del gas obtenido en el proceso de gasificación. Como se observa en la tabla se indica como en el carbón se precisa añadir vapor de agua junto con el oxígeno, mientras que residuos húmedos como los lignocelulósicos o los RSU no lo requieren. Se observa también que el carbón se gasifica a mayores temperaturas.

La gasificación con aire produce un gas pobre con un poder calorífico superior entre 4 y 7 MJ/Nm^3 (950 a 1,600 kcal/Nm^3) susceptible de ser quemado en un generador de vapor, en un motor de combustión interna o en una turbina. La gasificación con oxígeno produce un gas de mejor calidad, con un poder calorífico superior entre 10 y 18 MJ/Nm^3 (2,400 a 4,300 kcal/Nm^3).

Tabla 2.4 Gases obtenidos en el proceso de gasificación (Castells, 2005)

Materia prima	Biomasa residual carbón/coque	Residuos lignocelulósicos	Carbón	RSU
Agente oxidante	Aire + vapor	Aire	Oxígeno + vapor	Aire
Temperatura, °C	850		1,200	800
Presión, bar	20	Atmosférica	25	10.7
CO, %vol.	8 – 15	13 – 25	20	14.6
CO_2, %vol.	13 - 18	8 – 19	30	2.3
CH_4, %vol.	4 – 8	0.25 – 2.5	10	4.6
H_2, %vol.	8 – 12	10 – 22	39	15.2
H_2O, %vol.	7 – 15			1,290
PCS (kcal/Nm^3)		1,000 – 1,300	2,750	
PCI (kacal/Nm^3)	950 - 1400		2,470	

En el proceso de gasificación de biomasa o de residuos orgánicos (Figura 2.16) tienen lugar tres etapas: secado (evaporación de la humedad contenida en el sólido), pirólisis (descomposición térmica en ausencia de oxígeno) y gasificación (oxidación parcial de los productos de la pirólisis).

El principal motivo para la existencia de un rendimiento de gasificación es que el proceso descrito (Figura 2.16) es endotérmico siendo necesario para aportar energía. Esto puede realizarse en dos formas: mediante una fuente externa o por medio de la combustión de una parte del sólido a gasificar. Está última alternativa, que es la más utilizada industrialmente, requiere un control cuidadoso de la relación sólido/aire (u oxígeno). En este caso, tienen lugar, dentro del gasificador, una serie de reacciones endotérmicas y exotérmicas. Si el proceso está correctamente controlado (a temperatura constante) el calor aportado por las

reacciones exotérmicas (combustión) compensa el calor absorbido por las reacciones endotérmicas. Se dice entonces que el proceso es autotérmico.

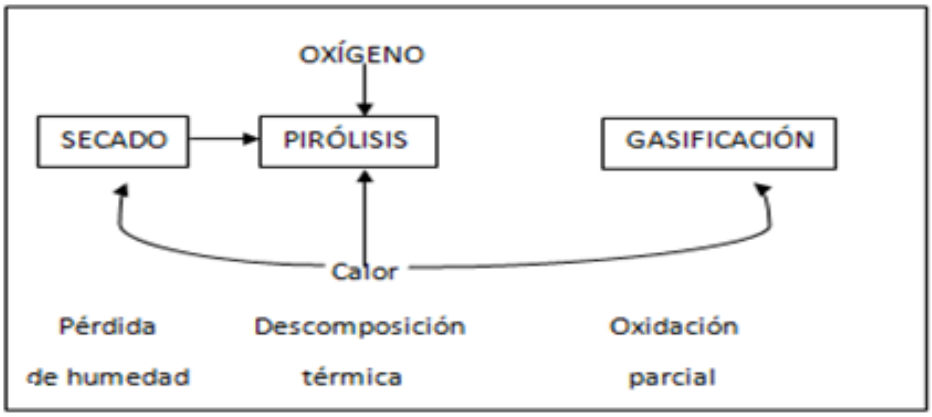

Figura 2.16 Etapas del proceso de gasificación de residuos (Castells, 2005)

2.4.2. Tipos de gasificadores

1. **De lecho descendente o fijo**

Aplicados al carbón, se pueden usar tanto con aire como con oxígeno y vapor de agua, que son introducidos en la parte inferior en contracorriente con el sólido que se alimenta por la parte superior del gasificador. La extracción de ceniza se lleva a cabo por la parte interior del lecho. El sólido requiere un troceado y un cribado previo para evitar la alimentación de partículas demasiado finas que pudieran ser arrastrados por la corriente gaseosa.

2. **De lecho fluidizado**

El sólido se alimenta con un tamaño más fino que en el caso anterior, inyectándose el agente gasificante por la parte inferior. La reacción tiene lugar con el sólido suspendido en la corriente gaseosa, lo que facilita el contacto entre ambas fases. La extracción de cenizas suele hacerse por el fondo.

3. **De corriente de arrastre**

El sólido finamente pulverizado es introducido en el reactor donde una corriente gaseosa lo arrastra, produciéndose la gasificación de modo casi instantáneo. La temperatura de reacción es elevada, lo que evita la formación de impurezas en el gas. La escoria fundida suele extraerse por la parte inferior.

4. **De baño fundido**

La reacción tiene lugar en un baño de sales fundidas que aportan el calor necesario para mantener la reacción endotérmica.

5. Rotatorios

El sólido troceado es alimentado por un extremo del gasificador, mientras el aire (con o sin vapor) se introduce en el extremo contrario por la parte inferior, de tal manera que reacciona en contracorriente, encontrándose el sólido con las cuatro zonas siguientes respectivamente: secado, precalentado, desvolatilización y combustión/gasificación, alcanzándose en esta zona temperaturas superiores a 1,350°C. Las escorias se descargan por el extremo contrario al de carga de sólido. Debido a la baja temperatura de salida de gases, el rendimiento térmico es bueno, pero se producen alquitranes y aceites por destilación de sólido.

2.4.2.1. La gasificación aplicada a la biomasa

Los procesos más habituales de transformación de la biomasa para una posterior utilización del combustible en la generación de electricidad o cogeneración termoeléctrica son la combustión, la gasificación y la pirólisis. De los tres procesos descritos para la valoración energética de la biomasa, la gasificación es la que aporta mayores ventajas que a continuación se describen:

a) El volumen de gases producidos en la gasificación es mucho menor y la concentración de contaminantes menor, con lo cual los sistemas de depuración son más pequeños y actúan de forma más eficiente.
b) Con la gasificación se obtiene un combustible que puede ser empleado en una amplia variedad de aplicaciones con equipos convencionales diseñados para gases combustibles debidamente adaptado, de manera que es posible transportarlo a una cierta distancia del lugar de generación.
c) Si el objetivo es producir electricidad y vapor, el rendimiento termodinámico global utilizando un gas sintético, que se expanda en motores térmicos tras una combustión y aproveche la energía sobrante en los gases calientes para producir vapor, es muy superior en la gasificación que en la combustión.

2.4.3. Pirólisis

La pirólisis es la descomposición térmica de la materia orgánica, como la presente en los residuos, en ausencia de oxígeno. Si el proceso es auto térmico, se introduce oxígeno con el fin de producir combustión parcial que aporte calor al proceso. Los compuestos basados en carbono contenidos en el residuo se descompone dando gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso o char (coque). Si bien este fenómeno fisicoquímico constituye una etapa previa a la combustión o a la gasificación, también se encuentra como proceso industrial. Los productos de pirolisis se aprovechan de muy diferentes maneras.

La pirólisis se divide en los siguientes dos grupos:

- *Sistemas alotérmicos.* La transmisión del calor se lleva a cabo por conducción y radiación de las paredes, o sea indirecto. La fuente de energía suele ser la combustión de parte de los gases producidos o bien del

propio char. Existe algún proceso en el que la aportación de calor se realiza mediante introducción de sólido inerte precalentado en otro dispositivo.

- *Sistemas autotérmicos.* La energía la proporciona la combustión de parte de la carga. También se llaman procesos de calentamiento directo.

Los procesos de pirólisis pueden encuadrarse en tres grandes bloques; pirólisis convencional, pirólisis rápida y pirolisis instantánea. La Tabla 2.5 reproduce las principales características de los diversos tipos de pirólisis generados a baja temperatura.

Tabla 2.5 Procesos de pirólisis (Castells, 2005)

Proceso	Temperatura °C/s	Velocidad de calentamiento °C/s	Tiempo de residencia	Producto mayoritario
Convencional	500	2	Gases Sólidos 5s	Char y condensables
Rápido	400 a 800	>2	Gases <2s	A temperaturas moderadas, 500 °C, condensables
Instantáneo	>600	>200	Gases <0.5s	Gases e hidrocarburos ligeros

1. Procesos de calentamiento indirecto (alotérmicos)

En ellos la pirólisis se lleva a cabo, en ausencia de aire, sobre un material para transformarlo en otros productos más fáciles de tratar. Así pues la pirólisis, como la gasificación no deberían catalogarse de tratamiento final sino una etapa intermedia. A la temperatura a la que se realizan los procesos convencionales, 500 a 600 °C, los productos de la pirólisis son un residuo sólido y otra fracción gaseosa que arrastra, en función de la naturaleza del material pirolizado y de las condiciones de proceso, diferentes especies y concentraciones de vapores condensables (como los aceites pirolíticos) e incondensables (como el metano o el amoniaco)

Al final del proceso de pirólisis, los residuos se separan en fracciones que, eventualmente, deberán ser tratadas o valorizadas. En esta etapa es donde aparecen diferencias importantes entre los diversos procesos industriales, ya que unos optan por enfriar los gases, lavarlos y condensar los aceites y alquitranes para su posterior uso como combustibles o materia prima, mientras otros se inclinad por la combustión inmediata de los gases. En cuanto al tratamiento/utilización del sólido también existen diferencias entre procesos.

Algunas particularidades a resaltar son las siguientes:

- Debido a la alta temperatura, la materia orgánica se degrada y se convierte en gases más o menos ligeros.

- En los procesos discontinuos, o en aquellos en los que el sólido avanza a lo largo de un tambor u horno rotatorio, a medida que aumenta la temperatura se incrementa la cantidad de CO_2 y CO (al ser un proceso exento de oxígeno, los óxidos de carbono se formarán a través del oxígeno contenido en el combustible). Durante la fase central de gasificación (250 a 4000 °C) se sintetiza metano y otros hidrocarburos ligeros. A la vez también se forman cloruro de hidrógeno (HCl) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).
- El sistema permite una corrección *in situ* de la generación de los ácidos en los gases. En el propio reactor se puede añadir cal. De esta manera el HCl y HF (fosfato de hidrógeno) pasan a la forma de cloruros y desprenden agua. Los SO_x pasan a la forma de sulfato. Todo ello se transfiere al residuo carbonoso, donde suele ser más fácil el tratamiento final.
- Los contaminantes tóxicos, los metales pesados, son íntegramente transferidos al residuo carbonoso. La hipotética presencia de compuestos tóxicos halogenados: dioxinas y furanos se destruirán en la vitrificación, o en el posterior tratamiento de oxidación de los gases de síntesis, por cuanto la temperatura es superior a 1,200 °C y el tiempo de residencia de los gases supera los dos segundos.
- Desde la perspectiva de operabilidad la pirólisis es una tecnología versátil ya que permite tanto el tratamiento de RSU como residuos industriales como lodos procedentes de aguas residuales.

En la Tabla 2.6 se destacan las ventajas y desventajas de la pirólisis.

Tabla 2.6 Ventajas y desventajas de la pirólisis (Castells, 2005).

Ventajas	Desventajas
Baja emisión de partículas. Los gases de síntesis son fáciles de usar. Posibilidad de aplicación a tratamientos de suelos contaminados	Parte del residuo original se transforma en una sustancia sólida carbonosa (char) de difícil reutilización. El char debe enfriarse rápidamente a la salida del reactor de pirolisis para evitar su inflamación espontánea al entrar en contacto con el oxígeno del aire.

2. Procesos autotérmicos

En estos se inyecta una gran cantidad de aire que facilita varias cosas:

- Aumenta la temperatura en el interior del reactor con lo cual la formación de gases es mucho mayor y sucesivamente la cantidad de char es menor.
- La eficacia térmica del sistema es más elevada.

Las diferencias básicas entre los sistemas directos e indirectos radican en el funcionamiento del reactor (Tabla 2.7).

Tabla 2.7 Comparación de los procesos de pirólisis convencional alotérmicos y autotérmicos (Castells, 2005)

Calentamiento DIRECTO	Calentamiento INDIRECTO
-Mejor eficiencia de la transmisión de calor. -No se puede independizar la temperatura de pirólisis de la combustión. -Los gases de pirólisis y de combustión, se mezclan. -El revestimiento interno se ha de diseñar para 1,250 °C. -El reactor de metal no presenta gran dilatación térmica.	-Se precisan intercambiadores de calor. -Las temperaturas de pirolisis se respetan. -Los volátiles y vapores se independizan. -Mejor para la futura valorización. -Las paredes no se pueden aislar. La máxima temperatura de pared es, aproximadamente, 750 °C.

2.4.2.1. Pirólisis de biomasa para generación de electricidad

La posibilidad de que la pirólisis pueda competir en el futuro en este campo dependerá de factores económicos y estratégicos, actualmente el mayor freno para su implantación es la poca madurez (relativa) de las tecnologías de pirólisis frente a otras más desarrolladas y probadas como la combustión y la gasificación. En el proceso de pirólisis, la biomasa se convierte en gases, líquidos y char. El proceso se puede configurar para obtener principalmente aceites pirolíticos que pueden usarse en una turbina integrada en un ciclo combinado. La ventaja de obtener un combustible líquido radica en que se puede separar la producción de este de la unidad de generación de electricidad. Existen en la actualidad procesos técnicamente avanzados y/o a escala comercial. Aparte de las incertezas propias de una tecnología emergente, existen algunas áreas que precisan de mayor investigación, como son la estabilidad de los aceites y la reducción de contenidos alcalinos en los mismos.

Estudios económicos recientemente muestran que la pirólisis integrada en ciclo combinado. Los costes unitarios de producción de electricidad pueden llegar a ser comparables a los otros procesos convencionales en el rango de 1 a 5 MWe, siendo más ventajosos para precios altos de la biomasa.

2.5. Incineración

Se llama incineración a cualquier proceso para reducir el volumen y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido o gaseoso, mediante oxidación térmica, en la cual todos los factores de combustión como la temperatura, el tiempo de retención y la turbulencia, pueden ser controlados, a fin de alcanzar la eficiencia, eficacia y los parámetros ambientales

previamente establecidos. En esta definición se incluye la pirólisis, la gasificación y el plasma, cuando los subproductos combustibles generados en estos procesos sean sometidos a combustión en un ambiente rico en oxígeno (SEMARNAT, 2004).

Básicamente, la incineración de residuos es la oxidación de las materias combustibles contenidas en el residuo. Los residuos suelen ser materiales muy heterogéneos, consistentes esencialmente en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. Durante la incineración, se crean gases de combustión que contienen la mayoría en forma de energía de combustión disponible en forma de calor. Las sustancias orgánicas de los residuos se queman al alcanzar la temperatura de ignición necesaria y entrar en contacto con oxígeno. El proceso de combustión en sí se produce en la fase gaseosa en fracciones de segundo y libera energía de forma simultánea. Cuando el valor calorífico del residuo y el suministro de oxígeno es suficiente, esto puede producir una reacción térmica en cadena y combustión autoalimentada, es decir, que no requiere la adición de otros combustibles.

Las principales etapas del proceso de incineración son:

1. **Secado y desgasado.** Aquí se desprende el contenido volátil (como hidrocarburos y agua) a temperaturas generalmente entre 100 y 300 °C.
2. **Pirólisis y gasificación.** La pirólisis es la descomposición posterior de las sustancias orgánicas en ausencia de un agente oxidante a unos 250-700 °C. La gasificación de los residuos carbonados es la reacción de los residuos con vapor de agua y CO_2 a temperaturas que normalmente están entre 500 y 1,000 °C, pero puede producirse a temperaturas de hasta 1,600 °C. Con ello se transfiere materia orgánica sólida a la fase gaseosa. Además de la temperatura, esta reacción se ve apoyada por agua, vapor y oxígeno.
3. **Oxidación.** Los gases combustibles creados en las etapas anteriores se oxidan, según el método de incineración seleccionado, a temperaturas de gases de combustión que generalmente están entre 800 y 1,450 °C.

En estas etapas individuales generalmente se superponen, lo que significa que la separación espacial y temporal de estas etapas durante la incineración de residuos sólo puede ser posible en un grado limitado. De hecho, los procesos tienen lugar precisamente en paralelo y se influyen entre sí. No obstante, es posible, utilizando medidas técnicas en el interior del horno, influir sobre estos procesos con el fin de reducir las emisiones contaminantes. Tales medidas incluyen el diseño del horno, la distribución del aire y técnicas de control (IPPC, 2006)

Aunque los enfoques varían mucho, el sector de incineración puede dividirse aproximadamente en los siguientes subsectores principales:

a) Incineración de residuos urbanos mixtos: Normalmente tratan basuras y residuos domésticos mixtos y generalmente sin tratar, pero en ocasiones

pueden incluirse ciertos residuos industriales y comerciales (los residuos industriales y comerciales se incineran también por separado en incineradores específicos de residuos no peligroso industriales comerciales).

b) Incineración de residuos urbanos u otros residuos pretratados: Instalaciones que tratan residuos que han sido selectivamente recogidos, pretratrados o preparados de algún modo, de modo que las características de los residuos difieren de los residuos mixtos. Los incineradores de combustibles derivados de desechos específicamente preparados entrar en este subsector.
c) Incineración de residuos peligroso: Incluye la incineración en plantas industriales y la incineración en plantas comerciales.
d) Incineración de lodos de alcantarillado: En algunos lugares, los lodos de alcantarillado se incineran separadamente de otros residuos en instalaciones específicas, otros dichos residuos se combinan con otros (basuras municipales) para su incineración.
e) Incineración de residuos clínicos: Existen instalaciones específicas para el tratamiento de residuos clínicos, normalmente los procedentes de hospitales y otras instalaciones sanitarias, en forma de instalaciones centralizadas o en las dependencias de los distintos hospitales, etc. En algunos casos, determinados residuos clínicos se tratan en otras instalaciones, por ejemplo con residuos urbanos mixtos o residuos peligrosos (IPPC, 2006).

2.5.1. Tipos de incineradores

La variedad de hornos y sistemas de incineradores es casi tan extensa como la cantidad de residuos.

Para clasificar y sistematizar la gran variedad de modelos, la Tabla 2.8 hace una clasificación, atendiendo a la naturaleza física del residuo más habitual (gas, líquido o sólido) indicando unos ejemplos representativos de residuos más adecuados para ser incinerados en cada tipo de horno, así como una breve anotación sobre la calidad y la necesidad, o no, de postratamiento de las emisiones.

En primer lugar hay que indicar que no es correcto hablar de incineración de gases. Los gases se oxidan, pero no se incineran. La segunda observación previa es que esta clasificación, en particular la columna correspodiente a las características de las emisiones gaseosas se ha establecido el margen de las prescripciones que marcan las normas de emisión de las incineradoras actuales en Europa, por tanto las indicaciones son puramente orientativas.

Tabla 2.8 Clasificación de los hornos de incineración (Catells, 2005)

Clase	Naturaleza física de los residuos	Residuos típicos	Características de las emisiones gaseosas
I	Gas/líquido	Aire contaminado con disolventes Gas de vertedero	Normalmente no se requiere tratamiento
II	Gas/líquido/sólido	PCB's Pesticidas clorados Gases no condesables H_2, SH_2	Gases ácidos. Se deben lavar y neutralizar
III	Gas/líquido/sólido	Nitratos orgánicos Trinitrotuleno (TNT) Ácido cianhídrico (CNH)	Presencia abundante de NO_x
IV	Gas/líquido	Sales orgánicas Aguas saladas ($ClNa$, NO_3Na,..) Residuos con catalizadores	Gases especiales
V	Sólidos	Residuos infecciosos Residuos industriales	Gases especiales. Partículas

1. Incineradores clase I

Este tipo de incineradores trata generalmente residuos gaseosos y/o líquidos. Los residuos contienen sólo compuestos orgánicos tales, que los gases de combustión no precisan tratamiento posterior alguno. Se pueden distinguir en las siguientes subcategorías:

- **Tipo I.** Consiste en una cámara de combustión donde hay un quemador para el combustible auxiliar y otro para elevar la temperatura en el momento de la introducción del residuo. La chimenea suele ser de tiro natural o, a veces, forzado, donde se instala el sistema de control. Para la protección de los elementos metálicos tanto la cámara como la chimenea se hallan recubiertos de una capa de refractario cuya calidad depende de la naturaleza del residuo y sobre todo de la temperatura.
- **Tipo II.** En este tipo se incorpora un intercambiador de calor a la salida de gases que suele utilizarse para el precalentamiento del aire de combustión. Ello conduce a una fuerte reducción del combustible auxiliar.

El precalentamiento del aire de combustión solo tiene sentido cuando se prevé una incineración complicada.

- **Tipo III.** Presenta una incorporación de caldera de vapor a los equipamientos básico del tipo I.
- **Tipo IV.** Se adhiere un intercambiador de calor para el precalentamiento del comburente. El sistema permite producir vapor de alta presión puesto que los gases de escape abandonan la caldera a una temperatura superior a los 230°C.
- **Tipo V.** En este tipo se hace una ligera depresión en la chimenea impide la salida de contaminantes. Además permite diseñar el sistema de recuperación que se precise, el resto de gases sobrantes se emite a la atmósfera.

2. Incineradores clase II

Este tipo de incineradores se caracterizan porque admiten la presencia de ácidos en los gases efluentes, procedentes de los residuos. La cantidad es tal que precisan neutralización, con sosa o cal antes de la emisión. Por los sistemas empleados los NO_x generados deben ser reducidos para no causar problemas. Se clasifican en:

- **Tipo I.** El sistema de incineración consiste en una cámara de combustión, un enfriamiento rápido de gases (*quench*), lavado (*scrubber*), chimenea de tiro forzado y sistemas de control. La cámara de combustión tiene un revestimiento de refractario, el *quench* y el *scrubber* de plástico o goma resistente al ataque ácido
- **Tipo II.** Cuando el residuo a tratar posee un alto PCI (alquitranes, por ejemplo) es posible usar instalaciones de recuperación de calor, como la caldera de vapor, a la salida de la caldera suele usarse una torre de enfriamiento que a su vez sea de lavado.

3. Incineradores clase III

Se usan cuando se genera una gran cantidad de NO_x en la combustión. La primer causa de formación de NO_x es la reacción del nitrógeno del residuo con el oxígeno comburente, la segunda vía es la alta temperatura. La combustión de amoniaco (NH_3) o ácido cianhídrico (CNH) son algunos ejemplos. Al trabajar con temperaturas tan altas todo el nitrógeno pasa a la forma de NO_x que después del enfriamiento es emitido como NO_2.Esta clase de incineradores se divide en:

- **Tipo I.** El sistema consiste en una cámara de combustión, equipada con un quemador de baja emisión de NO_x, chimenea de tiro forzado y sistemas de control. Este tipo de hornos pueden incinerar líquidos y sólidos.
- **Tipo II.** Se incorpora un intercambiador de calor a la salida de los gases, normalmente una caldera, en general el diseño del quemador es el factor más importante para la reducción de NO_x, ya que si la llama es corta la pérdida de carga es alta y si la temperatura es alta el NO_x es alto.

- **Tipo III.** Se emplea cuando la producción de NO_x es muy elevada, para tratar el problema de los gases, a la salida de la primera cámara de combustión se enfrían y se someten a otra combustión, reoxidación.
- **Tipo IV.** En estos incineradores los NO_x generados se reducen a nitrógeno molecular por medio del CO e H_2 producidos en atmósfera reductora.
  Parte del aire de combustión es añadido durante el enfriamiento y en la cámara de reoxidación para eliminar el CO y H_2 sobrantes, los gases a la salida de la segunda cámara pasan por una caldera y parte de ellos son reciclados.

4. Incineradores clase IV

Este tipo de incineradores puede tratar residuos líquidos o gaseosos y también pueden instalarse para tratar gases a la salida de los hornos rotatorios. Se caracterizan or tener que tratar residuos que generan gases efluentes particulares, se dividen en:

- **Tipo I.** El sistema consiste en una cámara de combustión equipada con un quemador de alta presión, enfriamiento de gases (*quench*), lavado tipo venturi (*venturi-scrubber*), un eliminador de gotas (*demister*), chimenea de tiro forzado y un sistema de control. Según el tipo de residuo la cámara de combustión puede ser horizontal o vertical, este último diseño minimiza el depósito de sales en el incinerador.
- **Tipo II.** El enfriamiento se realiza por aire, hasta unos 230°C y s incorpora un filtro de mangas o precipitador electrostático para la recuperación de partículas. En el caso de usar filtro de mangas se puede añadir cal a los gases para mejorar la eficiencia de la separación de HCl y SO_2.
- **Tipo III.** La presencia de una cámara de acondicionamiento permite la instalación de una caldera de recuperación. Para el correcto diseño y dimensionado de estas instalaciones debe conocerse a fondo las temperaturas de formación de los eutécticos que se pueden formar a partir de los residuos, una vez conocidas las temperaturas de los eutécticos, se debe introducir un caudal de aire que reduzca la temperatura por debajo de la teórica del eutéctico con el correspondiente margen de seguridad.

5. Incineradores clase V

Este tipo de incineradores están diseñados para destruir residuos sólidos, el principio de funcionamiento consiste en un primer reactor que vaporiza y gasifica el residuo y un segundo que con el apoyo de un quemador, crea la temperatura suficiente para lograr la destrucción, además la instalación está diseñada para que los gases tengan el tiempo de residencia exigido.

Se distingue el siguiente tipo:

Tipo I. El sistema dispone de una cámara de combustión equipada con un quemador para iniciar la combustión, puertas para evacuar las cenizas y conducto de conexión

2.5.1.1. Incineradores usados convencionalmente para residuos sólidos con alto cargo de humedad

Este tipo de incineradores son los más utilizados para la incineración de residuos con alto porcentaje de humedad, como pueden ser comúnmente los residuos orgánicos.

1. **Horno rotatorio**

Es la modalidad de horno que suele aplicarse para la incineración de residuos sólidos, fangos, residuos envasados, así como de líquidos o bien cuando se trata de incinerar mezclas de residuos con poder calorífico inferior no bien definidos. El horno rotatorio es un armazón cilíndrico recubierto de material refractario, que está montado con una ligera inclinación, la rotación del armazón provoca el movimiento del residuo a través del horno, así como una mejor mezcla del residuo.

Para garantizar una combustión completa del residuo, los diseños del incinerador de horno rotatorio incluyen una cámara de postcombustión. La cámara de postcombustión sirve para completar las reacciones de combustión de la fase gaseosa, el horno y la cámara de postcombustión normalmente están equipados con un sistema auxiliar de quemado de combustible para poner las unidades a las temperaturas deseadas de funcionamiento. Este tipo de horno suele estar diseñado para una potencia calorífica máxima de 6.5×10^6 kcal/h.

Las principales características de este tipo de horno son:

- La carga suele ocupar el 20% del volumen, en la incineración se debe tener en cuenta que ello acontece a la entrada del residuo, a medida que el combustible va avanzando se gasifica y desaparece hasta que, al final del proceso, todo el volumen debe ser ocupado solo por gases.
- Permite variar la inclinación y velocidad, y con ello el tiempo de permanencia de los sólidos lo cual ayuda a que las escorias sean de mejor calidad.
- Arrastre de partículas reducido, que depende de la relación longitud diámetro.
- Tratar cualquier tipo de residuo.

Es el tipo de horno que mejor se adapta a la caracterización física del residuo ya que de manera indistinta puede tratar residuos sólidos, líquidos, o pastosos. Permite trabajar a una temperatura cuya única limitante se encuentra en la calidad del refractario.

La alimentación y la naturaleza del residuo entrante determinan la calidad de la capa de refractario, así si se trata de un material abrasivo o que pueda provocar

un fuerte impacto contra el revestimiento en el momento de la alimentación, la calidad del refractario deberá ser bien analizada así como su espesor. Además la caracterización del residuo puede dar lugar a que se engendren reacciones de carácter endotérmico, como será el caso de un carbonato, o de naturaleza exotérmica, como sería el caso de un residuo orgánico, en este último caso la aportación de combustible externo ha de estar de acuerdo con el calor desarrollado por el residuo pues de lo contrario la temperatura subirá en exceso.

Se debe tener en consideración el tiempo de residencia que el sólido ha de permanecer en el interior del cilindro, en primer lugar hay que hablar del factor de llenado, este oscila entre el 4 y 10% del volumen interno, en cuyo caso el tiempo de residencia de los sólidos es relativamente corto, inferior a una hora. El tiempo de permanencia está definido por varios parámetros pero los más significativos son:

- La composición química o análisis elemental.
- El calor específico.
- Naturaleza física del material a procesar.
- La humedad.
- La posibilidad de fusión de las cenizas y/o escorias en el horno.
- El ángulo de reposo.

La expresión que determina el tiempo de residencia de los sólidos T, en minutos es:

$$T = \frac{19^{1}/_{d}(\alpha)^{0.5}F}{I(\%)N} \qquad \text{Ec 2.32}$$

Donde:

1/d: relación longitud a diámetro interno del horno.

α: ángulo dinámico de reposo, suele oscilar de 10 - 45°. Cuanto mayor sea la inclinación mayor será el tiempo de residencia.

F: Factor de carga que es la unidad para hornos lisos

I: Inclinación en %. Lo normal es que oscile del 2 al 4%.

N: Es la velocidad de rotación N en rpm. Lo normal suele ser de 0.5 a 3.0 rpm.

Tanto la velocidad de rotación como la inclinación son dos factores directamente relacionados con el transporte de materia en el interior del horno, aumentar la inclinación supone incrementar la velocidad de paso de los materiales, o lo que es lo mismo, reducir el tiempo de permanencia de los sólidos.

La capacidad de carga, C (%), de los hornos rotatorios es un factor adimensional que varía según el destino de los hornos, en el caso de los hornos rotatorios destinados al tratamiento de desechos inorgánicos, suelen tener un valor entre un

5 y 10% con respecto al volumen interno del horno. Se utiliza la siguiente expresión para su cálculo:

$$C(\%) = \frac{Q_v}{V_t A} \qquad \text{Ec 2.33}$$

Donde:

Q_v: es la masa volumétrica en m^3/min.

V_t: es la velocidad lineal media de transporte, que se halla dividiendo la longitud del horno por el tiempo de residencia de los sólidos

A: área de la sección transversal del horno.

Para la aplicación común de la incineración el principio de funcionamiento de los hornos es equicorriente o corriente paralela. Esto es el aire primario de combustión y los gases de combustión avanzan en el mismo sentido que la carga.

2. Hornos incineradores de tambor

Son incineradores destinados a la destrucción térmica de disolventes e hidrocarburos contenidos en plásticos, residuos de asfaltos, carbonosos, etc., se componen de una primera cámara equipada con un quemador en conjunto con el sistema de inyección de aire y una cámara de postcombustión. La temperatura de trabajo en la primera cámara será una función de la presión de vapor del residuo y de la velocidad de vaporización precisa, el ratio de vaporización puede ser controlado por medio de la inyección de aire (Figura 2.17).

La primera cámara, trabaja como pirolizador y gasificador, mientras que la segunda procede a la destrucción térmica entre 950 °C y 1,100 °C, con un ligero exceso de aire sobre el estequiométrico (Castells, 2005).

Los hornos de tambor están inclinados hacia la cámara de de postcombustión. Esto, junto con la rotación lenta (aprox. 3-40 rotaciones por hora), facilita el transporte de residuos peligrosos sólidos que se alimentan desde la parte frontal, así como de las cenizas de fondo producidas durante la incineración, en la dirección de la cámara de postcombustión. Estas se extraen, junto con las cenizas de la cámara de combustión, a través de un extractor húmedo de cenizas de fondo. El tiempo de residencia para residuos sólidos es normalmente de más de 30 minutos.

La cámara de postcombustión proporciona un tiempo de residencia para la incineración de los gases de combustión producidos durante la incineración, así como para la incineración de residuos líquidos y gaseosos inyectados directamente. El tamaño de la cámara de postcombustión y los flujos de gas permiten predecir los tiempos de residencia alcanzados. La reducción de los tiempos de residencia puede aumentar los riesgos de combustión incompleta de los gases (IPPC, 2006)

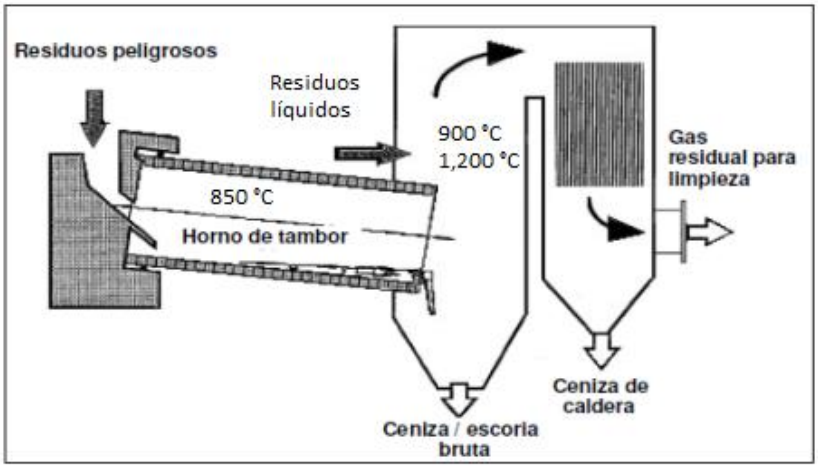

Figura 2.17 Horno de tambor con cámara de postcombustión (IPPC, 2006)

3. Hornos de lecho fluidizado

La fluidificación consiste en establecer una velocidad a la corriente de aire de combustión con referencia al material que constituye el lecho. Así, un lecho fluidizado consiste fundamentalmente en un fluido que atraviesa en dirección ascendente un lecho de partículas sólidas soportadas por un distribuidor.

El objetivo principal es alcanzar coeficientes de transferencia de calor elevados y un alto grado de uniformidad de temperatura. Si las velocidades de flujo son bajas, el fluido pasa por los espacios intersticiales y el sistema se denomina “lecho fijo”, al aumentar la velocidad del fluido, las partículas comienzan a moverse, algunas de ellas empiezan a vibrar adquiriendo un movimiento ascendente llamado “lecho expandido”.

Si la velocidad se eleva, el lecho desaparece como tal y las partículas de sólidos son arrastradas fuera del lecho, a este sistema se le denomina “lecho fluido en fase dispersa” con transporte neumático de sólidos. Estos tres sistemas están representados en la Figura 2.18.

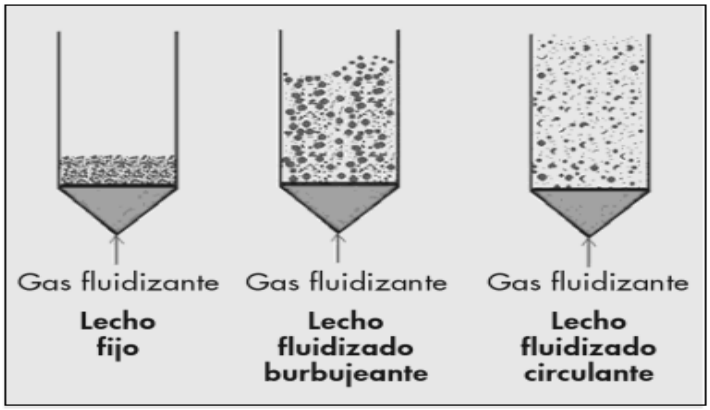

Figura 2.19 Tipos de horno de lecho fluidizado (Castells, 2005)

En la combustión de lecho fluidizado el material combustible se sitúa en un lecho de material inerte, y el aire necesario para la combustión es el gas de fluidización.

Sus principales características son:

- Permiten la utilización de combustibles de bajo PCI, como carbones de bajo grado, así como los que tienen elevados contenidos en cenizas y altas concentraciones de dióxido de azufre.
- Posibilidad de neutralizar el azufre contenido en el carbón con dolomita o piedra caliza para descargarlo en forma de ceniza.
- La combustión en lecho fluidizado también produce menos polución, ya que se forman menos óxidos de nitrógeno, la permitir trabajar a temperaturas más moderadas.

Los lechos fluidizados en fase densa se parecen bastante a un líquido en ebullición, así, los objetos ligeros flotan, mientras los densos se hunden.

Las ventajas que aporta la incineración en lecho fluidizado en comparación con el convencional son:

- ✓ Opera a un nivel de temperaturas sensiblemente inferior a las normales en la incineración convencional, con lo que se evita la fusión de las cenizas y escorias, reduciendo la erosión y la corrosión.
- ✓ Requiere un menor exceso de aire (del 10 al 15% respecto al estequiométrico, mientras que en los convencionales los valores van del 75 al 100%) con lo que el rendimiento de la combustión será mayor.
- ✓ La transmisión de calor se acrecienta gracias a los efectos combinados de la convección y la radiación. Ello implica una reducción del tamaño del horno a igualdad de potencia térmica.
- ✓ Instrumentación de control más simple y barata que en los sistemas convencionales.
- ✓ Minimización de las emisiones de SO_2 por adición de reactivos en el propio lecho (carbonatos).
- ✓ Reducción de los niveles de NO_x al trabajar a menores niveles térmicos y excesos de aire más reducidos.
- ✓ Aumento del tiempo de residencia. Siendo el principio de funcionamiento un equilibrio entre la energía comunicada por el fluido y la gravedad, la sustentación de la partícula en el lecho puede ser muy prolongado.

Los lechos fluidizados destacan por poder tratar residuos de muy bajo poder calorífico debido a la gran cantidad de humedad.

2.5.2. Principio químico de la conversión de energía en la incineración

Los procesos de conversión energéticos se basan en la degradación de las moléculas orgánicas por la acción del calor. Si el combustible es sólido o líquido se denomina incineración. El último objetivo del proceso es conseguir la destrucción térmica de los componentes orgánicos. La combustión se define como

el proceso controlado de oxidación rápida que sucede durante la combinación de oxígeno con aquellos materiales o sustancias contenidas en los residuos capaces de oxidarse (SEMARNAT, 2004). Así pues, se precisa en primera instancia, que el residuo a oxidar tenga al menos uno de los tres únicos elementos susceptibles de combinarse con el oxígeno con liberación de calor: C (Carbono), H (Hidrógeno) y S (Azufre) (Castells, 2005).

Las reacciones de combustión pueden llevarse a cabo con el aire justo (reacción estequiométrica), con exceso de aire (en este caso hay oxígeno en los gases producto de la combustión), o con defecto de aire (en los gases de combustión se detecta la presencia de elementos no quemados). Cuando la mezcla es la correcta se debe producir la ignición. A partir de este momento el calor generado permite mantener un nivel de temperatura que asegura la continuidad de la reacción (Castells, 2005).

Para una combustión oxidativa eficaz, es esencial un aporte de oxígeno suficiente. El número “n” de la relación entre el aire de incineración suministrado y el aire necesario químicamente para la incineración está normalmente entre 1.2 y 2.5 según si el combustible es gas, líquido y sólido, y el sistema del horno. La etapa de combustión es sólo una etapa de la instalación de incineración global. Las incineradoras incluyen normalmente un conjunto complejo, realizan un tratamiento global de los residuos. Cada uno de estos componentes tiene una finalidad ligeramente distinta (IPPC, 2006).

a) Aire de combustión y turbulencia

El calor reinante en el interior del horno, procedente de las llamas, las paredes y bóveda radiante, tiene por objeto acelerar la gasificación del combustible hasta lograr que la cantidad de volátiles y gases generados al entrar en contacto con el oxígeno, desprenda el calor de la combustión que haga sostenible la incineración. Este calor se transmite por radiación. El aire primario entra a cierta velocidad, sobre todo en los hornos de parrillas ya que tiene una misión secundaria de remover los residuos. La temperatura de entrada es, por regla general de 150°C, en estas condiciones es evidente que transfiere una cierta cantidad de calor, que es el denominado calor de convección.

El calor transferido por convección es casi despreciable en comparación con el de radiación, para aumentar la tasa de transferencia de calor Q_c por convección no hay más solución que aumentar la velocidad del fluido.

La expresión de la transferencia de calor por convección Q_c es del tipo:

$$Q_c = S \cdot h \cdot \Delta t \qquad \text{Ec 2.31}$$

Como sea que el área de contacto (S) y el gradiente de temperatura (Δt) son, en la práctica inamovibles, el único parámetro que se podría aumentar sería “h”, coeficiente de transmisión de calor por convección que a su vez depende de la velocidad. La noción de turbulencia persigue conseguir una distribución homogénea de la velocidad en toda la sección del horno.

b) Incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) e incineración de residuos de origen vegetal

El sistema más convencional es la incineración sobre parrilla que consiste en someter los residuos a una combustión de tipo adiabático en el seno de un lecho colocado sobre una parrilla.

Los residuos de origen vegetal son los procedentes de la biomasa. La mayor parte de ellos no presentan problemas de toxicidad cuando se abandonan en el campo, pero al generarse en grandes cantidades y ser degradables en tiempos muy dilatados constituyen una fuente de contaminación, sin embargo como en toda incineración si no se toman las medidas necesarias se pueden generar compuestos tóxicos, este tipo de residuos están clasificados en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Residuos de origen vegetal (Castells y Alsina, 2012)

Origen	Clase de residuo
Forestal	Residuos de tratamientos selvicolas Residuos de corta pies maderables
Agrícolas	Residuos de cultivos leñosos. Frutas secas
Industrias forestales	Residuos de aserradoras Residuos de cultivos herbáceos Residuos de elaborados de madera Residuos de fabricación de corcha y pasta de papel
Industrias agrícolas y agroalimentarias	Residuos de industrias vinícolas Residuos de fabricación de aceite Residuos de la fabricación de cerveza y malta

El proceso de combustión de estos residuos se produce como consecuencia de la oxidación exotérmica del carbono e hidrógeno presente. La oxidación del carbono tiene lugar en dos fases:

$$C + {}^{1}/_{2}\, O_2 = CO + 2{,}200 kcal$$

$$CO + {}^{1}/_{2}\, O_2 = CO_2 + 5{,}640 kcal$$

Los materiales leñosos son los combustibles residuales sólidos más ricos en fracción gaseosa, con el 85% aproximadamente de materias volátiles. Por este motivo se distinguen dos fases en el proceso de incineración:

- A partir de 150 °C se empieza a producir el desprendimiento de gases que, con la presencia de aire suficiente, arden con gran velocidad. A los 500 °C cesa prácticamente el desprendimiento de gases.
- La combustión del carbón vegetal, la fracción carbonosa (no carbón puro, pero con muy poco hidrógeno) que no ha volatilizado, exige más aire.

La cantidad de aire será una función del análisis elemental del residuo y, sobre todo, de la cantidad de volátiles presentes. Por lo que hace referencia al poder calorífico, se considera que un poder calorífico inferior que sobrepase las 2,500 kcal/kg, permite la combustión del residuo en condiciones sin necesidad de aportación de calor por parte de un combustible adicional.

c) Incineración de fangos de EDAR en plantas de lecho fluidizado

Los fangos de EDAR (estación depuradora de aguas residuales), para la incineración de este tipo se emplea, la técnica de lecho fluidizado. Normalmente se usa un 20-25% de exceso de aire, la temperatura oscila de 720 a 840 °C.

Lo normal es que los hornos admitan un fango con humedad de 50%, si el horno está diseñado para admitir fango húmedo, el agua a evaporarse ayuda a mantener la temperatura dentro de los límites establecidos. En el caso de los fangos de EDAR el principal problema es que la temperatura sea elevada y provoque la fusión del material del lecho, lo cual tiene que ver con la naturaleza de la fracción inorgánica (cenizas) del fango.

En México la EDAR de Atotonilco cuenta con una capacidad nominal de tratamiento medio de 35 m^3/s y un máximo de 50 m^3/s, incluida la evacuación final de los residuos sólidos y lodos que se generen.

d) Incineración de residuos líquidos

Gran parte de los residuos líquidos a incinerar contienen agua de manera mayoritaria y algunos de ellos con compuestos orgánicos e inorgánicos en disolución, debido a ello será imprescindible la ayuda de un combustible auxiliar para mantener una temperatura alta en la cámara de combustión.

El proceso de incineración de líquidos debe consistir en:

- Provocar la rotura del líquido en finas gotas, en ellos estriba fundamentalmente la atomización.
- Ubicar las gotas en lugar de alta temperatura y fuerte cinética de transferencia de calor. La primera fase de la incineración de líquidos consiste en una evaporación y ello se realiza cuando la mezcla líquido/gas es óptima.
- Controlar la atomización del líquido.

Para realizar la incineración es preciso saber:

- La composición química del líquido a incinerar.
- El calor de combustión, o el poder calorífico inferior (PCI) del líquido.
- La viscosidad, ello tiene que ver con la facilidad de formar gotas.
- La corrosividad, que afecta tanto a la boquilla inyectora como al propio horno.
- El contenido de cenizas, para evitar la obstrucción de la boquilla.

La temperatura de trabajo suele oscilar de 1,000–1,600 °C lo cual está relacionado con la propia caracterización del líquido.

2.5.3. Instalaciones actuales

A pesar de que la tecnología para la generación de energía eléctrica a partir de desechos sea de reciente utilización, su campo de investigación sobre nuevas mejoras está en constante crecimiento y es muy utilizada en los países de primer mundo. Hoy su implementación no es un tema nuevo, pues desde los años 80's se ha utilizado la incineración de residuos con y sin aprovechamiento de energía, principalmente en Europa y Norteamérica. A nivel mundial ***esta tecnología es mejor conocida como recuperación de energía de residuos o Waste to Energy (WtE).***

El mercado de las plantas de incineración de desechos está en constante crecimiento. Entre 2007 y 2012 el crecimiento de la capacidad mundial anual instalada incrementó un 12 por ciento. Este crecimiento se acelerará en los próximos 5 años y se estima que la capacidad anual instalada incremente el 21 por ciento en 2016. En la actualidad, alrededor de 6.1 mil millones de euros se invierten en la construcción, modernización y mantenimiento de plantas de incineración de residuos en todo el mundo. Esta cantidad aumentará alrededor de 7.2 millones de euros en 2016.

Más de 2,150 plantas de tratamiento térmico de residuos en todo el mundo están actualmente operando y tienen la capacidad para tratar cerca de 250 millones de toneladas de residuos al año. Cerca de 250 plantas nuevas con una capacidad de alrededor de 70 millones de toneladas anuales se estarán operando para el 2016. La construcción de estas plantas es una respuesta a la creciente falta de espacio en las aglomeraciones urbanas y el endurecimiento de la legislación ambiental. Las áreas disponibles para vertederos son cada vez menores y el mercado de bienes raíces limita cada vez mas el espacio para rellenos sanitarios (ECOPROG, 2012b).

Una de las regiones en donde este desplazamiento es más notorio es en China, ya que ha puesto en marcha el programa más grande de ampliación de capacidad de incineración entre muchos otros países. Entre 2012 y 2016 tiene planeado aumentar su capacidad a cerca de 40 millones de toneladas anuales por año. En ese mismo plazo, una capacidad cercana a 21 millones de toneladas será puesta en Europa. Esto es considerablemente menor que en China, en términos monetarios, sin embargo, el mercado europeo sigue siendo el más importante del mundo. En los próximos cinco años aproximadamente 18 millones de euros serán invertidos en plantas de tipo WtE en Europa, pero sólo unos 12 millones de euros (dos tercios) se invertirán en Asia.

La razón principal de estas diferencias en cuanto a la capacidad de inversión está dada por el reducido valor calorífico de los desechos de Asia, por lo que las plantas de incineración de Asia de la misma capacidad incineran más desechos.

Los estándares tecnológicos y ecológicos también representan una importante diferencia respecto a las posibilidades de cada región.

En Europa, los nuevos mercados como Gran Bretaña, Polonia, y los países escandinavos a diferencia de Asia, son individuales y están compensando la disminución de los mercados con crecimiento fuerte (como Alemania y países Bajos). Para este nuevo mercado la directiva sobre vertederos de la Unión Europea sigue siendo el principal motor del mercado para la construcción adicional de plantas.

Si bien es cierto que los nuevos proyectos de incineración de basura comenzarán a ejecutarse por primera vez en muchos años en Norte América, esto se traducirá en un mercado más fuerte a largo plazo para dicha región.

Muchos países están en desarrollo pero en bajo rendimiento. Países como la india y Brasil requieren el crecimiento de su infraestructura y de los fondos necesarios para su ejecución (ECOPROG, 2012a).

En el mundo se tienen registradas alrededor de 104 plantas de tipo WtE y 12 nuevos proyectos confirmados para nuevas plantas que entrarán en operación en los próximos seis años. A continuación se presentan algunas plantas de tipo WtE más importantes en el mundo:

2.5.3.1. Planta de incineración con recuperación energética. Delaware Valley

Delaware Valley tiene seis líneas con cámaras de combustión rotatorias O'Connor, las cuales juntas queman más de 2,800 toneladas de residuos sólidos urbanos de Filadelfia cada día (Figura 2.19).

La planta para la recuperación de recursos de Delaware Valley es operada por la compañía Covanta Delaware Valley, LP., que se encuentra en Chester, Pennsylvania, y se unió al portafolio de Covanta de energía ecológicamente racional a partir de residuos (WtE) en sus instalaciones de 2005. La planta es capaz de procesar hasta 3,348 toneladas de residuos sólidos urbanos y comerciales cada día (Figura 2.20).

La instalación se abrió originalmente para la operación comercial en 1992. La planta genera electricidad que se vende a Atlantic City Electric Company y al mercado al por mayor. La planta no sólo cumple con la disposición de residuos sólidos urbanos del condado de Delaware, sino que también proporciona una capacidad de hasta 800,000 toneladas de residuos adicionales cada año a los condados circundantes.

Los sistemas avanzados de control monitorean constantemente el rendimiento de la combustión, producción de energía y las emisiones en Covanta Delaware Valley. Los seis incineradores de la planta proporcionan una solución ambientalmente eficaz y segura para la eliminación de desechos sólidos de las

necesidades del condado, así como de las comunidades e industrias en toda la región del valle de Delaware.

Figura 2.19 Planta de incineración Delaware Valley, EE.UU (COVANTA, 2013)

Los sistemas avanzados de control monitorean constantemente el rendimiento de la combustión, producción de energía y las emisiones en Covanta Delaware Valley. Los seis incineradores de la planta proporcionan una solución ambientalmente eficaz y segura para la eliminación de desechos sólidos de las necesidades del Condado, así como las de las comunidades e industrias en toda la región del valle de Delaware.

En 2006, la instalación recibió seguridad y salud ocupacional (OSHA por sus siglas en inglés), el programa de protección voluntaria (VPP por sus siglas en inglés) y el premio STAR, el más alto galardón otorgado por la administración en el reconocimiento de excelente salud laboral y prácticas de seguridad. Covanta Energy es una compañía con presencia en Europa, Norteamérica y Asia. Está a cargo del desarrollo, construcción y operación de dos plantas en China: Chengdu, Fuzhou y Taixing construidas en 2007, 2008 y 2011 respectivamente.

Chengdu tiene una capacidad de procesamiento de 1,800 toneladas por día de RSU y genera 36 MW. Fuzhou puede procesar hasta 394,470 toneladas por año (COVANTA, 2012). Covanta ha asegurado contratos de eliminación de residuos a largo plazo con los gobiernos municipales de Taixing y Yangzhong y espera generar 30 toneladas métricas por hora de vapor a las empresas locales de bajo consumo de energía bajo un acuerdo de concesión por 25 años.

En Ontario Canadá diseñaron un nuevo proyecto en la región de York en Durham que tendrá la capacidad de operar 140, 000 toneladas por año. Cuando la planta entre en operación la instalación será capaz de producir 17,5 MW de energía

limpia y renovable. En Irlanda se construirá una planta de tipo WtE en la ciudad de Dublín. La instalación ubicada en la península de Poolbeg, generará electricidad para más de 50,000 hogares y calefacción urbana para hasta otras 60,000 viviendas, a partir de 600,000 toneladas de residuos que de otro modo habrían ido a vertedero (COVANTA, 2013).

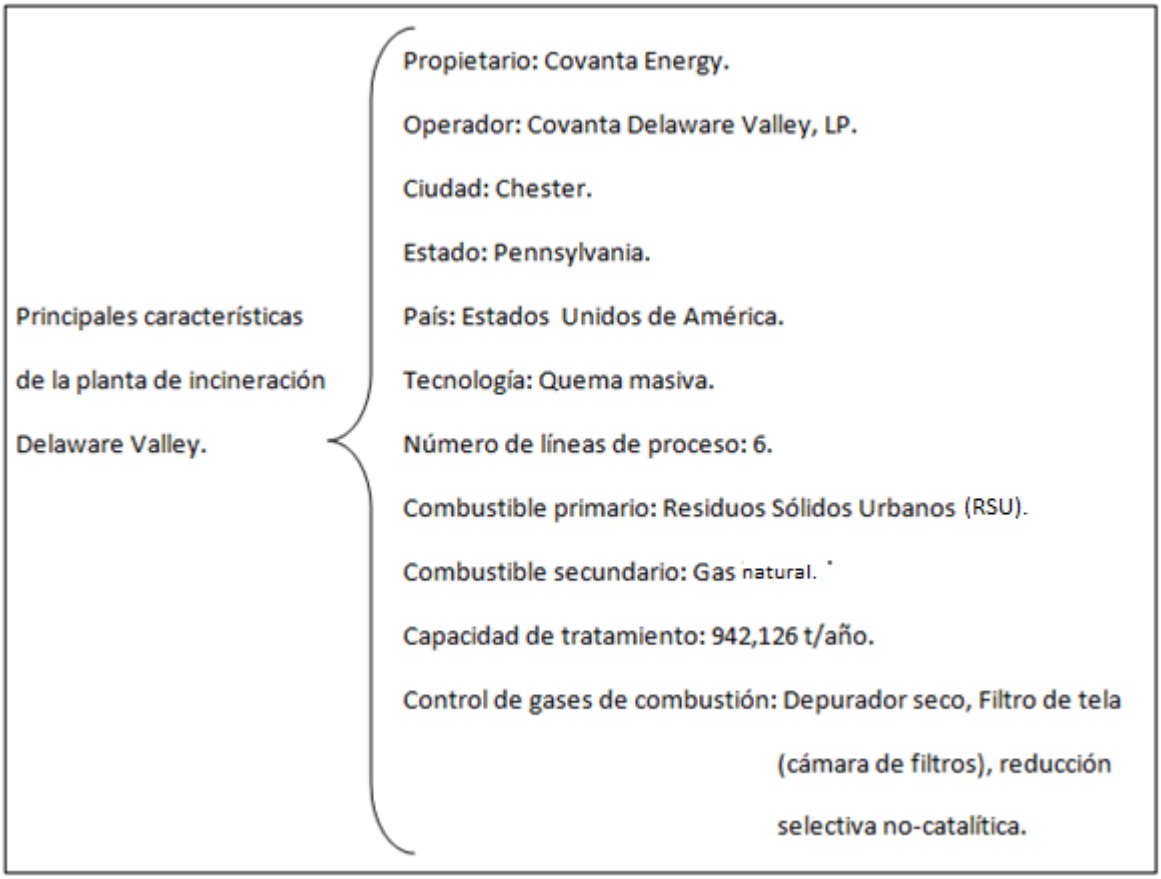

Figura 2.20 Características de la planta de incineración Delaware Valley en EE. UU (COVANTA, 2013)

2.5.3.2. Planta de incineración Amsterdam WFPP/WTE

Amsterdam WFPP (Waste from Power Plant "Planta de energía de a partir de residuos") (Figura 2.21) en realidad opera dos plantas de residuos en el mismo sitio. La planta original, construida en 1993, trata 800,000 toneladas por año.

La nueva planta de tipo WtE trata residuos como combustible. Fue construida en 2007, tiene un índice de calor del 30%, que es el más alto en el mundo de las plantas de residuos en energía. La porción WtE del sistema de residuos de Amsterdam es capaz de procesar 530,000 toneladas por año y la producción de electricidad en una tasa de 850 kWh / tonelada (Figura 2.22).

Figura 2.21 Planta de incineración Afval Energie Bedrijf, Amsterdam, Holanda (SIEMENS, 2013)

El revestimiento de Inconel en las calderas permite que la planta pueda funcionar con temperaturas de vapor de 440 °C en lugar de 400 °C, aumentando la eficiencia. La recirculación de gases de combustión reduce el volumen de gases de combustión, y por lo tanto, los requerimientos de tamaño del equipo. Esta planta es también la única en que los filtros de tela se colocan antes de los depuradores. La electricidad generada alimenta a los hogares de la red y los suministros de las industrias de todo el país. Cerca del 99% de los más de 1,4 millones de toneladas de residuos tratados cada año se reciclan. Esto hace a AEB el más grande procesador de RSU de localización individual en el mundo.

En 2012 la compañía AEB obtuvo la adjudicación de la condición R1, que significa que AEB puede importar residuos para su tratamiento. Las emisiones de CO_2 resultantes son menores, incluso teniendo en cuenta el transporte necesario que si las autoridades extranjeras depositaran los residuos en los vertederos a nivel local, ya que el gas metano es liberado cuando los residuos se vierten, lo que contribuye al efecto invernadero que es 20 veces más fuerte que el del CO_2.

La producción de energía a partir de residuos es un proceso que no se detiene, los empleados de la planta trabajan las 24 horas del día los 365 días del año. Cada día, los 600 camiones y una serie de trenes de carga entregan 4’400,000 kilos de residuos a las instalaciones de AEB para conversión de sus residuos en energía. Eso equivale a aproximadamente a 500,000 bolsas de basura por día.

Para reducir la necesidad de transporte por carretera, AEB también está investigando las posibilidades de transportar con barcazas (AEB, 2011).

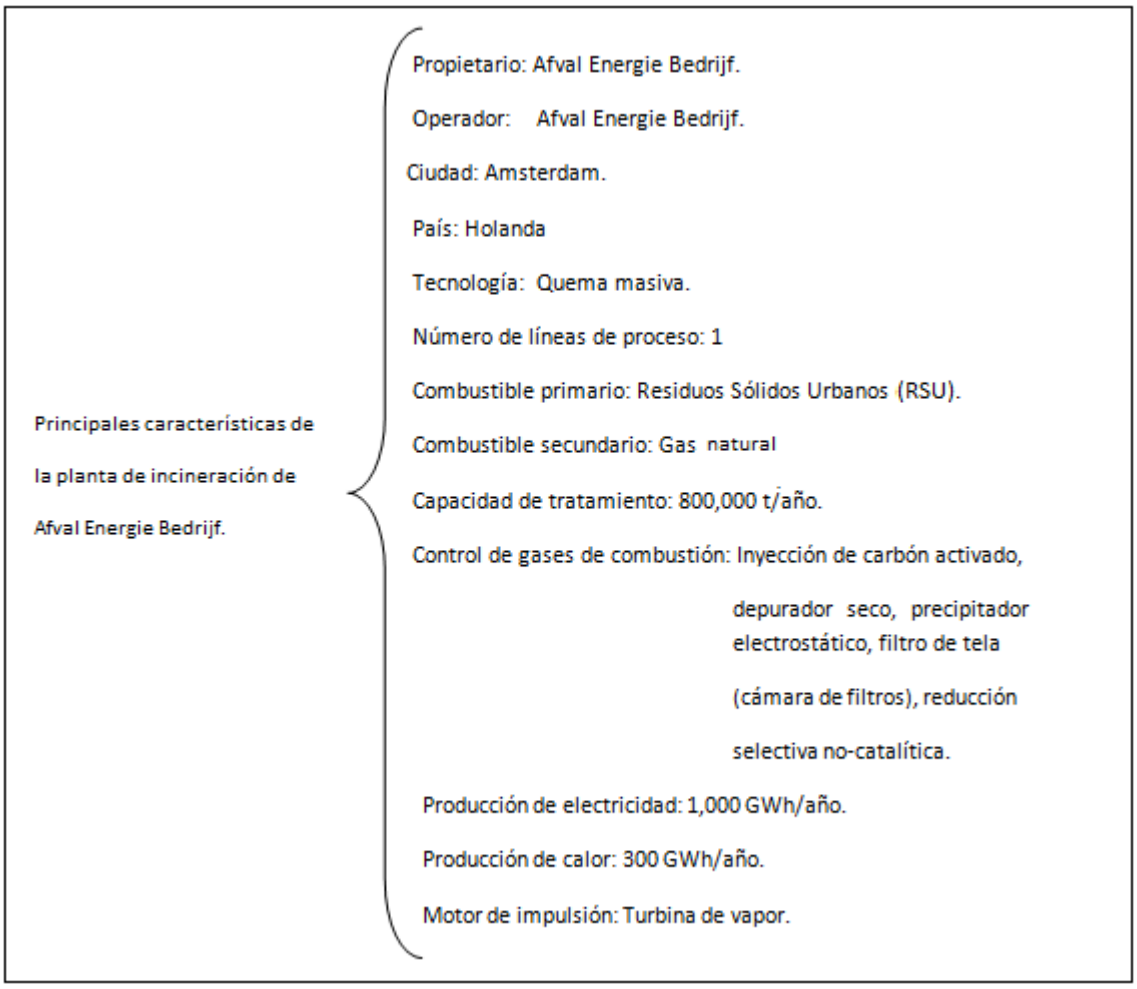

Figura 2.22 Características de la planta de incineración Afval Energie Bedrijf (AEB, 2011)

2.5.3.3. Planta de incineración SYSAV Sjölunda

La planta SYSAV de conversión de residuos en energía (Figura 2.23) se localiza al suroeste de Suecia e incinera residuos sólidos urbanos (RSU) y aprovecha el calor con cuatro calderas, cada una de las cuales fueron comisionadas en tiempos diferentes.

La planta de SYSAV permite utilizar 550,000 toneladas de residuos al año como combustible en su totalidad. La planta produce aproximadamente 1’400,000 MWh de calefacción urbana por año, lo que equivale aproximadamente a la calefacción urbana de 7,000 casas pequeñas (Figura 2.24).

Las calderas de vapor producen alrededor de 250,000 MWh de energía eléctrica en un año, algunas de las cuales se utiliza en la propia planta (SYSAV, 2012).

Figura 2.23 Planta de incineración SYSAV, Mälmo, Suecia (NIB, 2007)

Principales características de la planta de incineración de SYSAV Sjölunda.	Propietario: SYSAV. Operador: SYSAV. Ciudad: Mälmo. País: Suecia Estado: Skane Tecnología: Quema masiva. Número de líneas de proceso: 4 Combustible primario: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Combustible secundario: Petróleo. Capacidad de tratamiento: 500,000 t/año. Control de gases de combustión: Reducción catalítica selectiva, precipitador electrostático, depurador húmedo. Producción de electricidad: 250 GWh/año. Producción de calor: 1,400 GWh/año. Motor de impulsión: Turbina de vapor.

Figura 2.24 Características de la planta de incineración SYSAV (NIB, 2007)

2.5.3.4. Planta de incineración ASM Brescia

La planta WtE de ASM Brescia (Figura 2.25) está diseñada para la producción de electricidad y agua caliente para la red de calefacción urbana, a través de la incineración de RSU, bajo un amplio reciclado selectivo, actualmente atiende a unos 120,000 habitantes.

La planta consta de tres unidades de combustión, de las cuales una está dedicada completamente para biomasa y se diseñó utilizando las tecnologías más avanzadas. El 50% de la inversión para la construcción de la planta ha sido diseñada para los sistemas de purificación de gases de combustión y los de protección del medio ambiente.

La planta de Brescia ha sido diseñada en una estrategia de gestión integrada de los desechos de la siembra y el campo. Es una fuente valiosa de energía para la ciudad de Brescia gracias a la red de calefacción urbana, en esta planta no sólo se produce electricidad, sino también se recupera energía térmica en grandes cantidades, canalizando el calor producido en la red de calefacción del distrito, a los hogares de los usuarios individuales.

En 2011, la planta de Brescia había incinerado 796,000 toneladas de residuos y biomasa, obteniendo 602 millones horas de kilovatios de electricidad y 747 millones de kWh de calor es decir, casi el 55% de la energía térmica suministrada a la red en Brescia en el año. Estos datos significan que en 2011 la planta de Brescia había producido electricidad equivalente a las necesidades de unos 200,000 hogares y el calor igual a las necesidades de más de 60.000 viviendas. Al mismo tiempo, dio lugar a un ahorro de más de 150,000 TEP y se ha evitado la emisión de 400,000 toneladas de CO_2, que corresponden a los resultados obtenidos con la reforestación de 15,000 hectáreas (aproximadamente el doble la extensión de la ciudad de Brescia) (A2A, 2008).

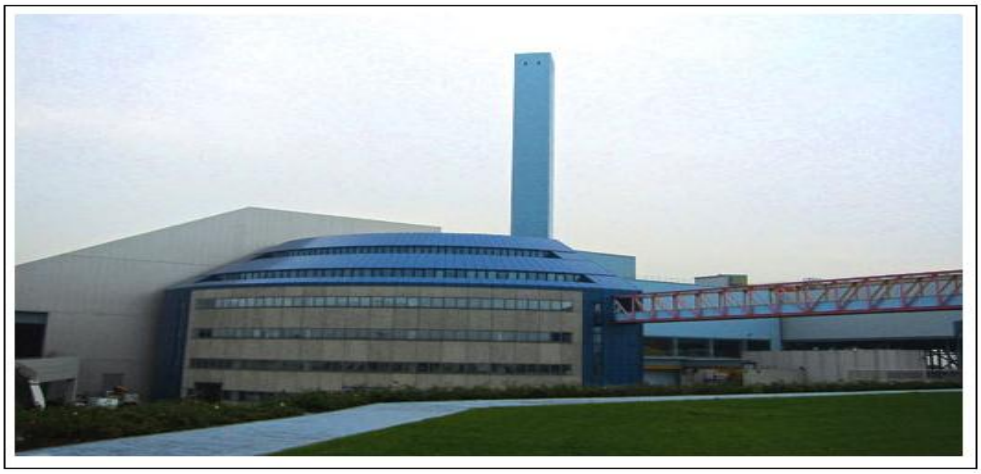

Figura 2.25 Planta de incineración ASM Brescia, Italia (CENTROVOLTA, 2013)

La compañía A2A es una compañía versátil que surge de la fusión de AEM SpA Milán y ASM SpA Brescia con aportaciones de AMSA y Ecodeco, las dos empresas adquiridas por el grupo. Es el líder número 1 como proveedor de calefacción urbana y tiene 2º lugar en capacidad eléctrica instalada. Este grupo también tiene a su cargo más plantas de generación de energía y de tipo WtE en Italia y tiene presencia en otros países de Europa. La planta de Bergamo, la planta de Acerra y la de Silla 2 todas son de tipo WtE. La central termoeléctrica Cassano d D´Adda, la Termoeléctrica Monfalcone y la presa Forni también son propiedad de la compañía A2A (Figura 2.26) (A2A, 2011).

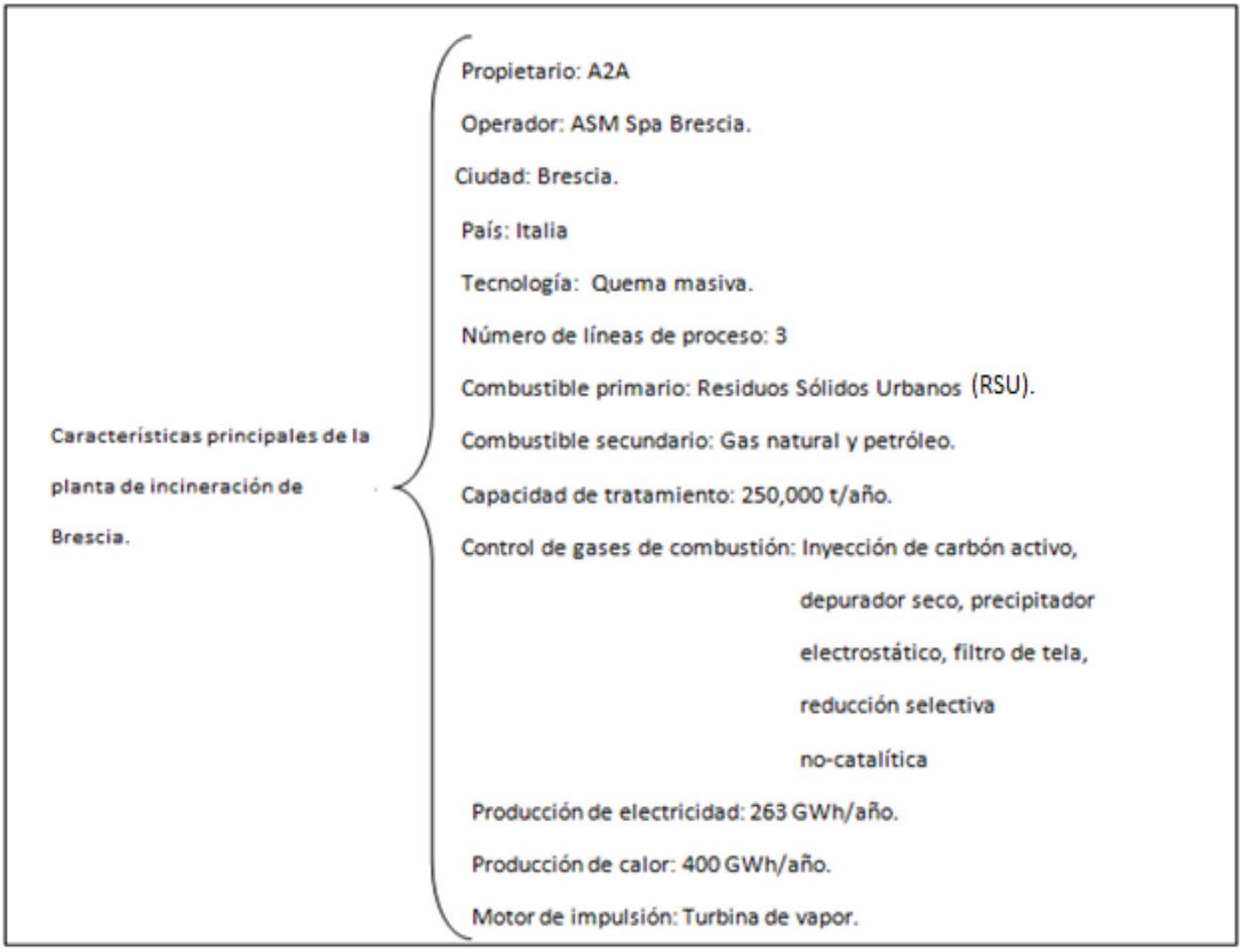

Figura 2.26 Características de la planta de incineración ASM Brescia, Italia (A2A, 2008)

2.5.3.5. Plantas de incineración Haraldrud y Klemetsrud

La agencia Waste to Energy de Noruega (EGE sus siglas en noruego) está produciendo energía de los RSU de los hogares y las industrias de Oslo, en sus plantas de recuperación de energía en Haraldrud (Figura 2.27) y Klemetsrud (Figura 2.28). Los residuos se convierten en iluminación y calefacción. La energía

se utiliza en la red de calefacción urbana de Oslo y la red eléctrica. Oslo ha decidido implementar la gestión circular de residuos en una perspectiva climática, incluyendo la separación de restos alimentos y envases de plástico a partir de 2011. Sobre esta base EGE ha establecido el proyecto EGE2010.

El proyecto consiste en la construcción de dos nuevas instalaciones de clasificación, un nuevo incinerador de residuos y una planta de biogás. El objetivo es ambicioso: antes de 2030, las emisiones de CO_2 de la ciudad se reducirán en un 50% (EGE, 2008).

Figura 2.27 Planta de incineración Haraldrud en Oslo, Noruega (Hafslund, 2011)

La combinación es única, el proyecto hará que el EGE2010 y la planta EGE Klemetsrud sean una de las primeras plantas industriales en combinar la recuperación de energía y la gestión de los residuos en una perspectiva climática. Su ubicación conjunta ofrece ventajas en términos de la gestión de olores, logística, uso de la energía y la economía.

EGE procesa actualmente 250,000 toneladas de los residuos en las plantas Klemetsrud y Haraldrud, de las cuales 130,000 toneladas provienen de los hogares de Oslo. El resto de los residuos domésticos provienen de los municipios cercanos y de los desechos industriales de la región de Oslo. El grado actual de recuperación de energía es 76% (EGE, 2008).

En 2007, las plantas de recuperación de energía generaron aproximadamente 450 GWh en la red del municipio de Hafslund, que equivale a la calefacción de 3,5000 hogares. Esta energía de residuos constituye aproximadamente el 50 % de la producción de calefacción en Oslo. En Klemetsrud, más de 70 GWh de energía eléctrica se producen en la turbina, que es dirigida por el vapor de la producción de energía de los residuos y en motores de gas, los cuales son administrados por el gas metano del vertedero cerrado en Gronmo (Figura 2.29) (EGE, 2010).

Figura 2.28 Planta de incineración de Klemetsrud, Noruega (EGE, 2010)

Principales características de la planta de incineración Haraltrud.	Propietario: Waste to Energy Agency (EGE). Operador: Oslo Energiegjenvinningsetaten. Ciudad: Oslo. País: Suecia. Estado/Territorio: Noruega Tecnología: Quema masiva. Número de líneas de proceso: 1 Combustible primario: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Combustible secundario: Biogás. Capacidad de tratamiento: 410,000 t/año. Control de gases de combustión: Filtro de bolsa, depurador húmedo, precipitador electrostático, reducción catalítica selectiva. Producción de electricidad: 160 GWh/año. Producción de calor: 840 GWh/año. Motor de impulsión: Turbina de vapor.

Figura 2.29 Características de la planta de incineración Haraldrud, Oslo (EGE, 2008)

2.5.3.6. Planta de incineración Maishima

La ciudad de Osaka construyó una nueva planta de incineración Maishima con el propósito de lidiar adecuadamente con el tratamiento de residuos y la conservación del medio ambiente. Se logró que la concentración de gases de escape se mantenga por debajo de los 0.1 nanogramos gracias a un sistema computarizado que controla las operaciones a altas temperaturas, en conjunto a un filtro catalítico de eliminación de NO_x. Además de que las dioxinas que se escapan, son descompuestas mediante un equipo de decloración supercaliente.

La planta de incineración Maishima está equipada con un incinerador y una planta de trituración de residuos voluminosos, cuenta con las instalaciones más recientes de prevención de contaminación y utiliza al máximo el calor que se genera. La planta tiene una capacidad de incineración de 90 toneladas por día, son dos hornos y cada uno con capacidad de 450 toneladas. Tiene también una capacidad de trituración de 170 toneladas por día (el hierro y el aluminio se reciclan).

El tratamiento de los gases de escape se da mediante filtros de limpieza húmeda, equipos catalíticos para la eliminación de NO_x, etc. En la Figura 2.30 se enlistan sus principales características.

La fachada fue construída por el famoso arquitecto austriaco de conservación ambiental Friedensreich Hundertwasser, que trata el fortalecimiento de la vegetación, las terrazas y ventanas están adornadas con plantas en macetas y árboles. En la Figura 2.31 se muestra el exterior de la planta. Además, mediante el uso de la electricidad generada las plantas están bien iluminadas de noche; esto hace a la planta luzca mejor en los lugares de trabajo.

Asimismo, es una planta que ayuda a la conservación del agua, recogiendo la lluvia del techo y reciclando aguas residuales, así, logra un ahorro aproximado de 400 toneladas de agua al día. La construcción de la planta inició en marzo de 1997 y se completó en abril de 2001, el costo total fue de aproximadamente 60.9 billones de dolares, se localiza en una isla artificial de Osaka y tiene una chimenea de 120 metros de altura. Para el transporte eficiente de basura, se desarrollaron y entregaron a la planta Maishima cuatro relés móviles grandes de diez toneladas de gas natural comprimido.

La empresa Osaka City Environmental Bureau está a cargo de otras 9 plantas con las que genera 124, 400 kW en total que se suministran a la ciudad y a las provincias de Japón. La construcción de la primera comenzó en 1956 y la ultima se termino en 2009 (OCEB, 2010).

Principales características de la planta de incineración Maishima.	Propietario: Osaka City Environmental Protection Bureau. Operador: Osaka City Environmental Protection Bureau. Ciudad: Osaka. País: Japón. Estado/Territorio: Maishima. Tecnología: Quema masiva. Número de líneas de proceso: 2 Combustible primario: Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Capacidad de tratamiento: 328,500 t/año. Control de gases de combustión: Filtro de bolsa, depurador húmedo, reducción catalítica selectiva. Producción de electricidad: 32 MWh/año. Producción de calor: 540 GWh/año. Motor de impulsión: Turbina de vapor.

Figura 2.30 Características planta de incineración Maishima, Osaka (OCEB, 2010)

Figura 2.31 Planta de incineración Maishima (OCEB, 2010)

2.5.4. China: un caso particular

De los aproximadamente mil millones de toneladas (907 millones de toneladas) de los RSU globales "post-reciclaje", cerca de 200 millones de toneladas (181 millones de toneladas) se procesan en plantas tipo WtE que recuperan el contenido energético de los residuos en la forma de electricidad o calor. La tecnología de energía a partir de residuos dominante implica la combustión de RSU en una parrilla inclinada u horizontal. Hay más de 500 plantas energía a partir de residuos de este tipo que funcionan en 35 países.

La mayor parte de los RSU globales, es decir, más de 800 millones de toneladas (725 millones de toneladas), se depositan en vertederos. Un verdadero desarrollo sostenible exige que únicamente los residuos inorgánicos se depositen en vertederos, algo que ya se practica en varios países. Sin embargo, obligaría a aumentar considerablemente la capacidad actual de sistemas WtE a nivel global de unos 200 millones de toneladas (181 millones de toneladas) y esta es una propuesta muy costosa, especialmente para los países en desarrollo.

Obviamente, la necesidad es mayor en los países con grandes ciudades de rápido crecimiento, como China e India, donde los rellenos sanitarios existentes se llenan en exceso.

China tiene la mayor población de la Tierra (1,351 mil millones) y está experimentando un rápido crecimiento económico. Este país tiene un PIB de $8.8 billones de dólares en términos de paridad del poder adquisitivo (PPP), que es la tercera más grande del mundo después de la Unión Europea y los EE.UU. Sin embargo, su población es más de cuatro veces superior al de los EE.UU. por lo que el PIB per cápita real es sólo $ 6,800 y corresponde a una fracción del PIB de EE.UU. per cápita.

A pesar de que el capital para los sistemas de energía a partir de residuos es alto, el gobierno central de China ha sido muy activo en lo que respecta a aumentar la capacidad de las plantas de energía a partir de residuos. Una de las medidas introducidas proporcionó un crédito de alrededor de $ 30 por MWh de electricidad generada por medio de energía a partir de residuos en lugar de utilizar combustibles fósiles.

En China se introdujo la tecnología inicialmente a finales de la década de los 80’s y ha experimentado un rápido desarrollo desde entonces. En 1988 la primera planta de RSU funcionaba con tecnología japonesa y fue construida en Shenzhen con capacidad para 450 toneladas al día y generaba 22,7 millones de kWh de electricidad por año. De 2000 a 2003, se construyeron 20 plantas aproximadamente, sobre todo en las grandes ciudades, como Shanghai, Guangdong, Shenzhen, Hangzhou, Zhengzhou y Haerbin.

La ciudad de Ningbo ubicado en la provincia de Zhejiang, construyó la primera de 1,000 toneladas por día con una inversión total de $ 60.6 millones, y planta WtE en 2001. En la actualidad, cada vez más ciudades grandes y medianos productores

están construyendo más plantas de energía WtE. La Figura 2.32 muestra como la capacidad ha aumentado constantemente y el incremento de la capacidad total de las plantas de 183 a 766 ton/día, pasando de 2.2 millones de toneladas en 2001 a cerca de 23,5 millones de toneladas en 2009, convirtiendo a China en el mayor usuario de la cuarta parte de los residuos a energía en el mundo, después de la UE, Japón y EE.UU.

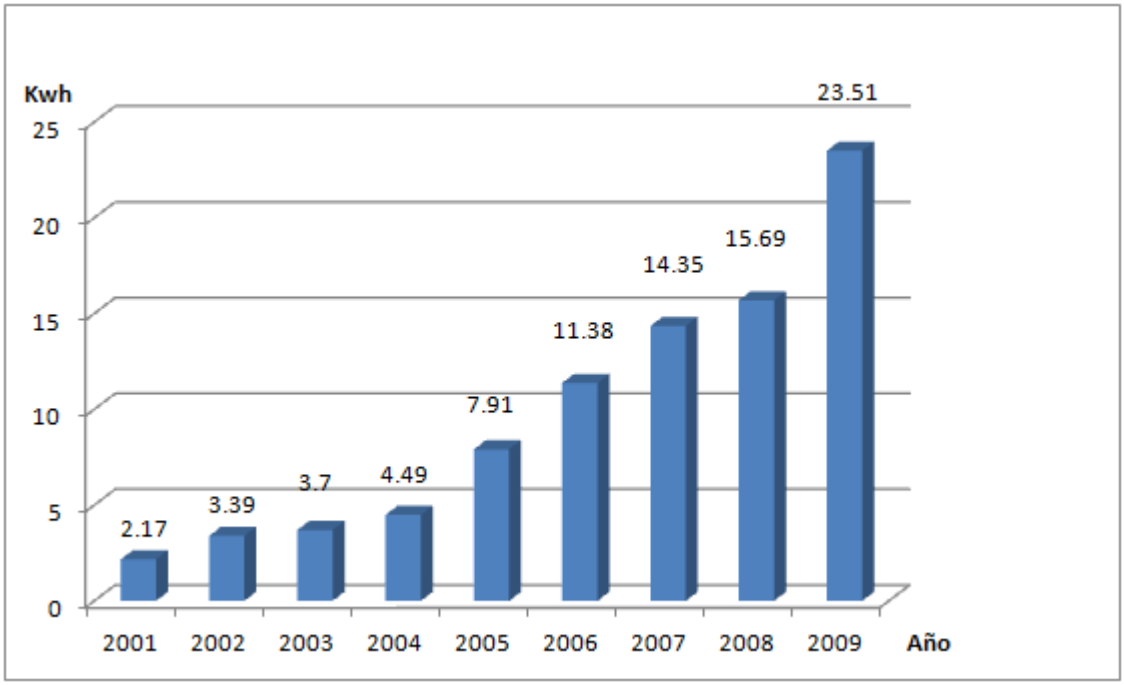

Figura 2.32 Crecimiento de la capacidad WtE en China (Dong, 2011)

En el este de China se localizan mas plantas WtE, especialmente en las regiones de Changjiang y Pearl River Deltas. Desde 2009, tres provincias en esos dos distritos, Zhejiang, Guangdong y Jiangsu instalaron 21, 17 y 14 plantas respectivamente. Estas plantas constituyen el 63% de la plantas en China. Estas pueden ser expandidas con un desarrollo económico relativamente rápido en estas provincias. Las plantas son construidas con frecuencia en grandes sitios con altas tasas de generación de generación de RSU como Guangzhou, Shenzhen, Beijing, Shanghai, Hangzhou, Wuxi, Xiamen, etc.

La Figura 2.33 muestra la escalera de gestión de RSU en china y posiciona a las provincias según su jerarquía de gestión de residuos por la cantidad de RSU que depositan en vertederos. De acuerdo con la escalera los países con el porcentaje mínimo de RSU vertidos en rellenos sanitarios está en la parte superior de escalera, las provincias que dependen de los vertederos están en la parte inferior. En la escalera también se puede observar la utilización de rellenos sanitarios regulados y no regulados, también podemos ver que los que están en la parte superior han hecho un mayor esfuerzo por utilizar los recursos con plantas tipo WtE y compostaje.

Las tecnologías de incineración utilizadas en china son muchas, las más populares son las de parrilla (por ejemplo la planta de incineración Pludong localizada en Shangai y la planta de incineración Changping localizada en Beijing), horno rotatorio (por ejemplo la planta de incineración Langgang en la provincia de Guangdong) y de lecho fluidizado (por ejemplo la planta de incineración Xiaoshan localizada en la provincia de Zhejiang). En comparación con Europa en donde la mayoría de las plantas en operación son sistemas de parrilla móvil en China se utiliza los de rejilla de fogón de puerta mecánica y tecnología de lecho fluidizado para residuos municipales, de los cuales suman el 80% de los sistemas existentes.

De acuerdo con un estudio preliminar de 100 plantas WtE en funcionamiento o en construcción, la mayoría de las incineradoras de RSU son del tipo de parrilla móvil de combustión ("quema masiva"), y están basadas en las tecnologías importadas o nacionales. Los incineradores DFB incineran RSU con hasta un 15% de polvo de carbón en peso y han sido desarrollados por centros de investigación académicos chinos, tales como la Universidad de Zhejiang, la Academia China de Ciencias (CAS) y la Universidad de Tsinghua. La mayoría de las nuevas plantas se basan en el diseño de parrilla.

La capacidad de las plantas WtE construidas en años anteriores fue en general de menos de 800 toneladas / día (725 toneladas / día). Sin embargo, las plantas WtE recientes son más grandes, típicamente por encima de 1,000 toneladas / día (907 toneladas / día). La capacidad de una sola línea dentro de una planta también ha aumentado, de las 200 toneladas / día (181 toneladas / día) en los primeros años a más de 500 toneladas / día (453 toneladas / día) en los últimos años.

La mayoría de los sistemas de control de contaminación del aire construidos en las plantas de energía a partir de residuos chinas son similares a los sistemas de control de gas predominantes en los EE.UU.: son una combinación de lavador semi seco, inyección de carbón activado (para eliminar los metales y compuestos orgánicos volátiles) y filtro de bolsas de tela (para eliminar la materia en partículas). En algunas plantas de energía a partir de residuos, la reducción no catalítica selectiva se incluye para eliminar los óxidos de nitrógeno, tales como, por ejemplo, las plantas WtE bajo el diseño de Guangzhou, Shantou, y Chongqing.

Un problema importante que enfrentaron las incineradoras occidentales en la década de 1980 fue el descubrimiento de las emisiones elevadas de dioxinas. Por ejemplo, las plantas de energía a partir de residuos de Estados Unidos en 1989 emitieron un total de 1,000 gramos de dioxinas tóxicas equivalentes (gramos TEQ), correspondientes a 100 nanogramos de TEQ por metro cúbico estándar de gas de la chimenea. Esto llevó a la regulación USEPA de Tecnología de Control Máximo Alcanzable (MACT) que dio lugar a la adaptación de unas 90 plantas de energía a partir de residuos en los EE.UU. y el cierre de cerca de 50 plantas pequeñas.

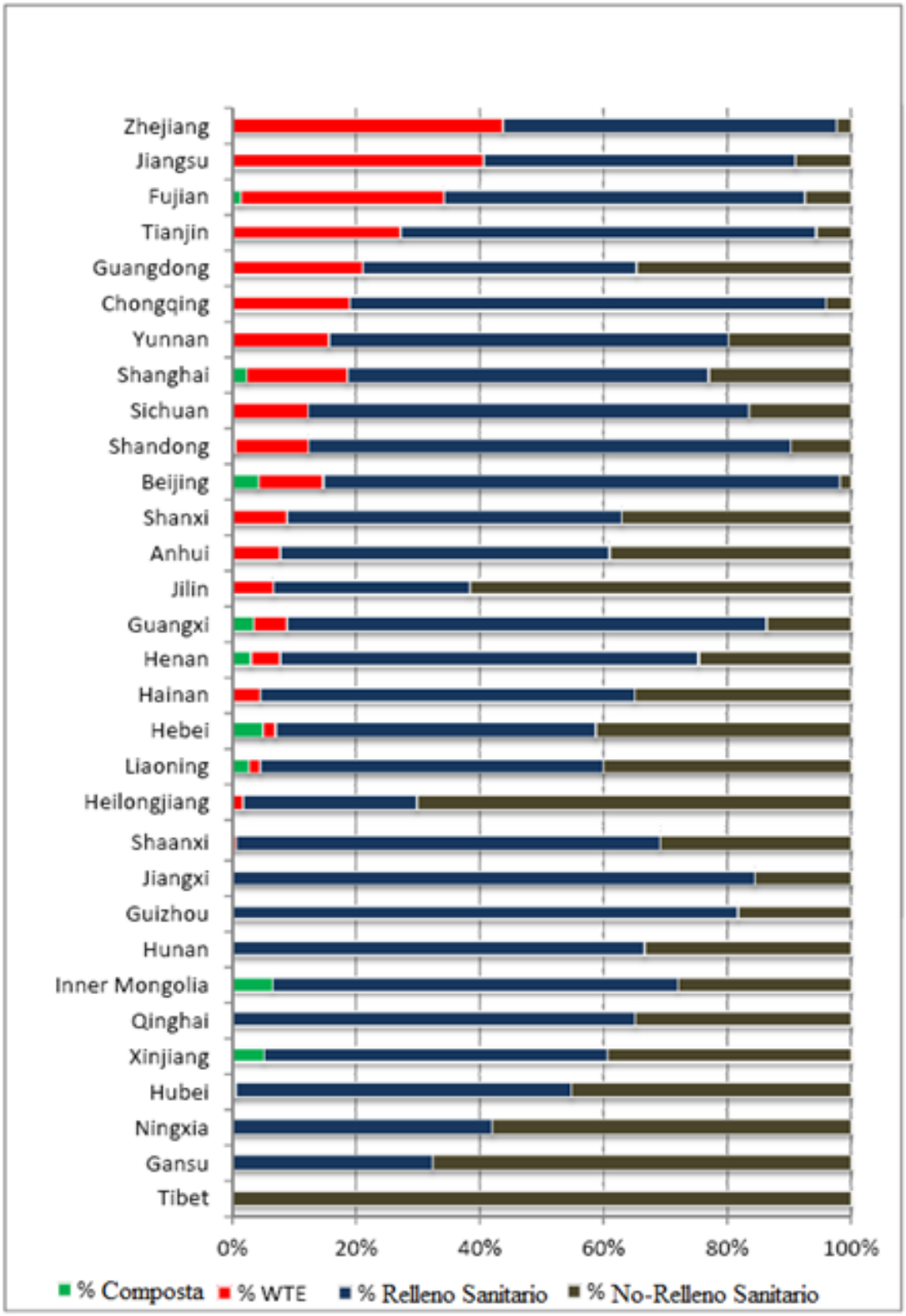

Figura 2.33 Escalera de gestión sustentable en China (Dong, 2011)

Las emisiones de dibenzo-p-dioxinas y dibenzofuranos policlorados (dioxinas) de 19 incineradoras de RSU en China fueron investigados por la Academia China de Ciencias (CAS). Dieciséis parrillas de fogón y tres incineradores de lecho fluido circulante con capacidades de 150 a 500 toneladas / día (136 a 453 toneladas / día) fueron examinados. Los sistemas de control de la contaminación de las nueve parrillas de combustión de las plantas de energía a partir de residuos consistieron en depuradores semi secos, la inyección de carbón activado y cámara de filtros de tela, las otras siete plantas no utilizaban la inyección de carbón activado. Los resultados de este estudio mostraron que las emisiones de dioxina de estos 19 incineradoras de RSU osciló desde 0.042 hasta 2.461 nanogramos TEQ / Nm^3.

Los niveles de emisión de dioxinas de las tres incineradoras RSM fueron superiores a los 1 ng EQT-I/Nm^3, que es la norma de emisiones en China. Sólo seis incineradoras de RSU tenían niveles de emisión de dioxinas por debajo de 0.1ng EQT-I/Nm^3, que es el límite de emisión en Europa, los EE.UU. y otros países desarrollados. Por lo tanto, el promedio de emisiones de dioxinas de las incineradoras chinas varió de ser tan bajo como plantas de Europa y los EE.UU. a ser 24 veces el estándar occidental. Teniendo en cuenta la gran cantidad de producción de RSU en China, las emisiones de dioxinas de algunos WtE mal operados pudo haber sido un problema grave y causó una reacción pública adversa en contra de todas las instalaciones de energía a partir de residuos.

Los factores de emisión de dioxinas a la atmósfera desde estos 19 incineradoras de RSU se calcularon con un rango de 0.169-10.72 g TEQ para los RSM por tonelada con un promedio de 1.728 g EQT por tonelada los RSM (Dong, 2011).

2.6. Parámetros de control en instalaciones

2.6.1. Gas de combustión

El gas de combustión son gases que se producen como resultado de la combustión de combustibles fósiles, en nuestro caso residuos orgánicos como la madera la cual contiene carbón. Estos gases se descargan en la atmósfera a través de una chimenea los cuales están compuestos por: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), etc. Los gases de combustión tienen estándares para el control del deterioro de la calidad del aire, los cuales son controlados por la separación de partículas. Se consideran partículas las cenizas volantes en el horno, los componentes condensados, los reactivos y los productos formados como consecuencia de otros procesos de limpieza de gases.

Si una planta nueva se encuentra en una zona que no llega a la calidad del aire estandarizada, las emisiones de partículas y opacidad permisibles se verán notablemente reducidas. Un equipo de control de partículas debe:

- ✓ *Retirar las partículas del flujo de humos.*
- ✓ *Impedir que se puedan reintegrar al flujo de humos.*
- ✓ *Descargar el material recogido.*

Los equipos disponibles para el control de partículas son:

- ✓ *Precipitadores electrostáticos.*
- ✓ *Filtros de tela o cámaras de sacos.*
- ✓ *Colectores mecánicos.*
- ✓ *Depuradores Venturi (Fernández, 2009)*

En Austria los sistemas para el control de la contaminación del aire son los siguientes:

1. **Depuración del aire**

   Los sistemas de control de emisiones son los siguientes:

- Precipitador electrostático para reducir el polvo
- Instalación de descontaminación de humos, de dos pisos (para reducir SO_2, el HC_1, y el HF)
- Separador de polvo fino
- Equipo de SCR-DeNO_x (basado en la reacción catalítica selectiva y en el amoniaco). (GREENPEACE, 1999)

En los sistemas de control de combustión es necesario el practicar una serie de pruebas para determinar el exceso de aire deseado y la correspondiente relación aire-combustible en todo el rango de variaciones de la carga, dando mínima o máxima. Después de esto se deberá ajustar el control del flujo de aire a fin de que mantenga la relación necesaria a las varias cargas. En aquellas instalaciones donde el exceso de aire se lleve más bien bajo, se deberá tener cuidado de que la alimentación de combustible no se incremente más rápidamente que la de aire al ocurrir un cambio repentino de carga ya que esto podría originar una situación peligrosa al ahogarse los fuegos. Similarmente al ocurrir una súbita reducción en la carga y el suministro de combustible quede reducida más de prisa que el del aire, se pueden apagar los quemadores y se tendrá también la posibilidad de una explosión.

2. **Precipitadores electrostáticos (PE)**

Un precipitador electrostático es un dispositivo que usa una descarga eléctrica para quitar gotas de líquido o de partículas sólidas de un gas, usualmente aire, en el que están suspendidas (Plonus, 1994). El campo eléctrico que forza a las partículas cargadas hacia las paredes, proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo.

Una vez que las partículas son recolectadas sobre las placas, deben ser removidas de las placas sin que se re-encaucen en la corriente de gas. Esto se logra usualmente desprendiéndolas de las placas, permitiendo que la capa de partículas recolectada se deslice hacia una tolva desde la cual son evacuadas (EPA, 1999b).

Las aplicaciones y características funcionales de los precipitadores electrostáticos son:

- ***Energéticas.-*** Como el carbón es el combustible más común empleado en la generación de vapor, la utilización más extendida de un colector de partículas es la recogida de las partículas de ceniza del carbón, siendo el más utilizado el precipitador electrostático (PE).

- ***Industriales.-*** En unidades de tipo industrial que no queman carbones, en las que los PE han tenido éxito son:

  - ✓ Los incineradores de basuras municipales.
  - ✓ Las calderas que queman madera, cortezas y aceites.

Para estos combustibles, la resistividad de sus cenizas en humos es menor que la del carbón, por lo que las partículas se pueden colectar fácilmente con un PE de tamaño modesto. El parámetro que más contribuye a la baja resistividad de sus cenizas, es el contenido en humedad de las basuras, maderas y cortezas, junto con el carbono, ceniza y combustible no quemado que tenga el residuo.

- ***Pulpa y papel.-*** En la industria de la pulpa y del papel, los precipitadores electrostáticos se usan en las calderas energéticas clásicas y en las recuperadoras.
  - ✓ Los requisitos de emisiones de partículas en calderas energéticas clásicas son los mismos que los aplicados a calderas industriales que utilicen los mismos combustibles.
  - ✓ En las calderas recuperadoras, los precipitadores se utilizan para capturar el polvo de sal residual presente en los gases; una caldera recuperadora, en lo que al precipitador se refiere, constituye una aplicación singular debido al pequeño tamaño de las partículas y a la tendencia de la ceniza a aglomerarse entre sí.

  La resistividad de las partículas es baja, de modo que se pueden colectar fácilmente en el PE.

Como las partículas son muy pequeñas en tamaño, el by-pass de los gases alrededor de las placas colectoras y el arrastre de las partículas golpeadas por los gases, son cuestiones a tener en cuenta en el diseño. El arrastre de partículas por los gases se minimiza con velocidades de humos menores. Debido a las características de las partículas del *polvo de sal*, para retirar este desde el precipitador se emplea un transportador de cadena con paletas, mejor que una tolva convencional, dispuesto en el suelo del precipitador. La corrosión de la chapa de cerramiento es un problema preocupante, por lo que para reducir las pérdidas de calor se requiere de un aislamiento mayor (Fernández, 2009).

3. Precipitadores electrostáticos húmedos

En algunos procesos industriales, la captura de ciertos fluidos ácidos que se componen de partículas finas, se realiza por medio de precipitadores electrostáticos húmedos, que difieren de las unidades secas convencionales, en los materiales que componen el equipo, siendo el mecanismo de captura el mismo. La operación tiene lugar a la temperatura del punto de rocío del gas húmedo y con una carga de partículas que disminuye comparada con la de las aplicaciones para calderas que queman carbón.

Para soportar la atmosfera corrosiva, la selección de los materiales con los que se construye un PE húmedo, en contacto con los humos, son:

- ✓ Superficie colectora, camisa de plomo o plástico.
- ✓ Cerramiento, camisa de plomo, ladrillo ácido, plástico o revestimiento plástico.

En lugar de un sistema de golpeo, las partículas capturadas se retiran mediante agua pulverizada o una película de agua (Fernández, 2009).

4. Filtros de Tela

En un filtro de tela, el gas residual se pasa por una tela de tejido apretado o de fieltro, causando que la materia particulada en el gas sea recolectada en la tela por tamizado y por otros mecanismos. Los filtros de tela pueden ser en forma de hojas, cartuchos, o bolsas, con un número de unidades individuales de filtros de tela encasilladas en grupo. Las bolsas son el tipo más común de filtro de tela, a los filtros de tela frecuentemente se les conoce como casas de bolsas porque la tela está configurada por lo general en bolsas cilíndricas. Las bolsas pueden ser de 6 a 9 m de largo (20 a 30 pies) y de 12.7 a 30.5 cm (5 a 12 pulgadas) de diámetro. Se colocan grupos de bolsas en compartimentos aislables para permitir la limpieza de las bolsas o el reemplazo de algunas de ellas sin tener que parar todo el filtro de tela.

La aplicación práctica de los filtros de tela requiere el uso de una gran superficie de tela para evitar una inaceptable caída de presión a través de la tela. El tamaño de la casa de bolsas para unidad en particular se determina por la selección de la relación aire-a-tela, o la relación de flujo volumétrico de aire a superficie del tejido. La selección de la relación aire-a-tela depende de la carga y características de la materia particulada y del método de limpieza utilizado. Una carga alta de partículas requerirá el uso de una casa de bolsas más grande para evitar la formación de una capa de polvo muy pesada, lo que resultaría en una caída de presión excesiva.

El funcionamiento de las casas de bolsas está determinado en otros factores, por la tela seleccionada, la frecuencia y el método de limpieza y las características de las partículas. Pueden seleccionarse telas para que intercepten una fracción mayor de particulados y algunas telas están recubiertas por una membrana con aperturas muy finas para mejorar la remoción de partículas sub-micrométricas.

La limpieza de estos filtros se lleva a cabo por chorro de aire pulsante el cual ha sido utilizado en los últimos 30 años. Los filtros de tela limpiados por chorro pulsante sólo pueden operar como dispositivos para la recolección de las capas externas de la plasta de polvo. Las bolsas están cerradas por el fondo, abiertas en la parte superior y reforzadas por retenedores internos, llamados jaulas. El gas cargado de partículas fluye al interior de la bolsa, utilizándose ocasionalmente difusores para evitar que las partículas mas grandes dañen las bolsas. El gas fluye desde afuera hacia adentro de las bolsas y de ahí hacia la salida de gas, las partículas se recolectan en el exterior de las bolsas y caen hacia una tolva debajo del filtro de tela (EPA, 2003c).

5. Colectores mecánicos

Los colectores mecánicos de polvo, son los ciclones que separan las partículas de tamaño superior a 10 micras suspendidas en los humos; para pequeños, la eficiencia de captura cae por debajo del 90%. El flujo ciclónico de humos y fuerza centrífuga dirigen las partículas hacia el exterior del flujo de humos (Figura 2.34). Las tolvas que se encuentran bajo los ciclones recogen las partículas y las llevan al sistema de retirada de ceniza.

Los colectores mecánicos son adecuados cuando las normas sobre emisiones son menos restrictivas y cuando las técnicas habituales de combustión producen partículas de tamaño mayores (eliminación de partículas).

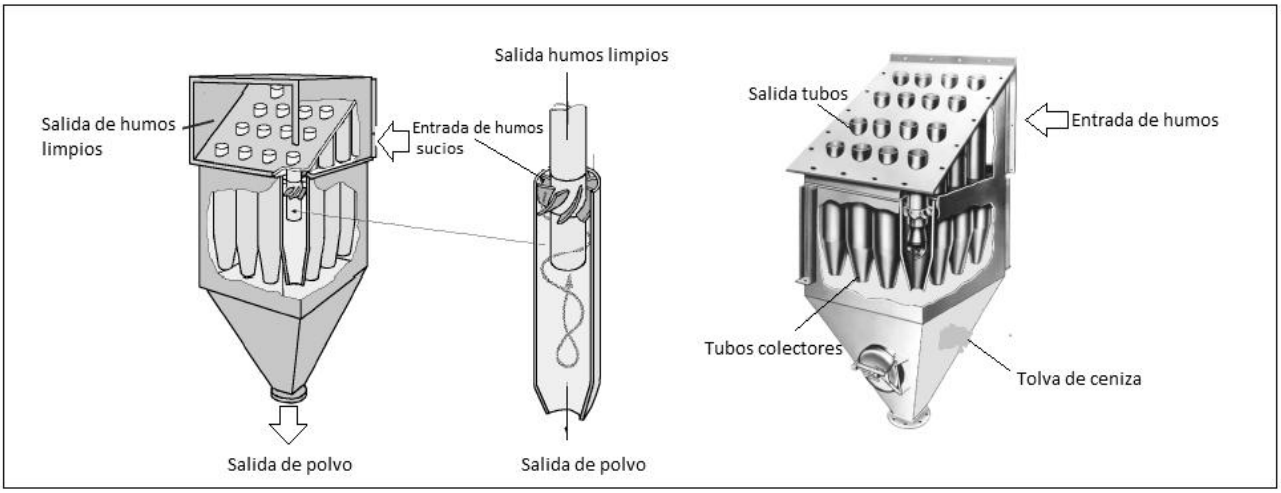

Figura 2.34 Partes de un colector mecánico (Fernández, 2009)

6. Depuradores húmedos

Un depurador es un equipo o dispositivo que permite reducir la emisión de algún contaminante.

El depurador húmedo es un filtro para abatir la contaminación atmosférica con partículas suspendidas en el aire, basado en la aspersión de agua contracorriente del flujo de aire en una torre. Esta columna o tanque puede contener esferas de poca densidad, o placas de madera, de modo tal que permitan el flujo a alta velocidad de los gases y la recolección de las partículas por el agua. Estas se separan por aparte, en un tanque sedimentador. Se pueden recoger partículas mayores de 0.05 mm, así como gases solubles. Se aprovecha el filtro para disminuir la temperatura de la emisión, aunque también pueden darse reacciones químicas entre los sólidos y el agua (Mata, 2005).

En la operación de un depurador húmedo están estrechamente relacionadas;

- La eficiencia de la captura
- El tamaño de las partículas
- La caída de presión del lado de humos

Para una eficiencia de captura dada, la caída de presión es inversamente proporcional al tamaño de las partículas de polvo, o lo que es lo mismo, para un tamaño, la eficiencia de captura aumenta cuando crece la caída de presión de la operación, como se ilustra en la Figura 2.35.

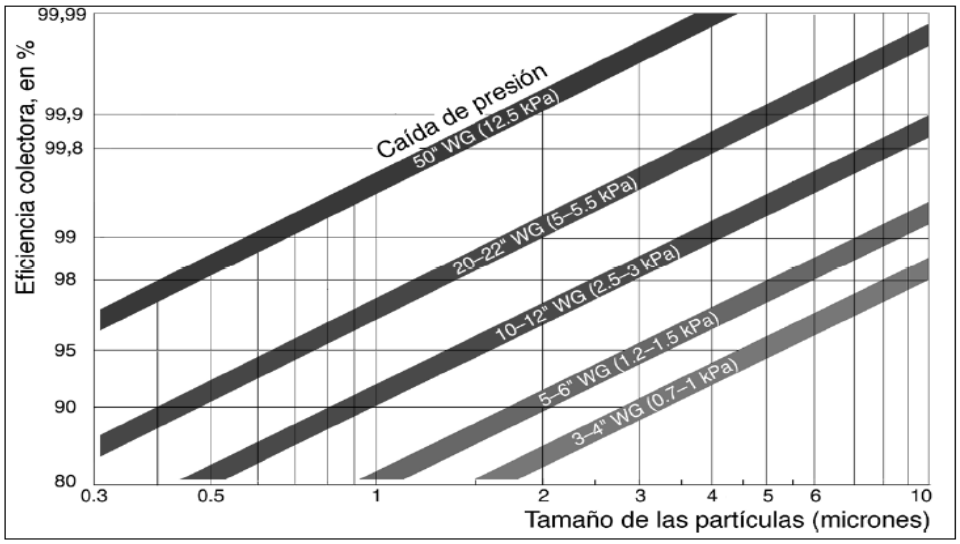

Figura 2.35 Relación entre la caída de presión, tamaño de partículas y eficiencia en un depurador húmedo (Fernández, 2009)

Para entender mejor el funcionamiento de este tipo de depuradores, se analizarán algunas de las técnicas que se aplican como:

a) *Depurador de aletas*

En el depurador húmedo de aletas (Figura 2.36), el líquido depurador se introduce como un aerosol dirigido hacia abajo sobre una disposición circular que son las

aletas de limpieza. A medida que el líquido pasa a través de las aletas, se van creando cortinas del líquido de limpieza, de forma que los humos cargados de polvo inciden sobre el depurador tangencialmente y chocan con las cortinas iniciándose la aglomeración de las partículas de forma que la de mayor tamaño se arrastran a la zona de mezcla generando un slurry o lechada que se evacúa al exterior.

Un disco instalado en el sistema de limpieza de las aletas acelera la velocidad tangencial de los humos; esta acción combinada con la inundación del líquido del aerosol origina la formación de gotas líquidas finas que encapsulan las macropartículas restantes, de menor tamaño, aglomerándolas.

Las gotas más gruesas afectan a las aletas del eliminador de niebla (humedad) y las gotas más finas se fuerzan para caer en suspensión por efecto de la gravedad y centrifugación, que actúan sobre la corriente de los humos en su salida al exterior.

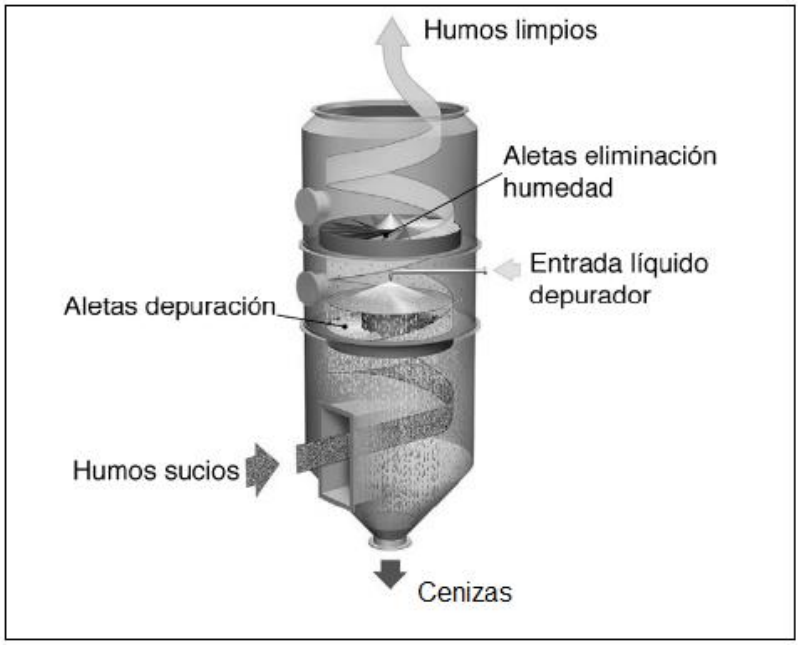

Figura 2.36 Depurador húmedo de aletas (Fernández, 2009)

b) *Depurador dinámico*

En el depurador dinámico (Figura 2.37), Los humos cargados de polvo se incorporan tangencialmente por la parte inferior de la cámara del depurador, comunicando un efecto ciclónico a la corriente. Las partículas gruesas se eliminan por combinación de las fuerzas de gravedad centrífugas.

La corriente de humos en esta zona, se encuentra con las cenizas descendentes de la cámara superior, en un estado avanzado de formación, y se moja

parcialmente, iniciándose la aglomeración. La corriente hace girar una serie de aletas del depurador, que captan las partículas de tamaño medio cuando chocan con las superficies mojadas de las aletas y se eliminan hacia abajo.

La corriente de humos, que ya contiene sólo las partículas de polvo fino, se traslada a una cámara adyacente que tiene un ventilador. El líquido se pulveriza en el ojo del ventilador, reduciendo el tamaño de las gotitas que encapsulan las partículas de polvo finas, aumentando así la aglomeración.

La corriente de humos fluye hacia la cámara superior tangencialmente a alta velocidad. Las partículas aglomeradas mojadas, forzadas por la acción ciclónica, alcanzan las paredes de la cámara y se escurren al cono-tolva interno de descarga. La corriente de humos ya seca, libre de gotitas líquidas, sale al exterior (Fernández, 2009).

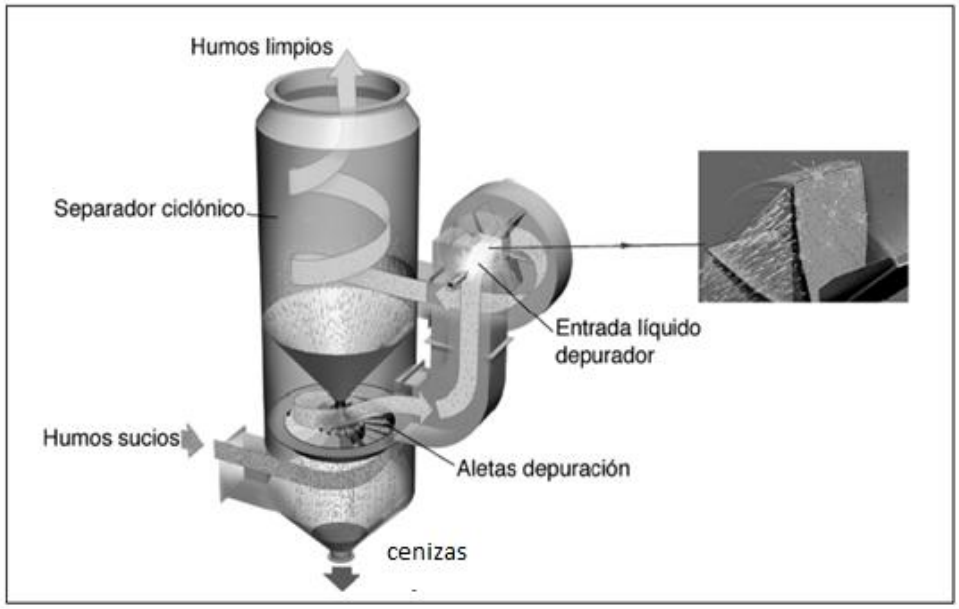

Figura 2.37 Depurador dinámico (Fernández, 2009)

c) *Depurador Venturi*

Un depurador tipo Venturi (Figura 2.38), acelera la corriente del gas de desecho para atomizar el líquido depurador y para mejorar el contacto entre el gas y el líquido. En un depurador tipo venturi, una sección de “garganta” es construida en el interior del ducto la cual forza a la corriente de gas a acelerarse a medida que el ducto se estrecha y enseguida se expande. A medida que el gas entra en la garganta tipo venturi, tanto la velocidad como la turbulencia del gas aumentan. Dependiendo del diseño del depurador, el líquido depurador es rociado dentro de la corriente de gas antes de que el gas se encuentre con la garganta tipo venturi, o en la garganta, o hacia arriba en contra del flujo de gas en la garganta. Entonces,

el líquido depurador es atomizado en pequeñas gotas de turbulencia en la garganta y la interacción entre las gotas y las partículas se aumenta.

Después de la sección de la garganta, la mezcla se desacelera, e impactos posteriores ocurren causando la aglomeración de gotas. Una vez que las partículas han sido capturadas por el líquido, la MP humedecida y las gotas de líquido en exceso son separadas por la corriente de gas por una sección de arrastre que suele consistir de un separador ciclónico y/o un eliminador de neblina (EPA, 2003a).

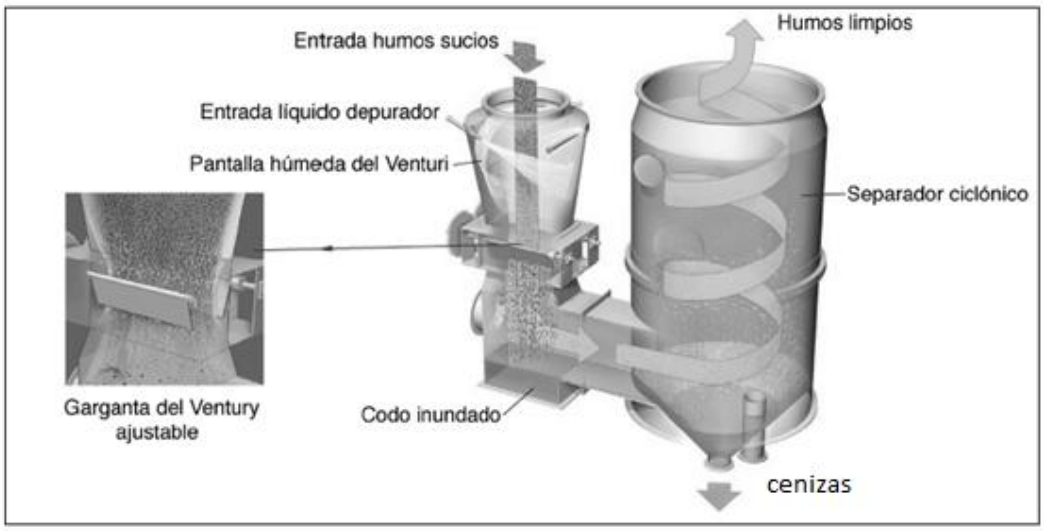

Figura 2.38 Depurador Venturi (Fernández, 2009)

d) *Depurador multi Venturi*

En el depurador multi-Venturi (Figura 2.39), los gases se dirigen hacia unas barras que crean un efecto Ventur, en donde se mezclan con el líquido del depurador pulverizado conformando una corriente fluida. El agua depuradora se rocía a través de una serie de inyectores, a baja presión, distribuyéndola uniformemente sobre la cubierta de varillas.

Los humos se aceleran rápidamente al pasar a través de la separación entre barras. Esta acción crea gotitas más pequeñas, causando la encapsulación de las partículas y aumentando la eficiencia de la colección de partículas. Tan pronto los humos abandonan la zona inferior de las barras Venturi, la velocidad se reduce y las gotitas cargadas de partículas más grandes se separan de la corriente y caen. Los humos, ya con partículas menores, se dirigen hacia una zona de dos etapas de desempañamiento mediante bafles distribuidores o de placas orientables. El agua de la limpieza se recoge antes de la sección del desempañamiento fluyendo hacia la parte inferior del depurador al canal del drenaje. Los gases limpios y secos se envían al exterior del depurador.

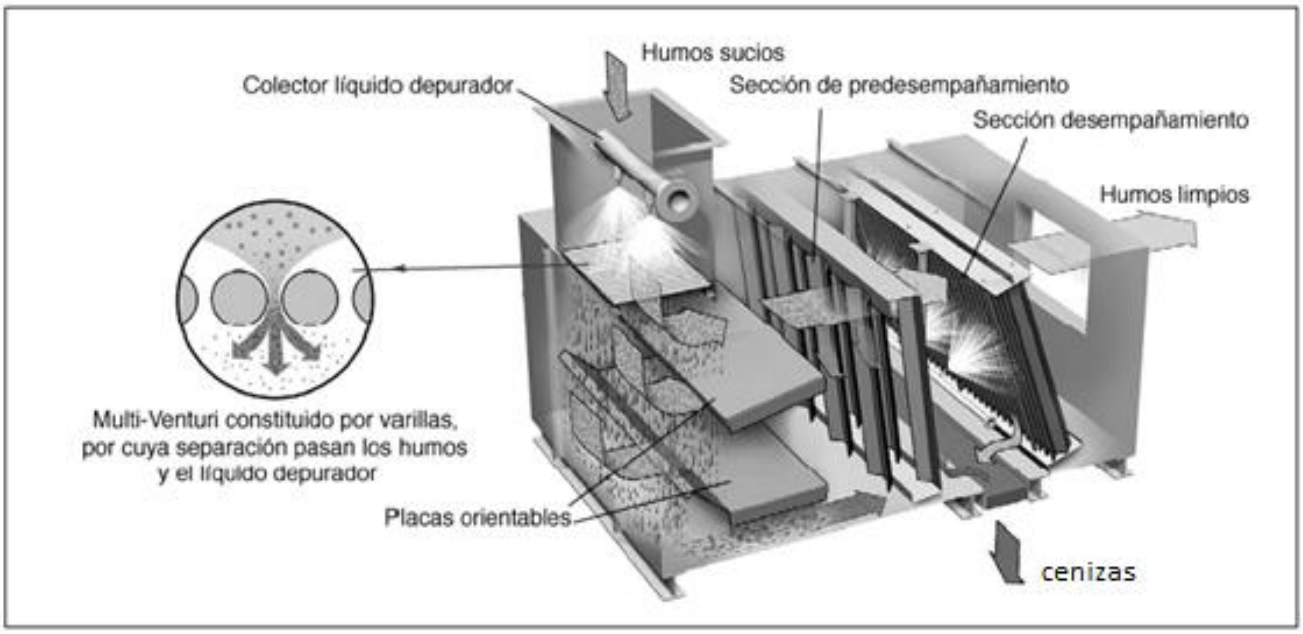

Figura 2.39 Depurador multi-venturi (Fernández, 2009)

e) *Depurador de torre de absorción*

En el depurador torre de absorción (Figura 2.40), los humos sucios entran por la parte inferior de la torre y ascienden por ella, entrando en contacto con el líquido de limpieza que se escurre a través de la columna llena. Puesto que la concentración del agente contaminador disminuye a medida que sube el gas, hay constantemente un solvente más fresco disponible para el contacto, dando por resultado una eficiente separación de partículas. Finalmente, las gotitas finas de humedad, todavía suspendidas en la corriente limpia de los humos, se separan mediante un eliminador de niebla.

El líquido depurador se recoge en un depósito y se recicla a la torre. El líquido de relleno se introduce constantemente, y el reactivo se añade, cuando se solicite, mediante una bomba dosificadora controlada por un monitor de pH (Fernández, 2009).

2.6.2. Generador de vapor

Se entiende por generador de vapor o caldera a un recipiente cerrado herméticamente destinado a producir vapor de agua a mayor presión que la atmosférica, absorbiendo el calor que desarrolla en el hogar, la combustión (Varetto, 2012).

El tipo más sencillo de control automático opera bajo el principio de “abrir-cerrar” en el cual el nivel de un tanque, cambio de presión, o cambio de temperatura, actúa permitiendo que la variable controlada proceda en toda su fuerza o se interrumpa totalmente. Este principio es usado en muchas operaciones sencillas

así como para controles de combustión en calderas pequeñas. Tiene la ventaja de ser muy seguro ya que al final de cada periodo de operación el equipo se detiene por completo y los controles pueden ajustarse para dar una eficiencia relativamente alta durante el tiempo de operación como es el caso con los controles de combustión. Sin embargo, la proporción del tiempo en operación casi nunca está en equilibrio con la demanda y por esta razón la variable a controlar oscila continuamente y la operación no puede estar al nivel más eficaz correspondiente a la carga.

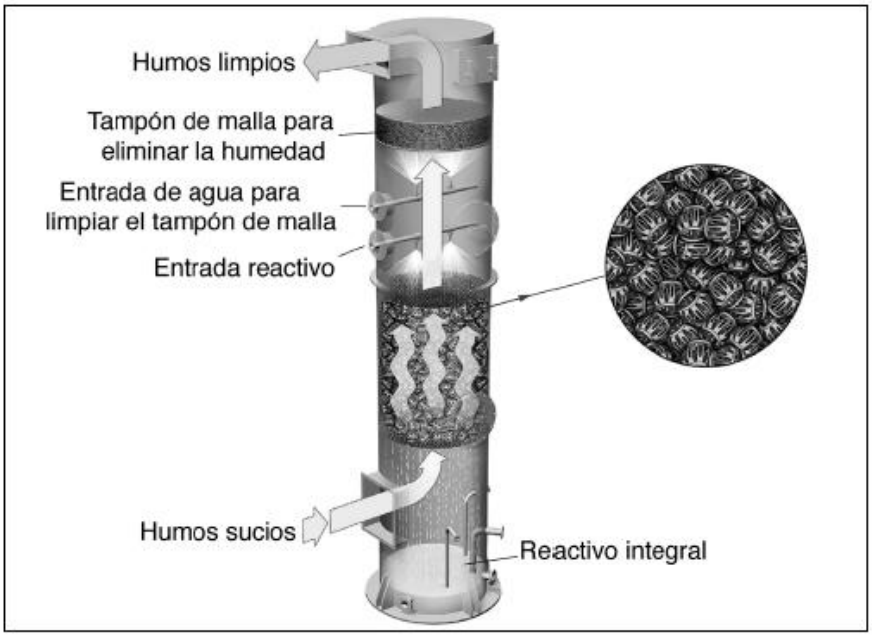

Figura 2.40 Depurador torre de absorción (Fernández, 2009)

El tipo de control más inmediato, en lo que respecta a sencillez, usa el llamado sistema proporcional, en el cual para cada desviación de valor de la variable respecto al punto de control deseado corresponde una cierta posición de la válvula reguladora u otro elemento de control. El tipo más sencillo de estos controladores utiliza una conexión mecánica directa desde el flotador, diafragma de presión, o fuelles actuados por temperatura hasta la válvula de control de compuertas o palancas. El uso de control remoto es posible con este sistema, aunque sea un poco más complicado, por medio de relevadores o unidades de potencia que amplifican las fuerzas iniciales y las transmiten a alguna distancia para operar aparatos de control remoto. Si se trata de controlar más de una variable, la correlación entre ellos, por ejemplo, entre combustible y aire, puede no ser correcta para todos los flujos, con el resultado de una eficiencia pobre o el que se desarrollen condiciones peligrosas.

Un sistema de control aún más complicado y que se basa en el principio de medición, es usado para la mayoría de las instalaciones de control de combustión

en calderas de gran tamaño así como para otros servicios importantes en donde dos o más variables deben ser controladas para operar en la relación adecuada de una con respecto a la otra. En este sistema de flujo el combustible o vapor y aire son físicamente medidos y balanceados uno en relación al otro para obtener la proporción adecuada de aire y de combustible. Esto elimina algunos de los peligros y faltas de eficiencia inherentes en el sistema posicionador ya que las inexactitudes y variaciones asociadas con las posiciones de las compuertas y el soporte de control se compensan al balancear realmente los flujos.

Cualquier sistema de control requiere inherentemente, de una variación en el valor controlado para causar el movimiento de elemento de regulación. En un sistema de control del tipo posicionador, mientras más se aleje la presión u otra variable a controlar el valor normal, más se verá el elemento de control. Sin embargo, cuando la carga sea variable, se necesitará de una mayor apertura de la válvula de control a plena carga que a baja carga y por lo tanto el punto de control será deficiente para diferentes cargas.

A medida que se haga más angosta la banda de regulación hará que el sistema tienda a hacerse más inestable debido a que el elemento de control se mueve demasiado antes de que el efecto del cambio inicial sea detectado resultando en el valor de la variable. Por medio de la introducción de un elemento reoposicionador (Reset) en el sistema de control puede llevar un rango angosto de regulación y tener aún un sistema estable. A medida que la válvula de control u otro elemento se mueve bajo el primer impulso, ella misma va reposiciona temporalmente la válvula piloto deteniendo el movimiento de la válvula de control, el mecanismo reposicionador opera gradualmente ordenando un movimiento adicional de la válvula de control; este proceso es repetido hasta que el punto de control deseado se alcanza.

La proporción en la cual se efectúa la recuperación del elemento de reposición puede, por lo general, ajustarse para conseguir que el periodo de tiempo durante el cual el valor de control permanece alejado del deseado sea el mínimo posible para las características de un sistema dado.

En sistemas de control tipo “abrir-cerrar”, la electricidad es el medio acostumbrado de operación debido a que se puede controlar fácilmente posicionadores de acción directa, se usa la acción de un varillaje u otros medios de operación mecánicos. Con un líquido o vapor entre el elemento de control y el controlador haciendo que los cambios de presión o temperatura reposicionen el controlador.

Cuando se trate de control remoto, ya sea del tipo posicionador o medidor, la elección del medio de operación tendrá que hacerse entre la electricidad y algún otro fluido tal como el aire, agua, o aceite a presión. El aire es, tal vez, el medio más comúnmente usado ya que tiene ciertas ventajas como son las siguientes: los venteos y fugas pueden ser descargados al drenaje. Aún más mediante tanques de almacenamiento de aire es posible suministrar el fluido necesario para un periodo de operación aun cuando ocurra una falla de energía, y por último, los cambios de temperatura afectan muy poco los ajustes del control. El uso de agua

como medio de operación es encontrado algunas veces en controles sencillos y en instalaciones donde se dispone de una reserva de agua a presión, tiene la desventaja, de que puede contener impurezas y de que pueda ser algo corrosiva.

El vapor de agua en el suministro de aire comprimido puede originar también muchas dificultades, especialmente en instalaciones a la intemperie. La succión del aire debe localizarse en un lugar tan frío y seco como sea posible; esto significa, generalmente, que se coloque fuera del edificio bajo un techo que la proteja de la nieve o de la lluvia. Este aire contendrá, regularmente, menos humedad en gramos por libra de aire que la encontrada en el aire que se tomara en el interior de la planta, donde probablemente esté a una temperatura mayor y haya tenido la oportunidad de recoger una cantidad adicional de vapor de agua. El aire comprimido debe hacerse pasar invariablemente a través de un enfriador después que es descargado por el compresor, y si la compresión se verifica en más de una etapa, el aire debe hacerse pasar a través de interenfriadores a fin de remover el exceso del contenido de vapor de agua originado al reducir el número de pies cúbicos de aire en el cual el vapor es contenido. El enfriamiento en la descarga del compresor cuando el aire tiene su presión máxima es, por lo tanto, el más efectivo. Debe usarse agua más fría disponible para alimentar el enfriador de descarga a fin de condensar la máxima cantidad de vapor. Las superficies de intercambio de calor de estos enfriadores deben mantenerse en las mejores condiciones, limpiándose cuantas veces sea necesario. Por medio de termómetros instalados en la descarga del aire y en la corriente de agua será posible tener una idea del funcionamiento del enfriador. Los tanques para almacenamiento de aire se instalan, frecuentemente, fuera del edificio donde el efecto del aire efectúe un enfriamiento adicional y una remoción adicional de la humedad que puede ser extraída a través de una trampa o por purgas del tanque por medios manuales.

Para fines de control en la intemperie, el aire se hace pasar a través de una unidad secadora que contiene silica-gel, alúmina activada u otro agente que absorba la humedad. Este material disminuye el contenido de la humedad en el aire a tal grado que no se condesará ni congelará aun cuando se vea expuesto a temperaturas inferiores a cero en las líneas y controles instalados en la intemperie. El material usado para absorber la humedad debe, ser renovado o reactivado periódicamente y para este fin se instala, generalmente un indicador que muestre cuándo es necesario efectuar la regeneración o reemplazo. Cuando no se usan medios para secar el aire, se usan a veces líneas eléctricas de calefacción o pequeños alojamientos con calefacción para los controles con el fin de evitar que se congelen en lugares donde la temperatura ambiente es muy baja.

El control del agua de alimentación de la caldera presenta también un problema muy complejo el cual depende del diseño de la caldera, condiciones de operación, así como de las características de la válvula de control de agua de alimentación y presión del sistema y desde luego del tipo de sistema de control aplicado, ya que el mantenimiento de nivel es el más importante propósito del sistema, en caso de que se trate un control de dos o tres elementos, se acostumbra que se ajuste de modo que opere inicialmente, principalmente influenciado por el nivel con una

regulación más bien amplia de modo que el flujo de agua no esté influenciado de una manera muy radical por cambios repentinos de nivel, debidos a cambios en la generación de la caldera. Los elementos de control adicionales, tales como el impulso originado por el flujo de vapor para cambiar el flujo del agua en proporción al flujo de vapor para cambiar el flujo del agua en proporción al flujo de vapor y el impulso opuesto originado por el incremento del flujo de agua que tiene a neutralizar el impulso originado por el flujo de vapor a medida que el flujo de agua se aproxima al vapor. Se incrementan de una manera gradual hasta obtener un buen control a través de un rango razonable de cargas y condiciones. Por medio de la inyección del agua, relativamente fría, del servicio de alimentación a la caldera en el momento en que el agua dentro de ella tiende a aumentar su volumen al aumentar la generación de vapor, el efecto del incremento de volumen se neutraliza en parte y se anticipa el incremento en la demanda de agua.

A fin de conseguir una operación segura de la caldera es esencial instalar una válvula de paro en serie con la válvula reguladora de agua de alimentación y un by-pass alrededor de la válvula reguladora para control manual de emergencia. Estas válvulas, o sus medios de operación por botones a control remoto, deben situarse de modo que permitan su rápido control por el operador, debido a que se dispone de poco tiempo para revisar el sistema o para operación manual si el control automático se abriera o cerrara totalmente. Es también necesario contar con un aparato que mantenga la válvula en una posición fija en caso de que la presión del medio de operación desapareciera.

Las válvulas sencillamente operadas por flotadores no tienen, por lo general, mucha fuerza de operación y pueden no estar bien balanceadas. Si la caída de presión a través de la válvula es mayor que la de diseño se puede llegar a tener una regulación muy deficiente. La válvula podrá aparecer como se mueve libremente y puede regular correctamente en las posiciones intermedias, pero cuando se encuentre cerca de la posición de cierre completo, no cerrará totalmente o cerrará repentinamente al predominar las fuerzas desbalanceadas que obran a través de ella, sobre la acción del flotador. Este problema se resuelve, disminuyendo la diferencia de presión a través de la válvula o mediante el uso de una válvula mejor equilibrada, el uso de un flotador mayor o dopado de un mayor brazo de palanca o mediante el uso de una válvula piloto.

2.6.3. Turbina de vapor

La función de control del turbogenerador debe hacer que este se desempeñe de manera segura, eficiente y eficaz en sus distintas etapas operativas, bajo condiciones estables de disturbio.

La función de control debe incluir y permitir al menos el desarrollo de los siguientes modos de operación:

1. **Control de velocidad.** Esta función debe realizar las siguientes acciones:

✓ Arranque de turbina:
- El estado de “abierto” del interruptor principal de generador define la entrada en operación de la presente acción.
- Comandar la aceleración de la turbina desde su velocidad en toma flecha hasta la sincronización de la unidad con base en las curvas proporcionadas por el fabricante, dependiendo del tipo de arranque: frío, tibio o caliente, como se clasifiquen; en el sentido de que la pendiente de aceleración y los tiempos de rodado en una velocidad determinada para el calentamiento del rotor son variables.
- Centrar el control sobre la válvula de admisión de vapor, la cual puede ser de una sola unidad o de un par, según el diseño y finalidad de la turbina, por lo que la función debe regular el flujo de vapor en función de la demanda de velocidad.
- Condicionar la aceleración de la turbina ante variaciones críticas de la presión en los cabezales de alta, media o baja presión, según aplique: así como por alta temperatura del vapor y alta presión diferencial en ruedas, si esto último también aplica.
- Incluir detenciones y/o retrocesos en su aceleración para la corrección de cualquier anomalía.
- Proporcionar los comandos respectivos al operador o al equipo del sincronizador para incrementar o decrementar la demanda de velocidad en forma de pulsos cuando la unidad se ubica en la zona de sincronismo, con la finalidad de alinear las fases del generador con la fase de la red eléctrica donde se conecta.

✓ Control de frecuencia.
- La función debe regular la velocidad de la turbina con base en una demanda de frecuencia.
- Debe operar en forma coordina con la función control de carga.

2. **Sincronización de la turbina.** Esta función aplica única y exclusivamente cuando las fases del generador eléctrico deben alinearse con las fases de una red eléctrica a la cual se conecta, proporcionando los comandos respectivos para sincronizar la unidad con una red eléctrica externa, o con otra unidad en forma de reparto de cargas o de caída (droop). La función debe incluir y desarrollar al menos las siguientes tres estrategias de sincronización:

a) Manual

En este modo la función debe permitir al operador la manipulación de la velocidad de la turbina para alinear las fases del generador con las fases de la red eléctrica a la cual se conecta, así como también el cierre del interruptor principal del generador, ofreciendo un monitoreo continuo de la diferencia de fases.

b) Semiautomática

En este modo la función, en coordinación con la función de control de velocidad, manipula la velocidad de la turbina para alinear las fases del generador con las fases de la red eléctrica a la cual se conecta, dejando la responsabilidad al operador del cierre del interruptor principal del generador.

c) Automática

En este modo la función, en coordinación con la función de control de velocidad, debe manipular la velocidad de la turbina para alinear las fases del generador con las fases de la red eléctrica a la cual se conecta, así como el ordenar el cierre del interruptor principal del generador.

El control de carga se define por el estado “cerrado” del interruptor principal del generador el cual define la operación de la presente función.

3. **Control de carga** en el cual se definen dos modos de operación:

a) Manual

En este modo el operador define la posición de la válvula o válvulas de control para la regulación de la carga eléctrica en el generador, mediante la manipulación de los comandos respectivos desde las estaciones de operación. No obstante, debe preservarse la protección preventiva por variaciones en los cabezales de presión alta, media y/o baja, según aplique.

b) Automática

La función debe condicionar la toma de carga ante variaciones críticas de la presión en los cabezales de alta, media o baja presión.

4. **Función de paro ordenado;** debe realizar la siguiente secuencia de acciones de forma automática sin la intervención directa del operador:

I. Desde control de carga

- Demandar carga mínima en la turbina con la relación de cambio definida por el fabricante.
- Estabilizar a la turbina en carga mínima el tiempo definido por el fabricante.
- Deshabilitación del campo electromagnético
- Demandar el decremento de velocidad en la turbina con base en la curva proporcionada por el fabricante, hasta la velocidad definida como “mínima”.
- Una vez alcanzada la velocidad “mínima”, debe ejecutarse la acción de disparo de la unidad, cerrando la válvula o válvulas de control para impedir el acceso de vapor a la turbina.

- Si la aplicación lo exige, debe mantenerse la operación en automático de la válvula de paso (*bypass*) para la regulación de la presión del vapor sobrecalentado. Las válvulas de extracción de media y baja, si aplican, deben rechazarse de su operación en automático y llevarse a la posición definida por el fabricante.

II. Desde control de velocidad

En este tipo de control se demanda el decremento de velocidad en la turbina con base a la curva proporcionada por el fabricante.

5. Control de presión

Esta función se debe desarrollar en al menos dos modos de operación, según la existencia del actuador:

a) Vapor sobrecalentado

En el proceso de la turbina de vapor se cuenta con la válvula de paso (*bypass*), quien deriva el vapor sobrecalentado directamente al condensador sin pasar por la turbina, la función debe habilitar el lazo de control de presión del vapor sobrecalentado (alta presión) sobre esta válvula, regulando la presión del cabezal al valor definido por el fabricante en base en el flujo de vapor (PEMEX, 2010).

b) Extracciones

En esta función se debe tener habiitado el control de presión en los cabezales, regulando dicha presión, de misma forma se debe regular el flujo de vapor en la extracción al valor definido por el operador.

Para mantener en operación la turbina de vapor se cuenta con un sistema de protecciones:

- Por sobre velocidad
- Por alta velocidad del control de velocidad
- Por falla de rotación en la turbina a un 20% de apertura de la válvula de control de entrada de vapor
- Por tiempo excedido en el arranque
- Por desaceleración en la turbina
- Por bajo vacío en el condensador(si aplica)
- Por baja temperatura del vapor sobrecalentado (o vapor utilizado)
- Por presencia de fuego
- Por alto nivel del condensador (si aplica)
- Por falla del sistema de control, sensores o equipo
- Por sistema de detección y diagnóstico de equipo dinámico (por alta vibración, por desplazamiento axial, por alta temperatura en los metales de chumacera de la turbina)
- Por falla en el generador eléctrico
- Por el relevador de protecciones del generador.

2.6.4. Generador sincrónico

Para poder entrar al estudio del control de un generador eléctrico es necesario definir lo que es un generador, su funcionamiento y aplicaciones. Un *generador sincrónico o alternador* son máquinas sincrónicas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna (Chapman, 2000).

En cuanto a los generadores síncronos comerciales hay dos tipos el de campo estacionario y campo rotatorio los cuales se construyen con un campo magnético de c.c estacionario o con uno rotatorio.

Un generador síncrono de *campo estacionario* tiene la misma apariencia externa que un generador de c.c. Los polos salientes crean el campo de c.c, el cual es cortado por una armadura rotatoria. La armadura posee un devanado trifásico cuyas terminales están conectadas a tres anillos colectores montados en el eje. Un juego de escobillas que se deslizan sobre los anillos colectores permite conectar la armadura a una carga trifásica externa. La armadura es impulsada por un motor de gasolina, o alguna otra fuente de potencia motriz. Conforme gira, se induce un voltaje trifásico, cuyo valor depende de la velocidad de rotación y de la corriente directa de excitación en los polos estacionarios. La frecuencia del voltaje depende de la velocidad del número de polos en el campo.

Un generador síncrono de *campo rotatorio* tiene una armadura estacionaria llamada estator. El devanado trifásico del estator está conectado directamente a la carga, sin pasar por grandes y poco confiables anillos colectores y escobillas. Un estator estacionario también facilita el aislamiento de los devanados porque no están sujetos a fuerzas centrífugas a este tipo de generador también se le llama alternador (Figura 2.41). El campo es excitado por un generador de c.c, casi siempre montado en el mismo eje (Wildi, 2007).

En generadores grandes se utilizan excitadores sin escobillas para suministrar la corriente de campo c.c a la máquina. Un excitador sin escobillas es un generador c.a pequeño cuyo circuito de campo está montado en el estator y su circuito de armadura está montado también en el eje del generador y se incluye en el circuito principal de campo c.c. Controlando la pequeña corriente c.c de campo del generador excitador (localizado sobre el estator]), es posible ajustar la corriente de campo de la máquina principal sin anillos rozantes ni escobillas. Puesto que nunca existen contactos mecánicos entre el rotor y el estator, un excitador sin escobillas requiere mucho menos mantenimiento que los anillos rozantes y escobillas.

Para que la excitación de un generador sea completamente independiente de cualquier fuente de potencia externa, se incluye con frecuencia un pequeño excitador piloto en el sistema.

Un excitador piloto es un pequeño generador c.a de imanes permanentes montados en el eje del rotor y un devanado trifásico, montado sobre el estator. Este generador produce la potencia para el circuito de campo del excitador que, a su vez, controla el circuito de campo de la máquina principal. Si un excitador piloto

se incluye sobre el eje del generador, no se requiere potencia eléctrica externa para accionar el generador.

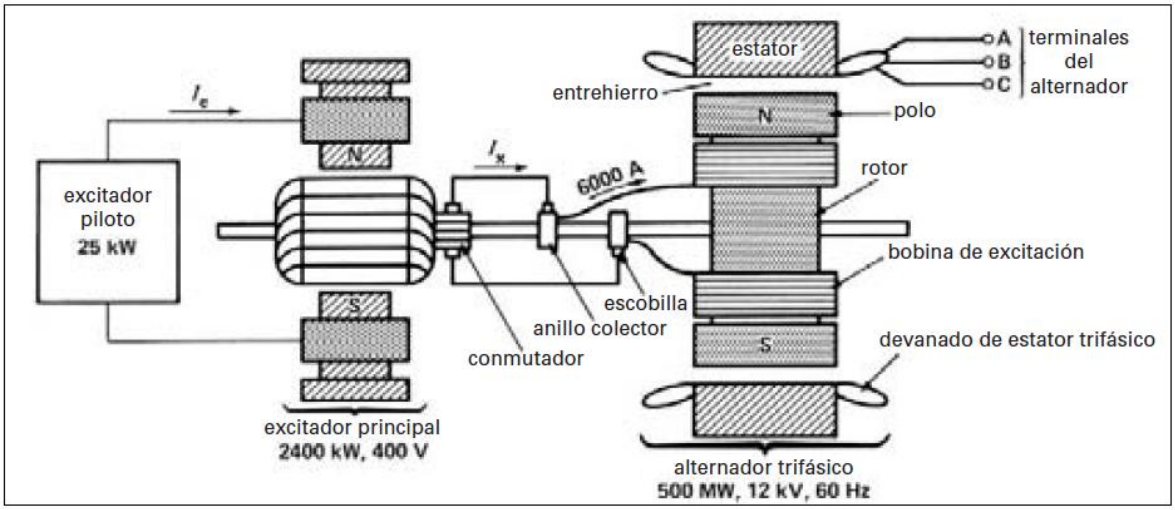

Figura 2.41 Diagrama esquemático y vista de corte transversal de un generador síncrono de 500 MW típico y excitador de dc de 2,400 kW (Wildi, 2007)

Al decir que un generador es síncrono se entiende que la frecuencia eléctrica producida está entrelazada o sincronizada con la tasa mecánica de rotación del generador. Un rotor de generador sincrónico consta de un electroimán al cual se le suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta en cualquier dirección según gire el rotor. La relación entre la tasa de giro de los campos magnéticos de la máquina y la frecuencia eléctrica del estator se expresa mediante la ecuación:

$$f = \frac{pn}{120} \qquad \text{Ec 2.34}$$

donde

f= frecuencia del voltaje inducido [Hz]

p= número de polos en el rotor

n= velocidad del rotor [r/min]

Puesto que el rotor gira con la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación con la frecuencia eléctrica resultante. Dado que la potencia eléctrica es generada a 50 ó 60 Hz, el generador debe girar a una velocidad fija que depende del número de polos de la máquina (Chapman, 2000).

2.6.4.1. Características del rotor y estator

El estator de un generador síncrono, se compone de un núcleo cilíndrico laminado que contiene un conjunto de ranuras que portan un devanado trifásico imbricado. El devanado siempre está conectado en Y y el neutro está conectado a tierra. Se prefiere una conexión en Y a una delta por lo siguiente:

- El voltaje por fase es de sólo $1/\sqrt{3}$ o 58% del voltaje entre líneas, el cual se puede expresar de acuerdo a la ecuación 2.35. Por consiguiente, se reduce la cantidad de aislante en las ranuras, lo que, a su vez, permite incrementar el diámetro de los conductores. Un conductor más grande permite incrementar la corriente y, por ende, la salida de potencia de la máquina.

$$V_T = \sqrt{3} V_\Phi \qquad \text{Ec 2.35}$$

- Cuando un generador síncrono está sometido a carga, el voltaje inducido en cada fase se distorsiona y la forma de onda deja de ser sinusoidal. La distorsión se debe principalmente a un indeseado voltaje de tercer armónico cuya frecuencia es tres veces la frecuencia fundamental. Con una conexión en Y, los armónicos de línea y neutro distorsionantes no aparecen entre las líneas porque se cancelan entre sí. Por consiguiente, los voltajes de línea permanecen sinusoidales en todas las condiciones de carga. Desafortunadamente, cuando se utiliza una conexión delta los voltajes armónicos no se cancelan, sino que se acumulan. Como la conexión delta es cerrada, producen una corriente circulante de tercer armónico, la cual incrementa las pérdidas eléctricas I^2R.

Este tipo de generadores se construyen con dos tipos de rotores: rotores de polos salientes y rotores cilíndricos lisos. Por lo general, los de polos salientes impulsados por turbinas hidráulicas de baja velocidad, y los cilíndricos, por turbinas de vapor de alta velocidad.

1. **Rotores de polos salientes.-** La mayoría de las turbinas hidráulicas tienen que girar a bajas velocidades (entre 50 y 300 rpm) para extraer la máxima potencia de una cascada. Cómo el rotor está directamente acoplado a la rueda hidráulica, y como se requiere una frecuencia de 50 a 60 Hz, se necesita un gran número de polos en el motor.los rotores de baja velocidad siempre tienen un gran diámetro a fin de proporcionar el espacio necesario para los polos, un ejemplo de estos, aparece en la Figura 2.42.
2. **Rotores cilíndricos.-** Para las turbinas de vapor se necesita una alta velocidad, esto ayuda a generar la frecuencia requerida en donde no se puede utilizar menos de dos polos lo cual fija la mas alta velocidad posible. En un sistema de 60 Hz es de 3,600 rpm, la siguiente velocidad más baja es de 1,800 rpm, que corresponde a una máquina de 4 polos. Por consiguiente, estos generadores de turbina de vapor poseen ya sea de 2 o 4 polos.

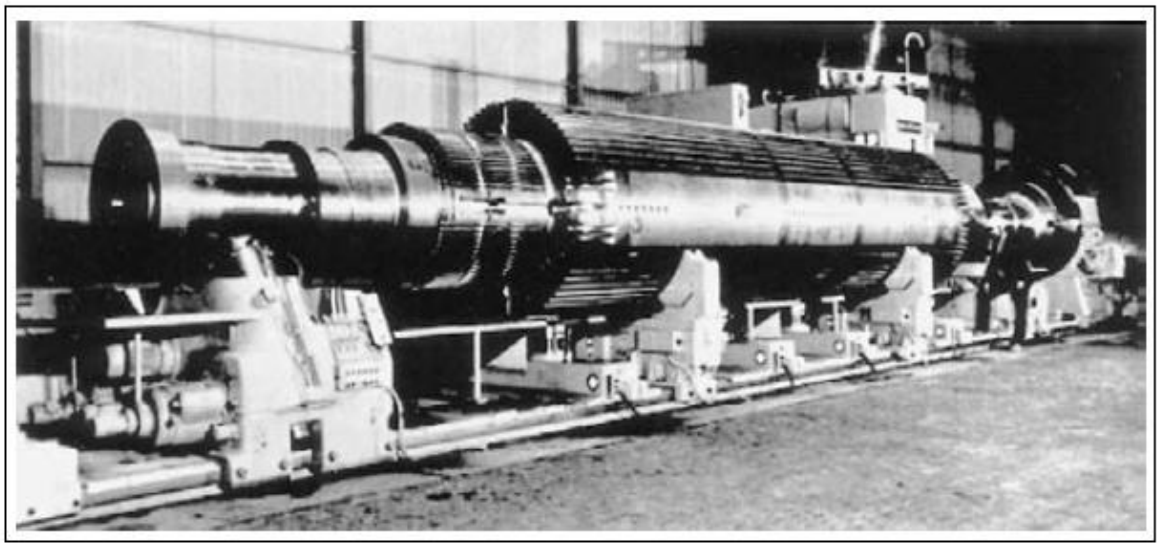

Figura 2.42 Rotor de un generador trifásico para una turbina de vapor, de 1,530 MVA (Wildi, 2007)

2.6.4.2 Protecciones convencionales en un generador síncrono

El sistema de protecciones de un generador síncrono se diseña de acuerdo a su capacidad, tamaño e importancia dentro del sistema de potencia.

En la Tabla 2.10 se muestra la localización y los tipos de problemas que puede presentar un generador síncrono (Moreno y Paniagua, 2010).

Tabla 2.10 Problemas en un generador síncrono (Moreno y Paniagua, 2010)

Localización	Tipo de problema
Devanado estatórico	Falla entre fases, falla a tierra, falla entre espiras, circuito abierto, sobrecalentamiento, sobretensiones
Devanado de campo	Aterrizamiento de los devanados, devanados de campo abiertos, sobrecalentamiento
Otros sistemas	Sobrevelocidades, vibraciones, motorización, pérdida de excitación

1. Protección diferencial para fallas entre fases

Una falla de fase en el devanado del estator del generador es siempre considerada como seria debido a las altas corrientes encontradas y el daño potencial a los devanados de la máquina, así como a las flechas y el acoplamiento. Por lo tanto, es muy importante minimizar el daño debido a fallas en el estator.

Un método estándar para este tipo de fallas es la protección diferencial y comúnmente se encuentra en unidades generadoras de 1 MVA en adelante. Para

este tipo de generadores se utiliza el esquema de protección diferencial de porcentaje variable como se muestra en la Figura 2.43.

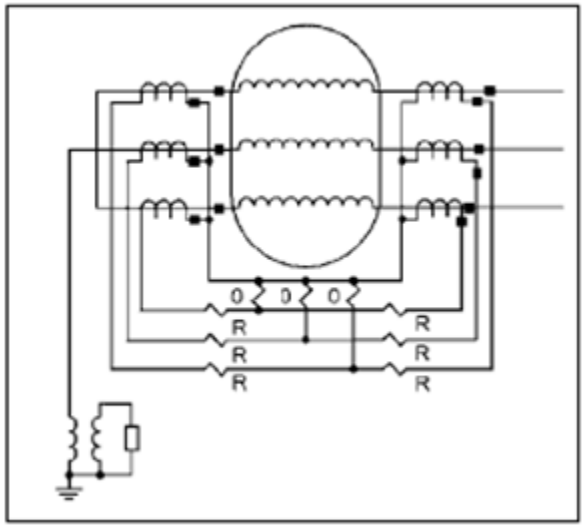

Figura 2.43 Conexión del relevador diferencial de porcentaje de pendiente variable (IEEE, 2003)

Estos relés se identifican internacionalmente por el número 87. En estos elementos la pendiente puede variar desde 5 a 50%. Un relé de porcentaje fijo está normalmente entre el 10 y el 25%.

2. Protección convencional para fallas a tierra

El núcleo del estator se ve forzadamente comprometido cuando tiene lugar un cortocircuito entre fase y tierra de un generador, debido a que independientemente de la conexión del neutro del generador con respecto a tierra, la carcasa del generador se encuentra conectada a tierra. El daño que origina el cortocircuito a tierra en láminas del estator está sujeto a la intensidad de la corriente de cortocircuito y al tiempo que circula dicha corriente.

La intensidad de la corriente que circula, para un cortocircuito de fase a tierra en el estator, está condicionada por el tipo de conexión que tiene el neutro del generador.

Las protecciones más empleadas en estos casos son:

a) Relevador diferencial.

Para este tipo de falla es común encontrar el relé diferencial 87N el cual está conectado para recibir una corriente diferencial en el circuito de la bobina de operación mediante el transformador de corriente en los terminales (RCL) y corriente del neutro a través del transformador de corriente (RCN) entre el neutro ($3I_o$) del generador en su circuito de polarización.

b) Esquema de sobretensión/corriente de neutro.

El esquema de protección más usado en sistemas puestos a tierra con alta impedancia, consiste en un relé de sobretensión con retardo de tiempo (59GN) conectado a través del resistor de puesta a tierra para sensar tensión de secuencia cero (Figura 2.44).

El relé usado para esta función está diseñado para ser sensible a una tensión de frecuencia fundamental e insensible a una tensión de tercer armónico y a otras tensiones armónicas de secuencia cero, que están presentes en el neutro del generador.

Puesto que la impedancia de puesta a tierra es grande comparada con la impedancia del generador y otras impedancias en el circuito, la tensión total fase-neutro es vista a través del dispositivo de puesta a tierra con una falla fase tierra en las terminales del generador. La tensión en el relé es función de la relación del transformador de distribución y del lugar de falla. La tensión es máxima para una falla en terminales y disminuye en magnitud a medida que la falla se mueve de los terminales del generador hacia el neutro. Típicamente, el relé de sobretensión tiene un ajuste de pickup mínimo de aproximadamente 5V (IEEE, 2003).

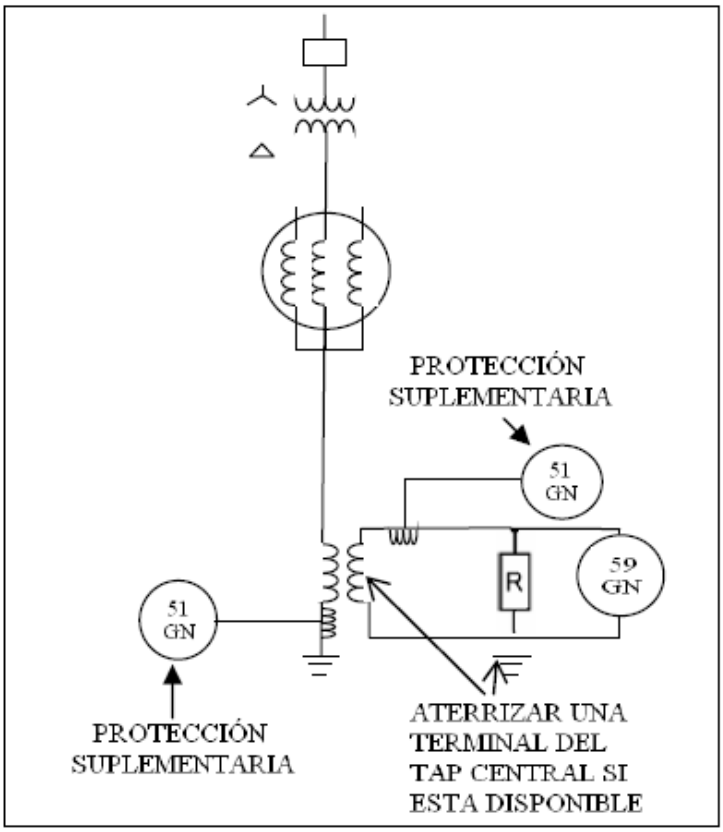

Figura 2.44 Protección de voltaje de secuencia cero (IEEE, 2003)

c) Protección convencional del 100%.

La protección convencional para detección de falla a tierra del estator en sistemas puestos a tierra con alta impedancia es adecuada, pero sólo proporciona protección sensible para únicamente alrededor del 90% del estator. Esto es debido a que la falla en el porcentaje restante del devanado, cerca del neutro, no causa suficiente tensión y corriente residual de 60 Hz para operar estos relés. Es importante proteger todo el generador con un sistema de protección de falla a tierra adicional de tal forma que se cubra el 100% del devanado. Las técnicas para la detección de fallas a tierra que cubran el 100% del devanado del estator pueden ser divididas en dos categorías: técnica basada en tensión de tercer armónico e inyección de tensión residual o de neutro.

d) Técnica basada en tensión de tercer armónico.

Las componentes de tensión de tercera armónica están presentes en las terminales de casi todas las máquinas en diferentes grados; se presentan y varían debido a las diferencias en el diseño y fabricación. Las tensiones de tercera armónica medidas en el neutro en terminales del generador o en ambos son usadas para proporcionar protección.

Las corrientes de tercer armónico en el generador se encuentran en fase y sus resultantes es el triple del valor del armónico (fundamental). Esta corriente pasa por el neutro y puede producir un disparo inesperado si el relé no incorpora un filtro que elimine el tercer armónico. En casi de falla externa, circula una corriente por el esquema diferencial (para una protección convencional), y la tensión en bornes del relé es reducida. En el supuesto de falla interna, no puede establecerse esta circulación de corriente y aparece una tensión elevada en bornes del relé de tensión.

e) Inyección de tensión residual o de neutro.

Otro sistema más sofisticado consiste en la inyección de subarmónicos en la puesta a tierra del neutro. Normalmente se trata de una tensión con una frecuencia distinta de la fundamental y que no coincida con ningún subarmónico. En condiciones normales, mientras no exista un contacto a tierra, apenas circula corriente de esta frecuencia. Solo en caso de contacto a tierra se cierra el circuito.

3. Protección contra cortocircuitos entre espiras de igual fase y fases abiertas

Esta clase de cortocircuito no surge en grandes generadores que poseen una vuelta por fase por ranura; además, no pueden ser detectados a través de la protección diferencial longitudinal, debido a que ésta se basa en el principio de comparación serie, y en este caso, por ser una perturbación serie no existe diferencia entre la corriente que circula por el comienzo de la fase y la que circula por el final.

El sistema de protección que se aplica para esta clase de cortocircuito depende de la disposición constructiva del generador. La protección difiere en el caso de un generador con dos enrollados por fase o con un solo enrollado por fase.

4. ***Protección contra sobrecalentamiento del estator***

Las principales causas del sobrecalentamiento del estator de un generador radican en:

- Desperfecto en el sistema de refrigeración
- Sobrecarga
- Cortocircuito de varias láminas del estator.

Es usual la protección contra sobrecalentamientos del estator mediante relés del tipo imagen térmica diseñados para reproducir las condiciones de calentamiento que originan las corrientes estatóricas y que al llegar a una cierta temperatura de ajuste cierra sus contactos. Esta protección cuenta con la desventaja de solamente operar para sobrecalentamientos originados por una sobrecarga y no protege contra los sobrecalentamientos producidos por desperfectos en el sistema de refrigeración o por circuitos de las láminas del estator.

5. **Protección para circuito abierto**

El circuito abierto en el rotor pocas veces sucede, pero de igual manera es necesario implementar una protección para esta situación debido a que en la apertura se forma un arco eléctrico que puede ocasionar daños en el núcleo del rotor.

6. **Protección contra sobrecalentamiento del rotor**

La circulación de corrientes de secuencia negativa en el estator de un generador, producidas por cortocircuitos asimétricos interno o externos al generador y cargas desequilibradas, originan un campo rotatorio que gira con una velocidad igual al doble de la síncrona con respecto al rotor e inducen en el hierro de este, corrientes de una frecuencia doble con respecto a la fundamental.

7. **Protección contra vibración**

Se proporcionan contactos para disparar los interruptores principal y de campo si la vibración es mayor que la asociada con transitorios de cortocircuito normales para fallas externas a la unidad.

8. **Contra motorización**

El efecto de un desperfecto en la máquina motriz es que el generado comienza a operar como motor tomando energía del sistema (Moreno y Paniagua, 2010).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Prototipos del caso de estudio

Generalmente los prototipos son artefactos utilizados como modelos para realizar diferentes tareas con algún interés específico. Pueden ser experimentales y/o para su producción en serie, pero siempre tienen una característica en común: son el primero de su tipo en fabricarse, ya sea un diseño inicial o el resultado de la mejora de alguno anterior. La definición formal de un prototipo está dada como el primer ejemplar o molde en que se fabrica una figura u otra cosa. También se le llama prototipo al "ejemplar más perfecto y modelo de una virtud, vicio o cualidad". (RAE, 1970).

Un prototipo también se puede referir a cualquier tipo de máquina en pruebas, o un objeto diseñado para una demostración de cualquier tipo. En este caso, dígase prototipo como plataforma experimental para uno o varios estudios posibles a realizar, se expondrá y se propondrá un prototipo el cual también será utilizado como modelo didáctico con el objetivo de hacer presentaciones a los estudiantes de forma práctica para que puedan ratificar su conocimiento sobre los modelos de generación de energía sin la necesidad de utilizar combustibles fósiles. En el uso de prototipos se centra en la idea de ayudar a comprender los requisitos necesarios para la elaboración de un proyecto a partir de la idea terminada de lo que se desea. Además de que puede usarse como patrón para saber la viabilidad de la solución pensada.

Un prototipo puede servir en diferentes fases del proyecto, por lo que su objetivo debe de ser claro; en la fase de análisis éste se usará para determinar los requerimientos de diseño, en la fase de diseño se usará para evaluar aspectos de la implementación. En la Figura 3.1 se mencionan las etapas para elaborar un prototipo.

Los prototipos forman parte importante en el proceso de desarrollo de un producto en particular. El proceso de desarrollo de producto es la secuencia de pasos que se deben de realizar tanto con las ideas, como con el diseño y la introducción del producto en el mercado. No existe un único modelo que describa la forma correcta de transformar ideas en cosas, ya que los procesos varían dependiendo de cuál es el resultado final que se desee. A pesar de eso, se pueden identificar actividades y elementos que todos tienen en común.

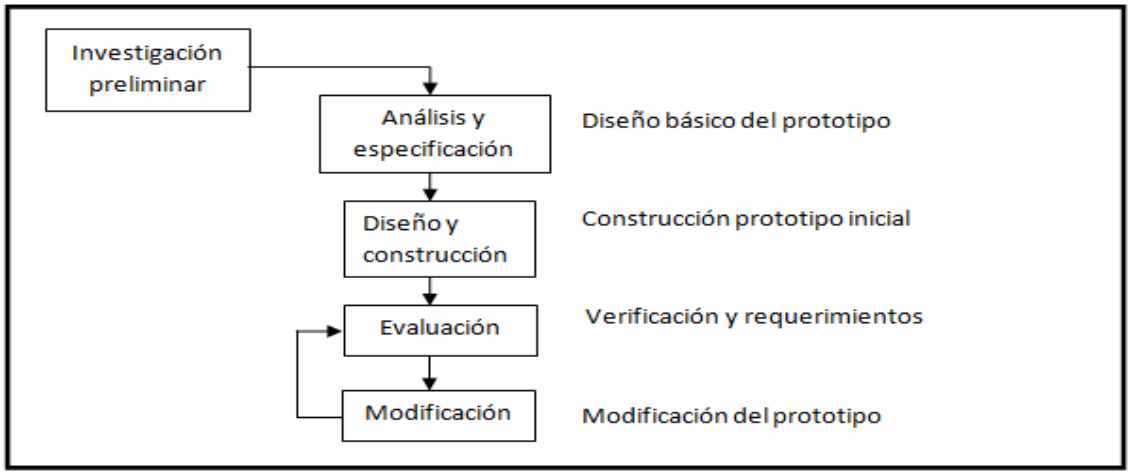

Figura 3.1 Etapas para la elaboración del Modelo de prototipo (Yáñez, 2001)

Para describir de forma general el proceso de desarrollo de productos se pueden hacer modelos permisibles en la literatura, que se pueden resumir en la Figura 3.2 combinando las sugerencias de diversos autores (Ulrich y Eppinger, 2013).

El prototipado y pruebas son la fase que requiere el desarrollo de prototipos del producto, estos son probados en orden para evaluar de la mejor forma propuesta para satisfacer los requisitos demandados. Claramente esta es la fase en la que se deben hacer las intervenciones pertinentes para mejorar el producto y por lo tanto en la evolución de la solución del diseño (Guidice y col., 2006).

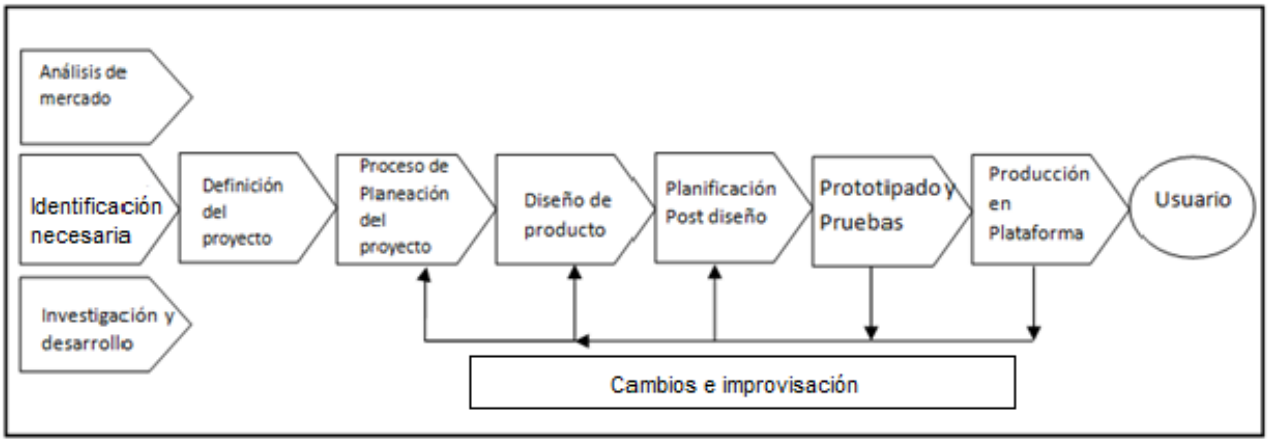

Figura 3.2 Modo secuencial del proceso de desarrollo de producto (Guidice, y col., 2006)

3.1.1. Incinerador

El incinerador está conformado por una flama estabilizada por medio de una boquilla, mantenida por una combinación de combustible y un oxidante, en este caso gas LP y aire de la atmósfera. La combustión se lleva a cabo en un espacio cerrado, compuesto por un hogar de tabique de arcilla refractaria en su interior, exteriormente está formado por una lámina de acero al carbón de calibre 18 (1.21 mm) recubierto con esmalte, está articulado con una puerta por la que se tiene acceso a la cámara de incineración. Para su funcionamiento requiere una instalación de gas con una presión de 3.5 bar. En la parte superior el incinerador tiene una chimenea de acero dulce para la liberar los gases de combustión, en el lateral derecho tiene dos cabezales con termopar para medición de temperatura de la flama del incinerador y de los gases de salida.

En el fondo de la cámara de tabique de arcilla refractaria existe un pequeño espacio para recoger las cenizas como residuo de la combustión. El sistema del quemador está localizado en el lateral izquierdo compuesto por un turbo soplador que funciona con 127 volts, con entrada de aire regulable y un quemador. Al accionar un interruptor de pedal se abre el flujo del combustible por medio de una electroválvula (Figura 3.3).

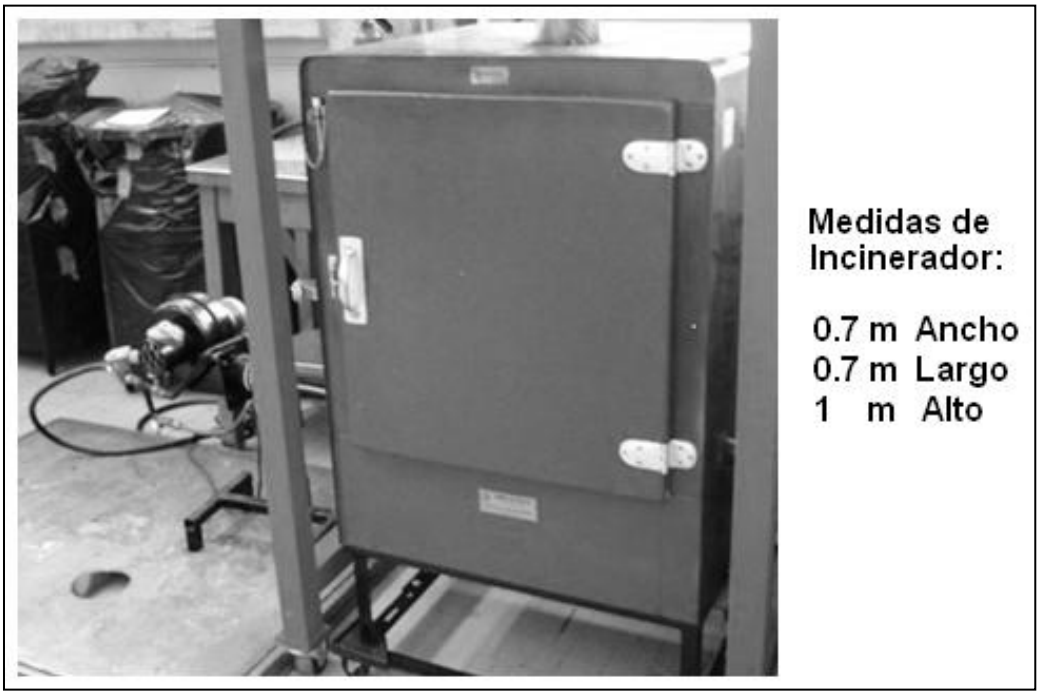

Figura 3.3 Fotografía frontal del incinerador del caso de estudio

3.1.2. Generador de vapor

Un generador de vapor es un aparato que tiene como finalidad convertir en vapor todo el contenido de su capacidad en estado líquido. Este dispositivo fue adquirido con anterioridad y se acopló arriba de la cámara secundaria del incinerador para utilizar los gases de incineración de la biomasa.

Fue diseñado para obtener una presión máxima de 9.8 bar (142 psig). Su operación es totalmente manual. Está compuesto por dos tanques, uno principal en el que se llevará a cabo el proceso de vaporización y su almacenamiento para su posterior distribución, y otro de reserva de agua que abastece el tanque principal.

En el tanque principal se recibe la energía térmica de los gases de combustión, en un inicio se diseñó con un quemador alimentado de gas LP, que distribuía toda la energía térmica por los tubos del interior de la caldera. Para controlar la entrada de agua y salida de vapor en la caldera, así como el desfogue y limpieza de la caldera para su mantenimiento, tiene los siguientes componentes:

- Válvula de entrada de agua
- Válvulas de conexiones entre tanques
- Válvula de desfogue
- Mirilla de agua
- Válvulas de nivel

Por tratarse de un recipiente que estará continuamente sujeto a alta presión se le ha colocado una válvula de seguridad al tanque primario para protección de sobrepresión, tanto al equipo como al personal que lo tenga en operación. También se ha colocado un manómetro para la constante revisión de la presión de a la que opere, tomando en cuenta que es un equipo de operación manual.

La caldera tiene una capacidad máxima de 35 litros, está hecha de acero al carbón con fluxes de acero inoxidable con acabado exterior en acero inoxidable. Opera con un fluido de trabajo de agua desmineralizada con máxima presión de 10.34 bar (150 psig), la presión de prueba es de 12.41 bar (180 psig) y la presión de disparo de la válvula de seguridad es de 13.79 bar (200 psig). Es recomendable que la entrada de los gases de incineración esten a una presión de 3.5 bar o superior.

En la Figura 3.4 se observa que el tanque de reserva (1) puede almacenar una carga de agua adicional si se requiere; la caldera (2) tiene como función generar vapor; la válvula (3) en estado abierto permite la entrada de agua; las válvulas (4) y (5) tienen como función el aislamiento del generador de vapor con el tanque de

reserva; la válvula (6) es para drenar el generador de vapor; por otro lado la válvula (7) purga de aire el tanque de llenado; las válvulas (8) y (9) soportan la mirilla de nivel de agua; las válvulas (10) y (11) purgan el aire de bajo y alto nivel respectivamente en el generador de vapor. La válvula (12) es por donde sale el vapor a presión, esta presión es medida con el manómetro (13). La válvula de seguridad (14) se abre en caso de sobrepresión en el generador de vapor y la sección (15) después del manómetro ofrece la alternativa de tomar la temperatura del vapor de salida a un termopar.

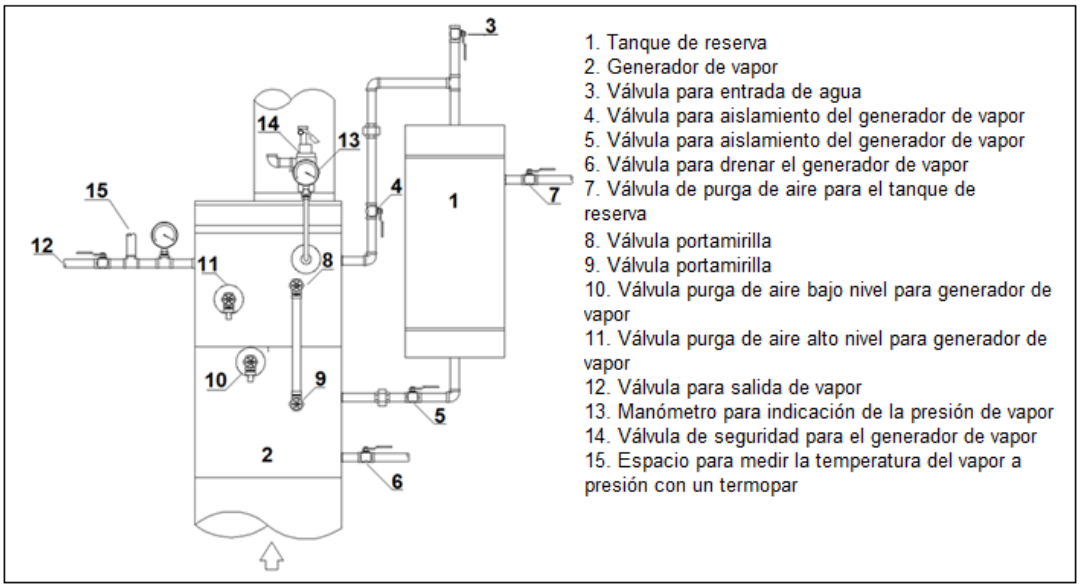

Figura 3.4 Configuración del equipo de generación de vapor del caso de estudio

3.1.3. Turbina de vapor

Toda turbina de vapor está diseñada para transformar en energía mecánica la energía contenida en el vapor de agua bajo la forma de energía térmica y de energía de presión (Lucien, 1975). Esta turbina se adquirió al mismo tiempo que el tablero en el que estaba contenida, a través de este tablero se controla el proceso de generación de energía y es a partir de algunos de sus elementos que se aprovecha la energía eléctrica generada en corriente directa o alterna si así se requiere.

La turbina modelo TUR84274-1 serie 2432421 es de tipo radial, ya que el flujo del vapor es en dirección del radio de la turbina. Esta turbina se puede clasificar como turbina de condensación, ya que el vapor después de hacer su trabajo en el habitáculo sale a un área de menor presión, en donde se condensa. La turbina es

de un solo escalonamiento, es decir la fuerza de presión del vapor sólo se aprovecha una vez (Figura 3.5).

Esta turbina debe iniciar la rotación energizando el generador para vencer el momento de inercia y que así la presión del vapor no desgaste los álabes de la turbina.

Al abrir la válvula de salida (12) de la Figura 3.4 el vapor entra en el habitáculo de la turbina (Figura 3.5) con alta presión, la cual impacta los álabes provocando el giro mecánico de los mismos. Esta fuerza mecánica es transmitida por una flecha que está conectada sólidamente a un motor síncrono, que convierte esta energía mecánica en corriente eléctrica. Para romper el momento de inercia de éste, comienza a excitarse con 12 volts de corriente directa por medio de una batería.

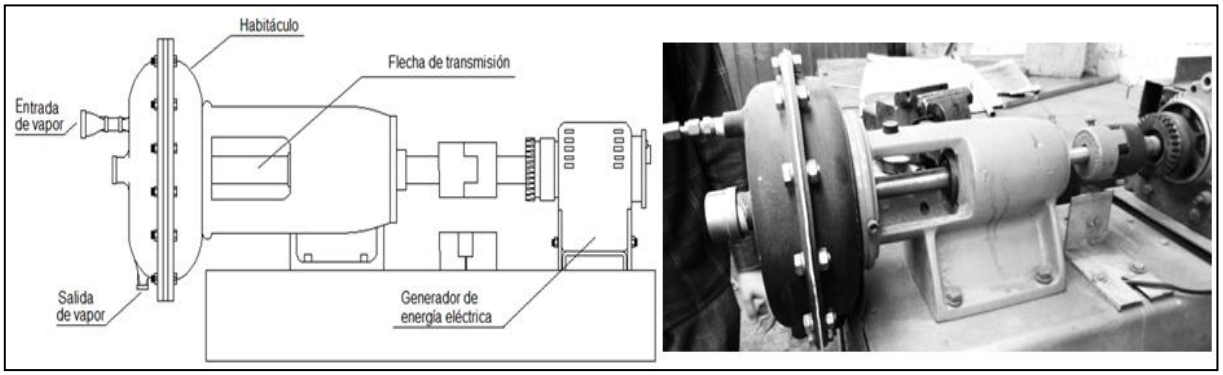

Figura 3.5 Diagrama y fotografía de la turbina de vapor modelo TUR84274-1 serie 2432421 del caso de estudio

El habitáculo tiene una sección por la que saldrá un remanente de vapor y agua caliente convertida en fase líquida como consecuencia de la caída de temperatura. Se produce una caída de entalpía entre la turbina y el generador. A esta parte del proceso se le llama foco frío, para este modelo el foco frío se da cuando el vapor sale del habitáculo y tiene contacto con la atmósfera. La turbina situada entre estos dos focos asegura la transformación de energía mecánica de rotación con el mínimo posible de pérdidas (Lucien, 1975).

Debido a la simpleza de esta turbina no es necesario contar con un control de velocidad o frecuencia, para analizar la sincronía es necesario sensar las revoluciones por minuto ya que cuando el efecto de rotación alcanza las 950 rpm, el alternador empezará a producir un voltaje de 12 volts de corriente alterna. El alternador contiene rectificadores de voltaje y un regulador a 12 volts para convertir el voltaje de corriente alterna a corriente regulada. Estos 12 volts presentes en la batería van conectados a un inversor de fase, el cual se encarga de convertir los 12 volts de corriente directa a 110 volts de corriente alterna. La

turbina de vapor tiene una potencia de 50 Watts con voltaje final generado de 110 volts de corriente alterna. Las revoluciones por minuto máximas a las que opera son 1,350 rpm con voltaje nominal 12 volts de corriente directa. La corriente nominal es de 3.6 Amp, el voltaje de alimentación para recargar la batería es de 110 volts de corriente alterna.

A este equipo no se le hizo cambio alguno en su composición y diseño más que el cambio de posición ya mencionado con anterioridad por lo que no fue necesario desarrollar una sección adicional.

3.2. Importancia de los prototipos en la educación de la ingeniería

Los prototipos funcionan como un modelo a seguir de diferentes procesos para el desarrollo de ingeniería, estos dispositivos permiten al estudiante reflexionar sobre los principios básicos y los modelos matemáticos que intervienen en la descripción de los fenómenos naturales y además permite poner práctica sus conocimientos disciplinares en la solución que surge al caracterizarlos para su estudio desde un enfoque experimental cuantitativo.

Las demostraciones de cátedra pueden sustituir las actividades de laboratorio ya que pueden desarrollarse en un aula. De esta forma, es posible complementar los fenómenos estudiados en el laboratorio para ayudar en el planteamiento de un problema y establecer la relación que existe entre las magnitudes involucradas en el fenómeno a estudiar, mediante la ilustración de un prototipo experimental, le permite al estudiante el manejo de datos y su interpretación de cómo operan los principios físicos para explicar el fenómeno observado.

Los experimentos de demostración son necesarios para que los estudiantes adviertan de todo el conjunto de conocimientos, y que cada teoría debe estar fundamentada en las respuestas que la naturaleza del proceso proporciona a las preguntas formuladas a través del experimento. Cabe mencionar que la falta de materiales didácticos para el desarrollo del trabajo en el laboratorio, ha orillado que la mayoría de los profesores desarrollen la parte teórica sustituyendo la experimentación por sesiones basadas en la resolución de ejercicios.

Una forma de solucionar ésta problemática es la propuesta del prototipo de incineración para generación de energía eléctrica, abriendo la posibilidad a los alumnos puedan realizar algunos experimentos, ilustraciones didácticas o demostraciones, aún si la institución no cuenta con un laboratorio o dispositivo sofisticado. El diseño y construcción del dispositivo no es la parte final del proyecto, es necesario elaborar un manual de usuario y si es posible un compendio de prácticas para su utilización, evaluación y finalmente validación (Tabla 3.1).

Es importante agregar que éste prototipo de incineración para generación de energía eléctrica no sólo tiene como fin demostrar de forma didáctica el proceso de una central termoeléctrica pudiendo prescindir en gran medida de los hidrocarburos, y utilizando únicamente biomasa o desechos; sino también de servir como modelo de estudio para el desarrollo e investigación de los procesos de incineración.

Este prototipo no busca ser el mejor en diseño sino ser un objeto de estudio, en el cual se pondrán en práctica los procesos necesarios de incineración, pero sobre todo la plataforma para la búsqueda de soluciones a la generación de energía con recursos alternos.

Tabla 3.1 Descripción del desarrollo del prototipo (Cervantes, 2010)

Visualización	Como inicio se analizan situaciones en las que se manifiesta la problemática que se pretende resolver con el prototipo y se realiza una investigación de la relación entre las variables involucradas en la problemática a resolver.
Análisis conceptual	Explica el origen de la problemática a resolver con sus características particulares, a partir de éstas se investiga y se proponen distintas formas para resolver la problemática.
Modelación y caracterización matemática	Se estudian de forma cualitativa la relación existente entre las variables involucradas con las que se pueden manipular. Se buscan modelos matemáticos a los que se les asignan valores de las magnitudes que se involucraran en el prototipo para establecer los criterios de funcionamiento que permitirán diseñar el prototipo.
Propuesta y descripción del prototipo	En esta etapa se establece el alcance y la viabilidad en el diseño del prototipo y se propone los materiales y principios de funcionamiento del prototipo.
Construcción del dispositivo	En este tiempo se construye el prototipo de acuerdo a su propuesta y se realizan los ajustes necesarios en el diseño y en los materiales.
Validación teórico-experimental	Realiza un manual de prácticas en donde se pondrá a prueba el prototipo experimentando diversas situaciones bajo las que fue concebido. También se realizan prácticas de forma repetida, con los resultados obtenidos en cada una de ellas hace una comparación cualitativa con aquellos que se obtienen sin el uso del prototipo. Si es necesario se establece una opinión sobre el funcionamiento del prototipo.
Conclusiones	Se hace un análisis de los resultados obtenidos para decidir si se procede a hacer un reajuste en el diseño del prototipo o se da por terminado.

3.3. Áreas de instalación del prototipo del caso de estudio

3.3.1. Ubicación

Para su instalación se requiere de un lugar accesible para su inspección y mantenimiento que cumpla con las dimensiones de al menos un metro más allá del final de la plataforma sobre la que se encuentran instalados los elementos del sistema. Se recomienda contar con techo a altura por encima de la unidad de incineración y resguardo bajo la sombra para protegerlo de la luz solar y la humedad. Es recomendable que sea en una zona exterior para libre ventilación de gases de escape; si la instalación es en el en interior es importante que cuente con sistemas de extracción de gases mientras el sistema de estudio esté en operación.

3.3.2. Requerimientos previos a la instalación

Los puntos básicos a considerarse en la instalación son los siguientes:

- Chimenea para liberación de vapor y gases de combustión.
- Desfogue para válvula de seguridad.
- Desagüe para aguas residuales.
- Instalación de gas con una presión mínima de 14.5 lb.
- Instalación eléctrica de 110 V c.a.

La aplicación de buenas prácticas de ingeniería para la determinación de la altura de la chimenea, considera adicionalmente el análisis del impacto que generan las fuentes de emisión de contaminantes individualmente a la calidad del aire de la zona en la cual se encuentran ubicadas. En este sentido define que es considerada una buena práctica la altura del ducto o punto de descarga que demuestre mediante la aplicación de modelos de dispersión de los contaminantes y que además las emisiones provenientes de la fuente no incrementan en más de un 40% la concentración de algún contaminante en el aire.

Esto debe de demostrarse mediante la aplicación de un estudio de modelos de dispersión de los contaminantes que se deberá realizar simulando las condiciones de calidad del aire con y sin el aporte de la fuente para determinar el cumplimiento de dicha condición. Dicho análisis debe realizarse para cada uno de los contaminantes que le corresponde monitorear a la actividad. En el caso que uno de los contaminantes no cumpla con esta condición, no se podrá aplicar esta alternativa.

Será aplicable cuando la concentración en el aire de todos los contaminantes que debe monitorear la actividad, excluyendo el aporte realizado por la misma

(concentración de fondo) no sobrepasa los límites establecidos y el incremento en la concentración de los contaminantes en el aire por causa de la emisión generada por el proceso o instalación no sobrepasen los límites establecidos en la NOM-085-SEMARNAT-1994, el aporte realizado por el ducto o chimenea puede ser superior al 40%.

3.4. Parámetros de seguridad a considerar en la experimentación

Para prevenir accidentes y mantener en correcto funcionamiento el prototipo de incineración se requiere realizar la operación del prototipo de la forma correcta. Lo cual se explica en el capítulo de resultados. Además de tomar en cuenta algunas medidas de seguridad de los dispositivos:

- Presión máxima de operación de caldera: 10.3 Bar (150 psig).
- Temperatura máxima al interior de las cámaras de incineración: primaria de 900 °C y secundaria de 1,100 °C.

Es importante resaltar que en la salida de la turbina el agua se encuentra extremadamente caliente por lo que se debe de tener mucha precaución. Para la operación y mantenimiento del incinerador debe tomarse precauciones especiales, a fin de proteger la salud de los operadores, tales como:

- Ropa gruesa que no permita por ningún motivo el contacto de la piel con el polvo seco.
- Vestidos de protección total del cuerpo reforzado en o plástico.
- Capucha plástica para proteger la cabeza.
- Para la operación uso de lentes o goles.
- Mascara de recubrimiento medio de la cara con filtro tipo del grupo P2 con protector para la cara en caso de mantenimiento.
- Guantes de cuero si es posible con braceras en tela gruesa.
- Botas altas de caucho.
- Los guantes y el vestido de protección deben ser depositados en contenedores ubicados en sitios de acceso restringido, si se quieren reutilizar. De no ser reutilizados, deben ser incinerados.
- La protección facial textil debe ser utilizada por una sola vez.
- La protección facial de caucho de la máscara debe ser limpiada con detergente y suficiente agua para su re-uso.

En caso de emergencia por fuego en el área contaminada y de descontaminación, apagar el fuego con CO_2, para lo cual las áreas deben estar provistas con extintores de este tipo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Diseño de incinerador

Los sistemas de combustión constan de cuatro componentes de vital importancia para la transformación de energía térmica a un proceso de combustión. El primero de esos componentes es el quemador, que consume la carga del combustible con el oxidante para convertirlo en calor. El segundo es la carga combustible del quemador, que puede transferir calor satisfactoriamente a través de la flama. En muchos casos la flama y el combustible están localizados o forman parte de la cámara de combustión, puede ser un horno, un deshidratador, un calentador o un incinerador, este último es el tercer componente. En algunos casos puede ser un tipo de dispositivo recuperador de calor para incrementar la eficiencia del sistema de combustión (Baukal, 2000)

Un cuarto elemento que no se menciona en la literatura pero que es parte importante del sistema de combustión, es el sistema de control. Este componente es indispensable para llevar a cabo los resultados esperados en el proceso de combustión y su complejidad dependerá de qué tan sofisticado sea el proceso de combustión. Éste puede ser desde el proceso que realiza el usuario de control manual de válvulas, hasta un sofisticado sistema automático.

En la Figura 4.1 se observa un proceso de reutilización de aire caliente que tiene el incinerador en el cual se observa que el combustible (gas lp) es mezclado con el aire para tener una adecuada combustión la cual se introduce en la cámara primaria (cámara de combustión), los gases calientes que se obtienen se extraen y son llevados de nueva cuenta al quemador para ser mezclados con el combustible.

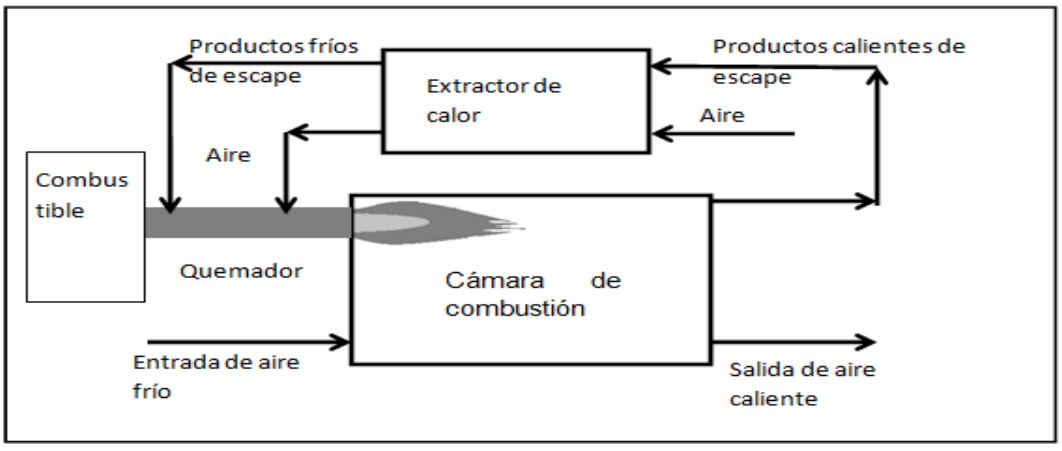

Figura 4.1 Esquema de los componentes en un sistema de combustión (Baukal, 2000)

La determinación del tipo de sistema de incineración a implementar depende de la aplicación y del uso que se le quiera dar, para este caso se utilizará un sistema de doble cámara con el propósito de hacer una incineración eficiente de la materia a incinerar y de los gases de incineración. Gracias a esto se diluirán los gases y tendrá como consecuencia cumplirá con las normas establecidas para la República Mexicana.

De acuerdo a la NOM-098-SEMARNAT-2004 y las normas aplicables en el país se diseñó un método de evaluación de desempeño de los sistemas de incineración. Así se asignaron valores de acuerdo con la escala donde se distinguen, condiciones y características de una operación ineficiente, satisfactoria o excelente, valoradas con los números 0, 1, y 2 respectivamente, como se muestra en la Tabla 4.1 (INE, 2002).

Tabla 4.1. Criterios de combustión implementados para la operación del incinerador del caso de estudio (Elaboración a partir de INE, 2002)

Parámetro	Rango	Valor (b)	Observaciones
Temperatura en CC1	< 800°C	0	Combustión incompleta
	800 a 1000 °C	2	Operación adecuada
	< 1000 °C	1	Daño al material refractario
Temperatura en CC2	< 850°C	0	Combustión incompleta
	850 a 1200°C	2	Operación adecuada
	> 1200 °C	1	Daño al material refractario
Tiempo de retención en CC2	< 2 seg	0	Insuficiente para destrucción de compuestos orgánicos
	2 seg	2	Suficiente para descomposición de compuestos orgánicos

La temperatura en la cámara primaria debe de garantizar la incineración de los residuos con el mínimo gasto de energía (es decir de gas) y al mismo tiempo debe de generar el calor suficiente para calentar todo el agua contenida en la caldera.

En la literatura se reportan rangos de temperatura desde 400 a 1,600°C, sin embargo se recomienda que la temperatura no exceda 1,000°C debido que a partir de este punto, las cenizas pueden fundirse y provocar incrustación de escorias en el material refractario, ocasionando deterioro en el equipo.

1. Sistema de incineración

La tecnología a emplear para incinerar biomasa y residuos es un incinerador térmico que bien es conveniente definir el funcionamiento del mismo.

El corazón del incinerador térmico es una flama estabilizada por medio de una boquilla, mantenida por una combinación de combustible en este caso gas LP y aire auxiliar que es agregado cuando es necesario. Al pasar por la flama, el gas es calentado desde su temperatura de entrada, hasta su temperatura de ignición. La temperatura de ignición varía para diferentes compuestos y usualmente es determinada empíricamente. Esta es la temperatura a la cual la proporción de reacción de combustión (y consecuentemente la proporción de producción de energía), excede la proporción de pérdidas de calor, elevando la temperatura de los gases a algún valor más alto.

El incinerador contará con dos cámaras de combustión, las dos cámaras estarán integradas por dos quemadores uno para cada cámara y un sistema de inyección de aire el cual ayudará a una incineración completa de los residuos y los gases de combustión. Los quemadores de las cámaras de incineración serán accionados desde el tablero de control.

El proceso de incineración de la biomasa o de los residuos, constará de las siguientes etapas:

a) La incineración de los residuos y biomasa se llevará a cabo en la cámara primaria.
b) En la cámara secundaria se producirá la incineración de los gases de combustión provenientes de la cámara primaria hasta por lo menos 850 °C con un tiempo de residencia de 2 segundos como mínimo de acuerdo a lo establecido en la NOM-098-SEMARNAT-2004.

El aire se controlará de forma manual por medio del turboventilador el cual será accionado desde el tablero de control, las salidas de aire contarán con manómetros para realizar el monitoreo de la presión de aire que entrará a las cámaras de incineración.

Los límites de funcionamiento y el dimensionado del horno del caso de estudio están previstos para las condiciones mostradas en la Tabla 4.2.

En general el diseño del horno permitirá mantener de forma consistente una elevada calidad de incineración, materializada en:

- Contenido muy bajo de sustancias como hollín, monóxido de carbono e hidrocarburos (no quemados)

- Temperatura de los gases de combustión expuestos superiores a 850 °C durante un tiempo de residencia mínimo de 2 segundos
- Capacidad para incinerar residuos de bajo poder calorífico y elevada humedad
- Adaptabilidad a las diferentes condiciones de la biomasa o residuo a incinerar.

Tabla 4.2 Límites de funcionamiento y dimensionado del horno para el caso de estudio

Límites de funcionamiento del horno	
Carga térmica	28,400 – 40,000 kcal
Carga mecánica	5 y 12 kg/h
Poder calorífico inferior	8,000 – 9,000 kcal en RSU 22,500 kcal en biomasa
Dimensionado del horno	
Carga térmica	52,400 – 90,000 kcal
Carga mecánica	15 kg/h
Poder calorífico inferior	8,000 – 9,000 kcal en RSU 22,500 kcal en biomasa

Así mismo, se distribuirá de forma adecuada los gases de combustión, y se recogerá sin provocar obstrucciones los finos y metales fundidos originados en el proceso de combustión.

Para la determinación del tamaño del nuevo incinerador es necesario conocer la cantidad de materia a incinerar que producirá la cantidad de calor requerida para generar el vapor necesario para mover la turbina. Como se mencionó en el capítulo anterior el equipo de generación de vapor se adquirió con anterioridad por lo que las características físicas del nuevo horno fueron adaptadas a partir de los requerimientos del generador de vapor. Las especificaciones de éste equipo se describen en la Tabla 4.3.

Se puede partir de la presión de prueba necesaria para determinar la capacidad calorífica del incinerador para la generación de vapor de agua saturado seco. Esta energía calorífica es llamada entalpía total del vapor de agua saturado seco. Por lo que se tiene que hallar la entalpía total del vapor de agua saturado seco a una presión de 9.84 kg/cm^2.

Tabla 4.3 Especificaciones de la generación de vapor para el caso de estudio

Capacidad máxima	35 litros
Material	Acero al carbón
Material de fluxes	Acero inoxidable
MAWP	12.65 kg/cm^2 (180psig)
Presión de proceso	9.84 kg/cm^2 (140psig)
Presión de disparo de válvula de seguridad	14.00 kg/cm^2 (200psig)

En este caso no es necesario interpolar ya que se obtiene el valor directamente de tablas hg = 668.0 kcal/kg.

Se sabe que la caldera tiene capacidad de 35 litros de líquido que se convertirá en vapor por lo que la capacidad de calor requerida para convertir en vapor saturado seco 35 litros de agua a una presión de 9.84 kg/cm^2 es igual a:

(35 kg de agua * 668.0 kcal/kg) = 23,380.0 kcal

A esta energía se le llama “energía de vaporización de la caldera”.

El diseño del plano comprende todos los componentes que conforman el prototipo y que se mencionan a continuación (Figura 4.2).

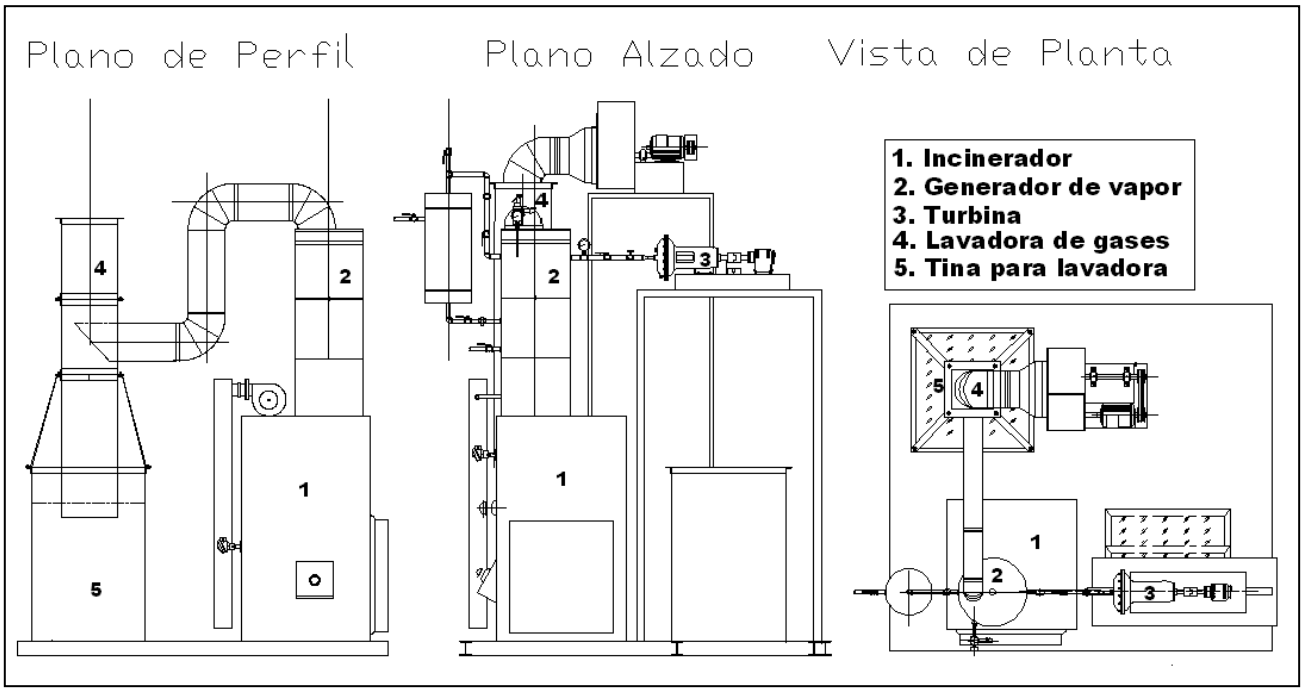

Figura 4.2 Diseño general de prototipo con todos sus componentes

2. Sistema de alimentación de aire

El sistema de inyección de aire actuará como auxiliar a la incineración de los residuos y los gases obtenidos durante la combustión, siendo estos dos sistemas aire primario y aire secundario, esto se hará para asegurar la incineración completa de todas las especies. El diseño del horno permitirá un reparto de aire auxiliar de combustión homogéneo en toda su superficie, obteniendo un porcentaje muy bajo de materiales no quemados en las cenizas resultantes del proceso de incineración. De igual forma la salida del horno hacia la caldera produce una alta turbulencia (conseguir una distribución homogénea de la velocidad en toda la sección del horno) que asegura una mezcla adecuada de los gases de combustión.

A continuación se describen los detalles del aire primario y aire secundario:

a. **Aire primario.** El aire primario es aquel que se inyecta mezclado con el combustible (en este caso se usará gas LP). Esta mezcla se realiza en el interior del quemador y a la salida del mismo se lleva a cabo la ignición. El valor del aire primario representa el 60% y el 80% del aire total. El valor de los gases de combustión varía de acuerdo a las dimensiones de diseño de las cámaras donde se lleva a cabo la incineración (Castells, 2005). Este aire será impulsado por medio de un turbo-ventilador.

b. **Aire secundario.** El aire secundario es el que se inyecta a la entrada de la cámara de postcombustión para después reaccionar con los gases de combustión que se han formado. Su porcentaje varía entre 40 y 60% del total. Su importancia está en evitar la formación de gases no quemados.

3. Quemadores

El quemador es el dispositivo utilizado para quemar el combustible con un oxidante para convertir la energía química en energía térmica. En la construcción de un horno se puede usar varios quemadores o uno solo, dependiendo del tamaño y del tipo de aplicación.

Algunos factores de diseño a considerar para los quemadores son el combustible, el tipo de oxidante que se utilizará en la combustión, la geometría de la cámara de combustión, regulación del medio ambiente y requerimientos de transferencia de calor que incluye cosas como temperatura de flama y distribución del calor (Baukal, 2000).

Existen diferentes tipos de quemadores y clasificaciones según sea su utilización. Se pueden clasificar por la presión con la que son implementados por ejemplo, también por su utilización, ya sean para incineración, tratamiento térmico o

deshidratación. Los más comunes para incineración son de tipo pre mezcla, de tipo oxidante y de corriente de aire.

Pre mezcla: En este tipo de quemadores el combustible y el oxidante son completamente mezclados antes de que comience la combustión (Figura 4.4). Los quemadores de pre mezcla producen una flama más corta y más intensa a comparación de las llamas de difusión. Ésta puede producir regiones de alta temperatura en la flama, lo que produce un calentamiento no uniforme de la carga y grandes emisiones de NOx. Sin embargo los quemadores de pre mezcla son útiles porque pueden mejorar las velocidades de calentamiento.

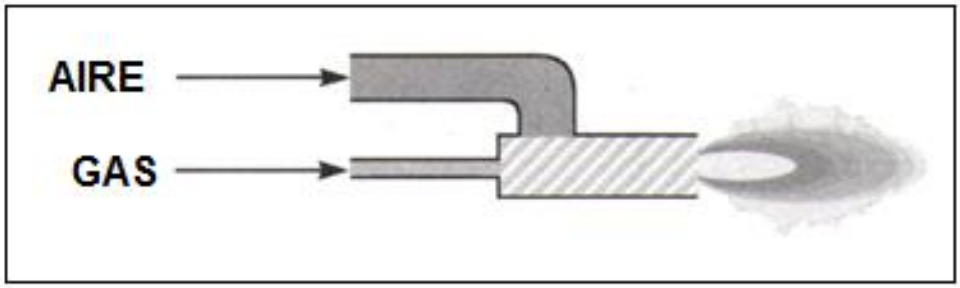

Figura 4.3 Diagrama de quemador de pre-mezcla a instalar en el incinerador del caso de estudio

El quemador principal se instalará en la pared lateral del hogar y el otro en la parte inferior de la cámara secundaria (Figura 4.4). La puesta en marcha del horno se realizará activando el quemador de la cámara primaria la cual alcanzará una temperatura de 850°C especificada por la NOM-098-SEMARNAT-2004, para posteriormente conseguir que la cámara secundaria alcance la temperatura de 1,100°C para la incineración de los gases de combustión, tan pronto como la combustión de los residuos permita mantener la temperatura de los gases, se puede reducir la carga de los quemadores hasta retirarlos del servicio.

Los quemadores arrancarán de forma automática cuando:

- Se inicie el proceso de incineración de los residuos.
- La temperatura de combustión descienda por debajo de los 850 °C.

Los criterios de los quemadores son:

- El combustible a consumir será gas LP
- La flama debe quemar el gas en su totalidad

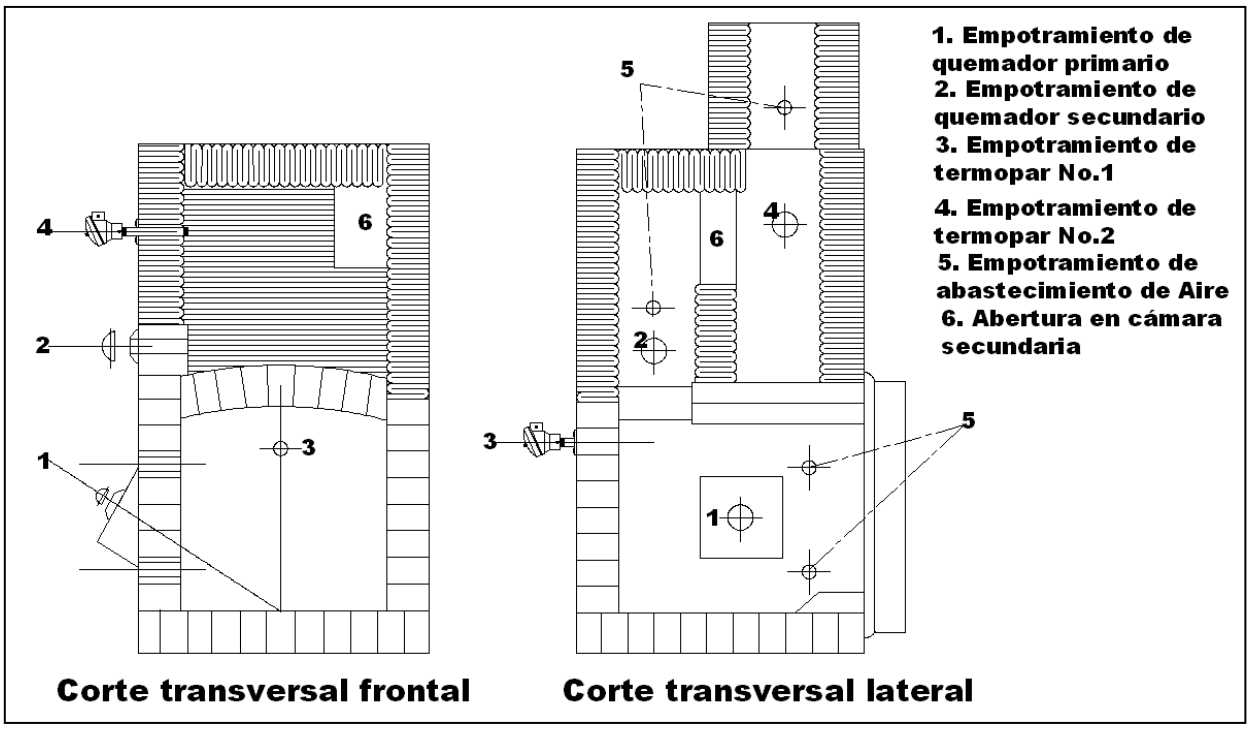

Figura 4.4 Instalación de quemadores, gas y sistema de inyección de aire en incinerador del caso de estudio

En el caso de aplicación se utilizaron dos quemadores de baja presión modelo QA-12 que aparecen en la Figura 4.5. Este tipo de quemadores proveerán de 3,528 kcal (14,000 BTU) a presión de 0.4536 kg (1 lb) (PYPESA, 2009).

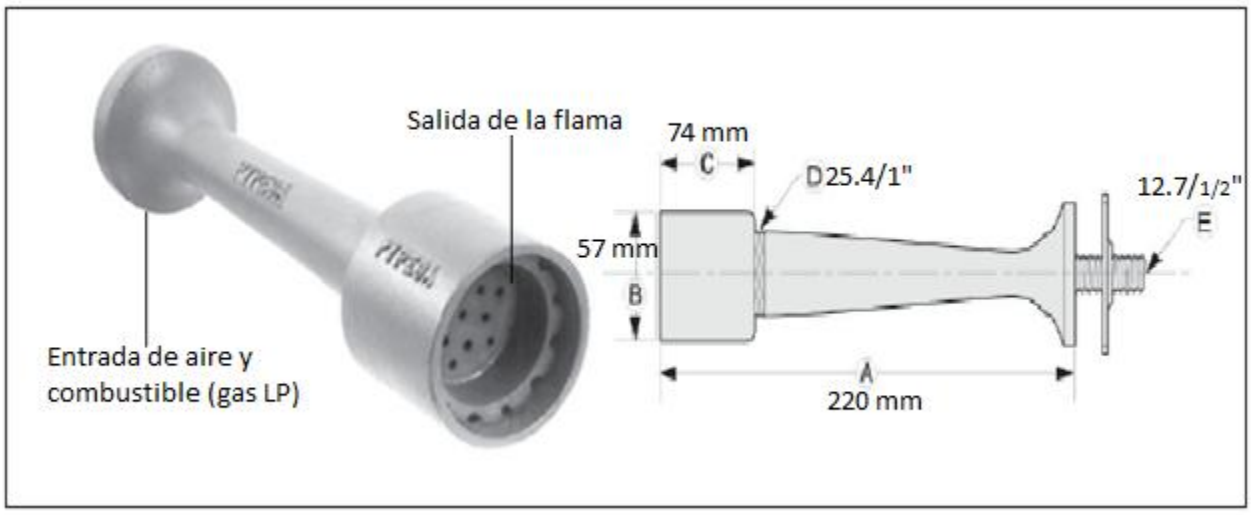

Figura 4.5 Fotografía y diagrama de quemador de baja presión modelo QA-12 marca PYPESA

La instalación de los quemadores en el incinerador se hizo en el lateral derecho, en la parte trasera del incinerador se montó la tubería abastecedora de combustible y aire en conjunto con el turbo soplador como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

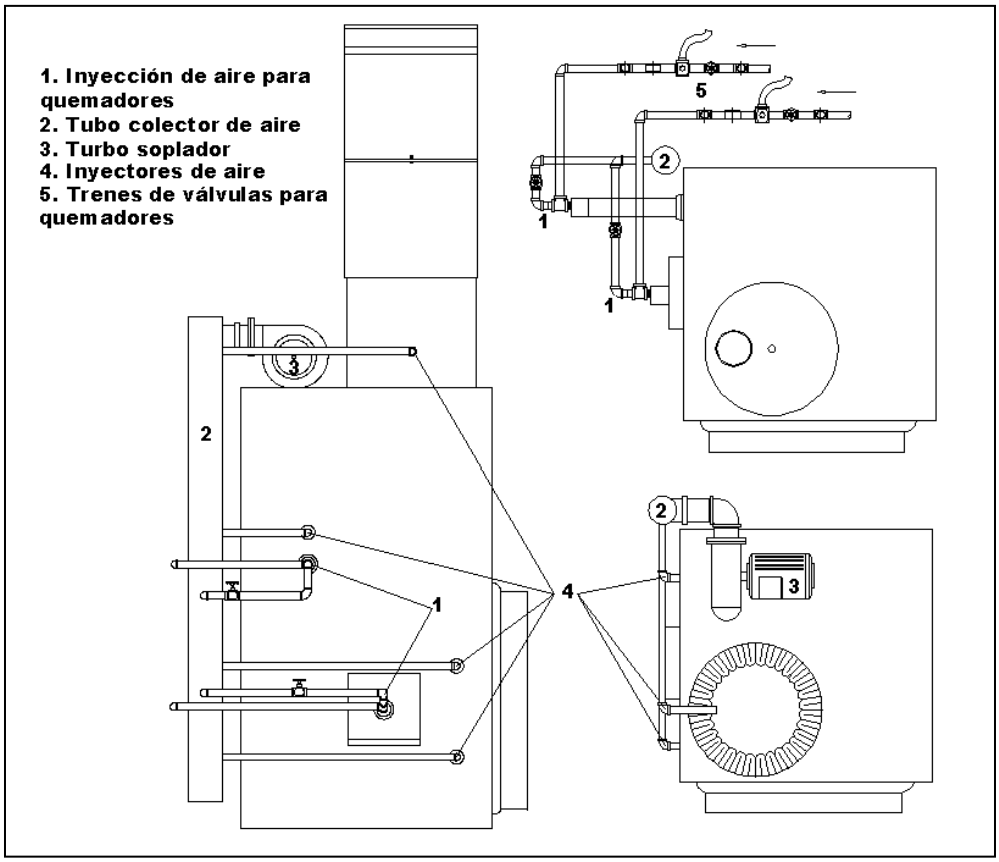

Figura 4.6 Plano de la instalación de tubería para gas y quemadores en el incinerador del caso de estudio

Para determinar los porcentajes en peso y volumen de los gases procedentes de la combustión es necesario conocer el balance másico entre los reactivos y productos que se muestran en la Tabla 0.1:

Tabla 0.1 Balance másico de la reacción en el proceso de incineración

Reactivos	Productos
12 kg Carbono	44 kg CO_2
2 kg Hidrógeno	18 kg H_2O
32 kg Azufre	64 kg SO_2
28 kg Nitrógeno	28 kg N_2

Las cantidades másicas de los gases de combustión serán:

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12}(\%C) = \frac{44}{12}(0.6116) = 2.2425 \frac{kgCO_2}{kg\ RSU}$$

$$m_{H_2O} = \frac{18}{2}(\%H_2) + m_{humedad\ RSU} = \frac{18}{2}(0.1541) + 0.3307 = 1.7176 \frac{kgH_2O}{kg\ RSU}$$

$$m_{SO_2} = \frac{64}{32}(\%S) = \frac{64}{32}(0.0002) = 0.0004 \frac{kgSO_2}{kg\ RSU}$$

$$m_{N_2} = \frac{44}{12}(\%N_2) + m_{N_2 aire\ seco} = \frac{28}{28}(0.0292) + 0.767(15.5626) = 11.9657 \frac{kgN_2}{kg\ RSU}$$

El oxígeno en exceso a introducir esta dado por:

$$m_{O_2(exceso)} = m_{O_2 aire\ seco} * EA = \frac{15.5626}{1.3}(0.233)(0.3) = 0.8367 \frac{kgCO_2}{kg\ RSU}$$

El volumen de los gases se obtendrá teniendo en cuenta que un Kmol de cualquier sustancia en condiciones normales (0° y 1 atm) ocupa 22.41

$$V_{CO_2} = m_{CO_2} \frac{1}{M} 22.4 \left[\frac{Nm^3}{Kmol}\right] = \frac{2.2425}{44}(22.41) = 1.1416 \left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right]$$

$$V_{H_2O} = m_{H_2O} \frac{1}{M} 22.4 \left[\frac{Nm^3}{Kmol}\right] = \frac{1.7189}{18}(22.41) = 2.1390 \left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right]$$

$$V_{SO_2} = m_{SO_2} \frac{1}{M} 22.4 \left[\frac{Nm^3}{Kmol}\right] = \frac{0.04}{64}(22.41) = 0.014 \left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right]$$

$$V_{N_2} = m_{N_2} \frac{1}{M} 22.4 \left[\frac{Nm^3}{Kmol}\right] = \frac{11.9657}{28}(22.41) = 9.5726 \left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right]$$

$$V_{O_2} = m_{C_2} \frac{1}{M} 22.4 \left[\frac{Nm^3}{Kmol}\right] = \frac{0.8367}{32}(22.4) = 0.5857 \left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right]$$

Los porcentajes másicos y volumétricos se muestran en la Tabla 0.2 y la Tabla 0.3 respectivamente.

Tabla 0.2 Porcentaje en volumen de los gases de combustión en base húmeda

Producto	Volumen $\left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right]$	% volumen
CO_2	1.14	8.49
H_2O	2.13	15.90
SO_2	0.014	0.10
S N_2	9.57	71.16
O_2	0.58	4.35
TOTAL	13.45	100.00

Así se tiene que el volumen de los gases húmedos en base húmeda es de 13.4529 $\left[\frac{Nm^3}{Kmol}\right]$, por lo que el caudal a la hora será

$$V_{gases} = 13.4529 \left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right] 15 \left[\frac{kg\ RSU}{h \cdot línea}\right] = 201.8 \left[\frac{Nm^3}{h}\right]$$

Tabla 0.3 Porcentaje de masa de los gases de combustión en base húmeda

Producto	Masa $\left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right]$	% masa
CO_2	2.24	13.97
H_2O	1.71	10.71
SO_2	0.04	0.25
N_2	11.96	74.55
O_2	0.08	0.52
TOTAL	16.05	100.00

El flujo másico de los gases emitidos en base húmeda será

$$m_{gases} = 16.0508 \left[\frac{Nm^3}{kg\ RSU}\right] 15 \left[\frac{kg\ RSU}{h \cdot línea}\right] = 240.762 \left[\frac{Nm^3}{h}\right]$$

Carga térmica para los RSU

$$P_{incinerador} = 8{,}916.91\frac{kcal}{kg}\left(15\frac{kg}{h}\right) = 45.5\ \frac{kcal}{kg * h}$$

4.1.1. Dimensionamiento del prototipo de incineración

Considerando que el prototipo se establecerá en el Distrito Federal, se tiene un promedio de generación de RSU de 1.7376 kg/hab*día al año 2010. Los datos más actuales que se tienen en documentos emitidos por las diferentes secretarías de gobierno a cargo de llevar un control estadístico de la población y generación de RSU (INE, 1997).

Se considera que el prototipo funcionará 30 días en promedio a lo largo de todo un año.

Suponiendo una población de 5,000 habitantes con una producción de RSU de 1.7376 kg/hab*día, queda entonces que la capacidad del prototipo es:

$$\text{kilogramos a tratar} = 5{,}000\ \text{hab}\left(1.7376\frac{\text{kg}}{\text{hab}\cdot\text{día}}\right)$$

$$= 8{,}688\frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

La disponibilidad es:

$$\text{disponibilidad} = \frac{30\ \text{días}}{365\ \text{días}} = 8.22\%$$

La incineración teórica se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación

$$\text{Incineración teórica} = \frac{\text{kilogramos a tratar}}{\text{funcionamiento}\cdot\text{día}} \qquad \text{Ec 4.1}$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior se tiene que

$$\text{Incineración teórica} = \frac{8{,}688\frac{\text{kg}}{\text{día}}}{30\frac{\text{día}}{\text{año}}\cdot\left(24\frac{\text{h}}{\text{día}}\right)} = 12.06\frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Lo cual supone que la incineración teórica horaria de la línea será de 12.06 kg/h, esta capacidad de incineración se acopla a la capacidad de diseño elegida para el incinerador el cual tiene una capacidad de 15 kg/h.

La capacidad total de incineración se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación tomando en cuenta la capacidad de diseño para el incinerador y que solo se contará con una sola línea en el proceso se tiene que:

$$\text{Capacidad total} = 15\frac{\text{kg}}{\text{h}}(1\ \text{línea})\left(7{,}512\frac{\text{h}}{\text{año}}\right) = 112{,}680\frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Para el caso de estudio el prototipo se ha enfocado en RSU generados en el Distrito Federal, basándose en un estudio de la caracterización de los RSU realizado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA sus siglas en inglés) en coordinación con el Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF). Este estudió se basa en las siguientes normas mexicanas para realizar pruebas de muestreo de RSU:

- NMX-AA-015-1985: Protección al ambiente- Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-muestreo-método de cuarteo.
- NMX-AA-016-1984: Protección al ambiente- Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Determinación de humedad.
- NMX-AA-018-1984: Protección al ambiente- Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Determinación de cenizas.
- NMX-AA-019-1985: Protección al ambiente- Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Peso volumétrico “In situ”.
- NMX-AA-022-1985: Protección al ambiente- Contaminación del suelo-Residuos sólidos municipales-Selección y cuantificación de subproductos.

De acuerdo a este estudio y basándose en las pruebas que se especifican en las normas antes mencionadas se obtuvo la composición química de los RSU, la cual se indica en la Tabla 4.7 y tomando un 33.7% de humedad para el Distrito Federal (Durán y col., 2012)

Tabla 4.7 Composición química para los RSU de la Ciudad de México (Durán y col., 2012)

Elemento Químico	Porcentaje
Carbono	61.16
Hidrógeno	15.44
Oxígeno	7.45
Nitrógeno	2.92
Azufre	0.02
Cenizas	13.04
Total	100.00

De acuerdo a los datos de la Tabla 4.7 se recurre a las ecuaciones de poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) para los RSU en la Ciudad de México. Lo

cual servirá como materia prima para la generación de los gases de combustión que serán transportados a la caldera.

Fórmula de Dulong (Sharma, 2006)

$$\mathrm{PCS} = \left[80.80\mathrm{C} + 345\left(\mathrm{H} - \frac{\mathrm{O}}{8}\right) + 22.4\mathrm{S}\right] \qquad \text{Ec 4.2}$$

$$\mathrm{PCI} = \mathrm{PCS} - 5.97[\%\mathrm{H_2O} + 9\%\mathrm{H_2}] \qquad \text{Ec 4.3}$$

Sustituyendo valores de la Tabla 4.3 en las ecuaciones 4.2 y 4.3 se tiene:

$$\mathrm{PCS} = \left[80.80(61.16) + 345\left(15.44 - \frac{7.45}{8}\right) + 22.4(0.02)\right] = 9{,}947.6947\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}}$$

$$\mathrm{PCI} = 9{,}947.6947\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}} - 5.97[33.7 + 9(15.44)] = 8{,}916.9145\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}}$$

El incinerador debe quemar 5.1 kg/hr de desechos, que se determinó su calor específico $9{,}947.6947\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}}$ que fue calculado en el punto anterior:

$$5.1\ \mathrm{kg}\ \mathrm{x}\ \ 9{,}947.69\ \frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}} = 5{,}346.63\ kcal$$

Asumiendo que el incinerador deberá llegar a $23{,}380\ \frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg}*m^3}$

$$\frac{5{,}346.63\ kcal}{23{,}380\ \frac{kcal}{kg*m^3}} = 0.2286\ m^3$$

4.1.2. Construcción de incinerador

El prototipo de incineración se construyó por medio de un convenio de trabajo conjunto con la empresa Calor Controlado S.A. de C.V. la cual desarrolla proyectos de ingeniería para tratamiento térmico, fundición no ferrosa, incineradores y procesos de baja temperatura como deshidratación de alimentos.

Tiene su matriz localizada en Cadaques No. 49 Col. De la Estrella. Delegación Iztapalapa México D. F. Las instalaciones de la empresa se conforman de un cerco techado superior a los 50 metros cuadrados. El área de trabajo destinada para el desarrollo del prototipo fue de 4 a 5 metros cuadrados. Se necesitó del trabajo itinerante de un técnico refractarista y un técnico en soldadura, además de la asistencia técnica de los ingenieros y los alumnos autores del presente trabajo.

Para la estructura exterior del incinerador se utilizaron las láminas manufacturadas según el diseño que se muestra en la Figura 4.7.

El incinerador está armado en su superficie externa por lámina de acero al carbón de calibre 12 (2.7 mm) manufacturada y soldada con soldadura E6013, esta soldadura fue seleccionada por ser para unión de lámina de acero al MEDIANO carbón (Oerlikon, 2005).

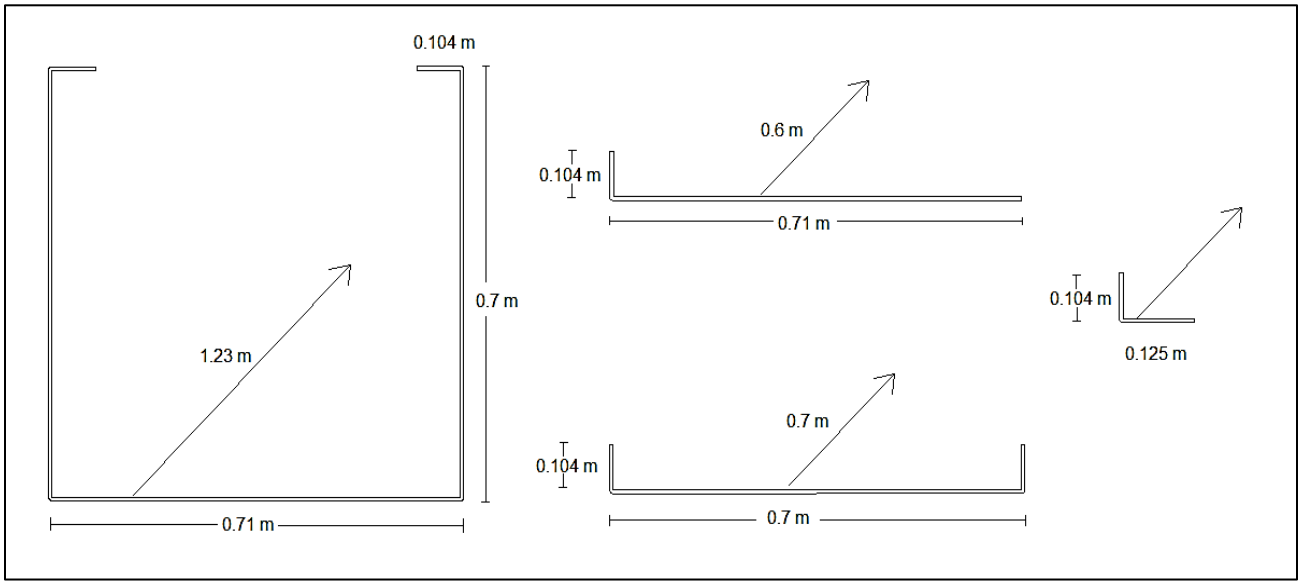

Figura 4.7 Diagramas de láminas para construcción de incinerador del caso de estudio

Dicha soldadura tendrá como mínimo una resistencia mecánica de 4,359.034 kg/cm^2 (62,000 lbs/pulg^2). La soldadura de arco metálico protegido, es el proceso de soldadura por el cual se soldaron las piezas de la estructura del horno, al igual que otros procesos eléctricos se utiliza el calor del arco para llevar la pieza de trabajo y un electrodo consumible al estado de fusión. En este proceso el arco acarrea pequeñísimos glóbulos de metal fundido, procedentes de la punta del electrodo, hacia la zona fundida que se forma sobre la superficie de la pieza de trabajo (Horwitz, 1990).

La cámara primaria se caracteriza por ser la que tiene el acceso de la materia prima (RSU y/o biomasa) por una puerta al frente, se construyó con recubrimiento de ladrillo refractario compuesto de dióxido de silicio, con el cual puede alcanzar temperaturas mayores a los 1,650 °C.

Los ladrillos refractarios (Figura 4.8) se ensamblaron con mortero refractario para lograr una densidad de 1,890 kg m^3. Este mortero tiene una presentación en polvo o pasta con una granulometría muy fina que se usa como relleno entre los ladrillos. Dicho relleno es necesario debido a que los ladrillos al ser piezas no maquinadas, tienen imperfecciones que no permiten su ideal acomodo, por lo que habrá huecos que pueden provocar fugas de aire, líquidos, gas y calor.

Figura 4.8 Ladrillo refractario para revestimiento del horno del prototipo

El mortero rellena estos huecos brindando un prefecto sello a la instalación. Este mortero contiene un aditivo químico que le permite fraguar al contacto con el aire sirviendo de unión para los ladrillos y contribuyendo así una estructura sólida a temperatura ambiente. Este mortero tiene el nombre comercial de Fraguado al Aire (Amador, 2000).

Los espacios existentes entre las láminas y el tabique refractario se rellenaron con concreto refractario, la revoltura está compuesta por cemento, fibra de asbesto y grava ultra ligera que le permite tener poca densidad después del fraguado, algo esencial para fungir como aislante térmico.

La cámara primaria está conectada a la segunda cámara por una abertura por la cual se moverán los gases a la cámara secundaria como se aprecia en la Figura 4.9 (a).

Es en la cámara secundaria en donde ocurre la incineración de los gases con exceso de aire para la reducción de partículas mayores, el quemador de esta cámara se localiza en el área superior a esta abertura para actuar directamente.

Esta cámara fue cubierta por fibra cerámica para evitar el contacto directo de los gases con las paredes del incinerador. Este aislante térmico realiza dos funciones primordiales: evitar pérdidas de calor en la cámara y proteger al usuario de las altas temperaturas de los gases de incineración.

La fibra cerámica es resistente a altas temperaturas, en un rango desde los 538°C (1,000°F) a 1,480°C (2,700°F) según sea el tipo de aplicación. En este caso se usó fibra cerámica NUTEC RT que es resistente hasta 1,260°C. Está compuesta de aluminacilica, no puede absorber la humedad y es resistente a ácidos, aceites y a vapores corrosivos (NUTEC, 2012).

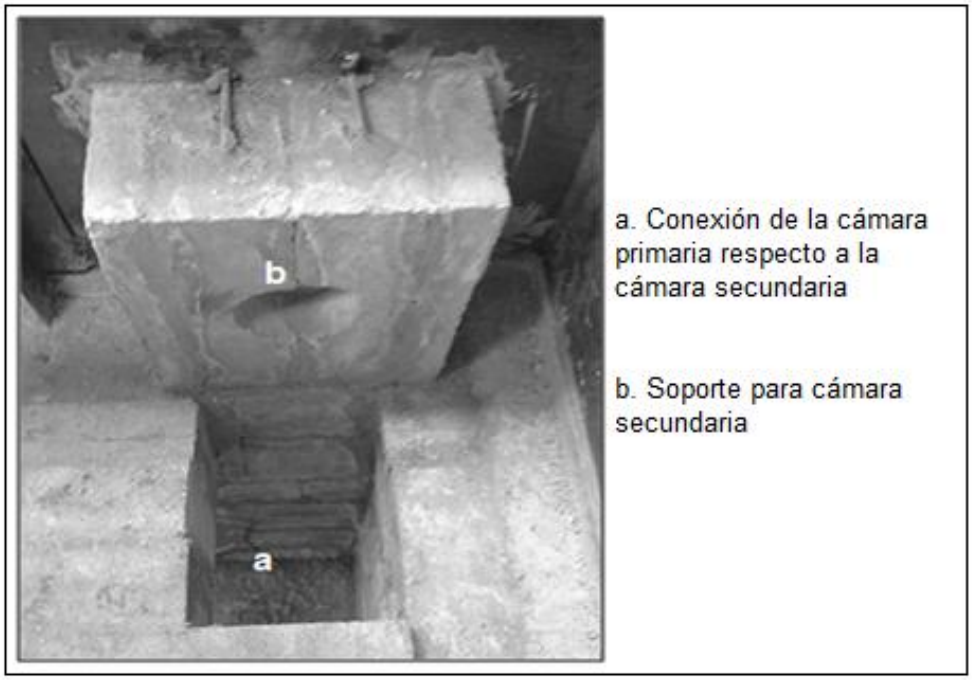

Figura 4.9 Fotografía de la abertura de conexión con cámara secundaria y soporte para cámara secundaria

La fibra cerámica se debe de colocar en forma transversal a la placa en múltiples capas dobladas de forma que se compacten lo más que sea posible (Figura 4.10), la fibra siempre debe ser fijada con anclas de acero inoxidable soldadas a la lámina de acero. Para la tapa del horno se realizó el mismo proceso con la fibra, las anclas fueron soldadas con el propósito de mantener la fibra en su lugar sin importar si ésta se mueve para hacer alguna maniobra.

Esta tapa se colocó en la abertura de la parte superior que se muestra en la Figura 4.10. La tapa se compone de una placa de acero al carbón calibre 7, suficientemente rígida para soportar la caldera como está previsto en el diseño.

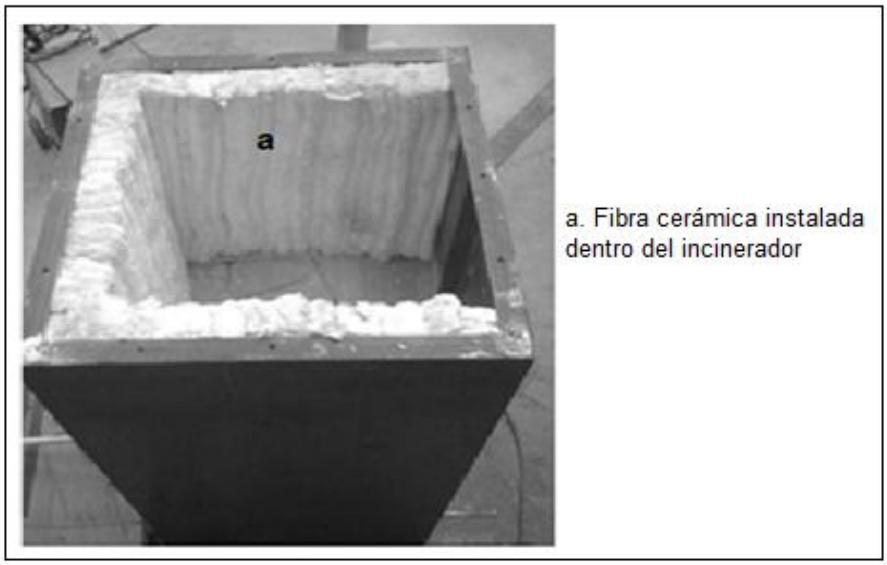

Figura 4.10 Instalación de fibra cerámica dentro del incinerador

La tapa del horno fue fijada por tornillos autorroscables (Figura 4.11) que le permiten colocarse de manera firme y al mismo tiempo le permite expandirse por el efecto de dilatación térmica si así lo requiere. A esta se le colocó fibra cerámica para aislarla de las altas temperaturas de los gases (Figura 4.12).

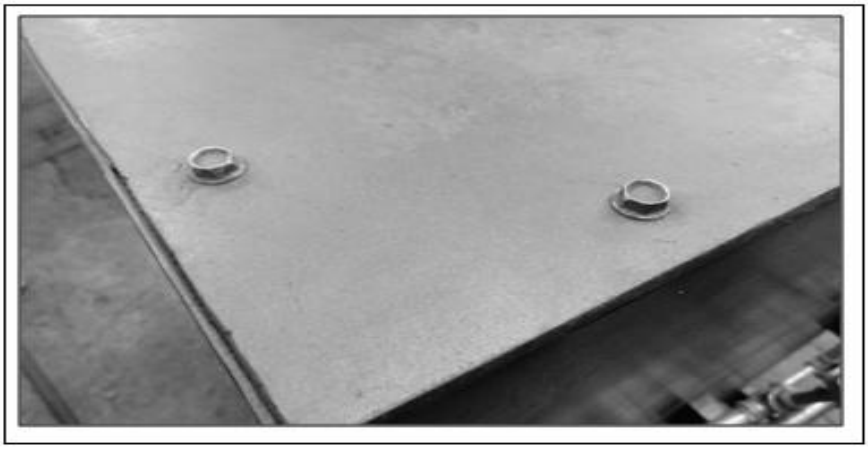

Figura 4.11 Tornillos autorroscables para sujeción de tapa superior del horno del caso de estudio

La cámara primaria tiene una puerta de acero del mismo calibre que las paredes del incinerador con un recubrimiento de fibra cerámica, esta puerta fue diseñada para cerrar a presión, impidiendo así que escapen los gases de incineración. La fibra cerámica fue fijada con anclas de acero inoxidable soldadas, de la misma forma que en las demás partes del horno.

Figura 4.12 Tapa de cámara secundaria con anclas de acero inoxidable para soporte de fibra cerámica en la parte superior del incinerador prototipo

La cámara secundaria del incinerador está dividida por una pared de fibra cerámica, la cual está soportada sobre ángulos y varillas de acero como se observa en la Figura 4.13 (a).

Lo que tendrá como efecto la retención de los gases por más tiempo, para que estos gases puedan pasar hacia la cámara secundaria se tiene una abertura la cual se observa en la Figura 4.13 (b).

Figura 4.13 Vista superior del horno con recubrimiento de fibra cerámica

A cada quemador se le asignó un tren de válvulas para el ajuste manual de gas. Estos trenes de válvulas están conformados por dos secciones horizontales (Figura 4.14):

1) La sección de abajo funciona como paso general de gas y medición de presión
2) La sección de arriba es para hacer un ajuste fino de la presión de gas mostrada en el manómetro, la flecha indica el sentido de circulación del gas.

En la sección de paso general se utiliza una válvula de compuerta para ajustar el gasto necesario de gas, en seguida la válvula solenoide abre y cierra el gas de forma automática, en la sección de precisión la válvula de esfera hace la misma función que la de compuerta y la de ajuste fino hace la medición más precisa.

Los quemadores fueron fijados por medio de unas boquillas de acero diseñadas y torneadas a la medida. Estas fueron soldadas a una placa que fue asegurada a las paredes de acero del incinerador de la misma forma que la tapa, lo que le permite expandirse si es que lo requiere por el efecto de elevación de temperatura. Es importante destacar que estas son las piezas que están sometidas por más tiempo a altas temperaturas.

Para hacer la inyección de aire a las cámaras de incineración fue necesario hacer un tubo colector al incinerador, a este tubo van unidas en un extremo todas las conexiones a la cámara de incineración y en el otro extremo el turbo soplador, que proporcionará la presión necesaria de todo el proceso. Este colector inyecta aire a presión al quemador que ya está equipado con el gas combustible, haciendo así la mezcla de aire-combustible antes de que éste llegue a la flama.

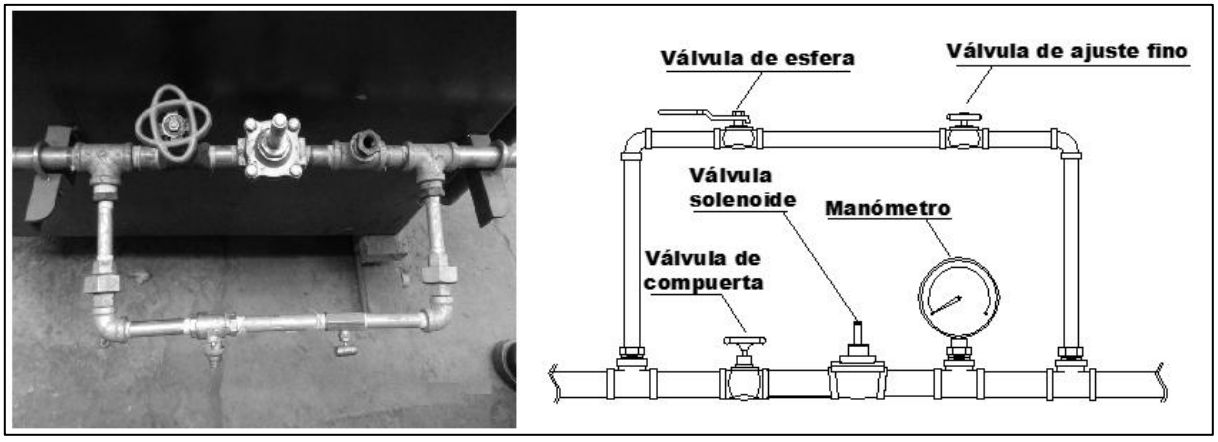

Figura 4.14 Esquema de tren de válvulas para la inyección de gas lp para el caso de estudio

Esta configuración también permite dejar de suministrar gas cuando la combustión en la cámara primaria haya iniciado y alcanzado cierta temperatura, para lo cual ya no es necesario el suministro de combustible. En este momento se debe de seguir inyectando aire en exceso para tener una combustión completa. Es posible dejar de usar exceso de aire al superar los 850°C en la cámara secundaria ya que a esa temperatura el humo y los olores son eliminados y sólo quedan algunos residuos (Myers, 1988).

Adicionalmente se le colocaron dos inyectores de aire del colector para agregar presión, éstos fueron colocados en la pared del horno con la finalidad de provocar un flujo concéntrico turbulento en el interior de la cámara de incineración como se muestra en la Figura 4.15. A estos suministradores no se les colocaron válvulas de compuerta, el caudal de aire será constante o puede ser interrumpido, dependiendo de la temperatura de la cámara primaria.

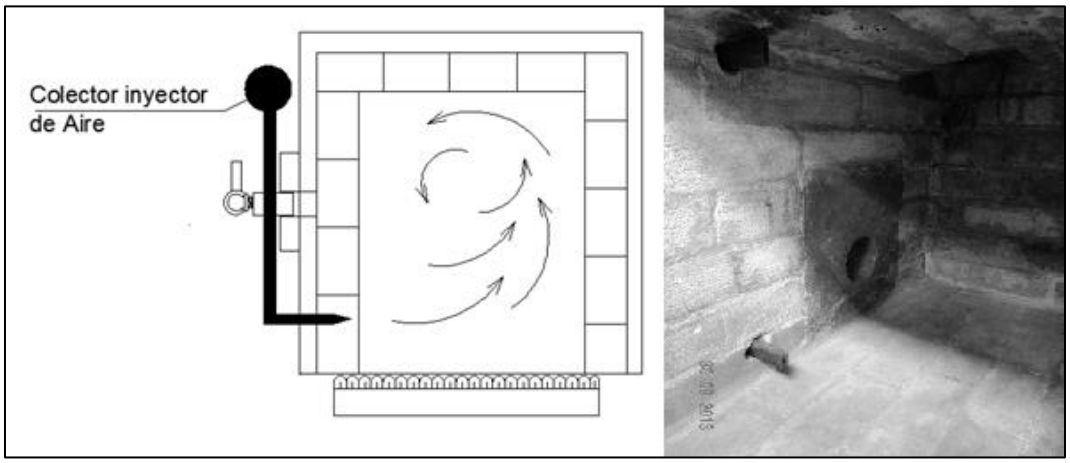

Figura 4.15 Vista exterior e interior de la inyección de aire desde el colector implementado en el prototipo del caso de estudio

Para que el sistema de control de temperatura pueda funcionar necesita transductores de temperatura que resistan temperaturas mayores a los 800˚C y que transmitan señales medibles por los pirómetros, los transductores utilizados fueron termopares tipo K de aleación Cromel-Alumel con protección de cerámica alúmina (Figura 4.16).

Éstos están asegurados a cada cámara del horno por medio de dos cabezales roscables. Los cables que salen de cada uno de ellos se dirigen al tablero de control en dos de ellos se encuentra el control de temperatura que la regula abriendo o cerrando el flujo de gas en la cámara primaria; en la cámara

secundaria la temperatura debe de ser constante, lo que quiere decir que la mayor parte del tiempo la flama estará encendida.

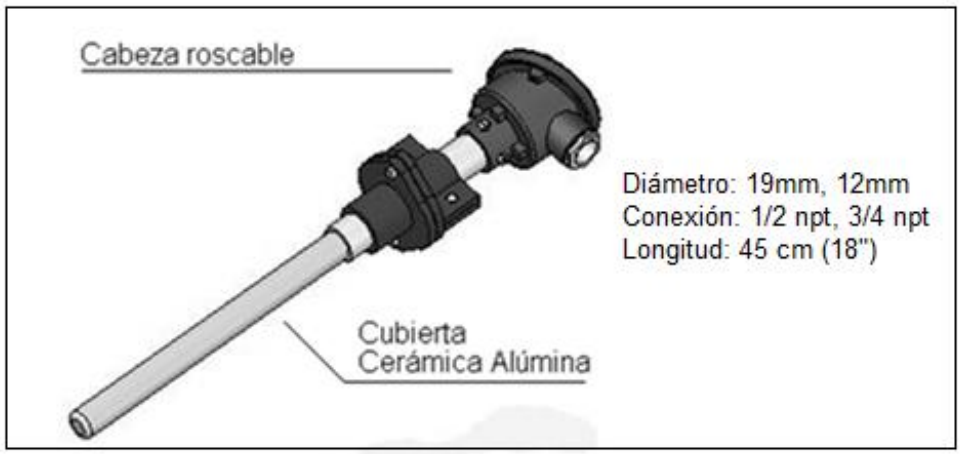

Figura 4.16 Termopar industrial con tubo protector cerámico instalado en cámaras de incinerador para censar temperatura de gases

Como se determino en el diseño del horno la cámara primaria tiene capacidad para albergar 15 kg de biomasa como se puede apreciar en la Figura 4.17. El incinerador tiene un acabado de pintura metálica color azul para exteriores que lo protegen de los agentes oxidantes de la atmósfera.

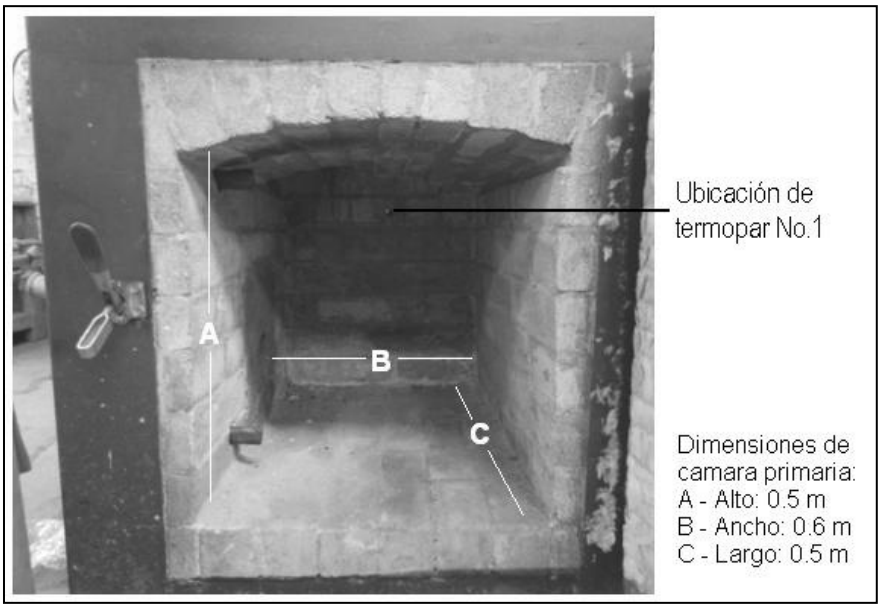

Figura 4.17 Cámara primaria del incinerador: vista frontal

4.2. Acoplamiento del generador de vapor al incinerador (Figura 4.18)

La caldera se unió a la parte superior del horno por medio de una placa de acero a la que se le dio forma cilíndrica con el diámetro exterior del mismo tamaño del diámetro interior de la caldera. Para darle mejor soporte se le aseguraron tres piezas de solera en la base con puntos de soldadura, para esto fue necesario levantarla con un diferencial y remover las patas. La sección de acoplamiento de la caldera y el al horno de incineración se puede apreciar en la Figura 4.18.

En la parte interior de este acoplamiento se forró de igual forma que el incinerador con fibra cerámica como protección al usuario. En este espacio cilíndrico anterior a la caldera también se instaló una entrada de aire para adicionar aire y fuerza.

Es imprescindible que se tengan pérdidas de energía ya que es un ciclo abierto. Para hacerlo más eficiente es necesario cerrar el ciclo con los elementos faltantes de una central térmica convencional como se recomienda al final de este trabajo, en este caso se debe colocar un condensador y una bomba de retroalimentación.

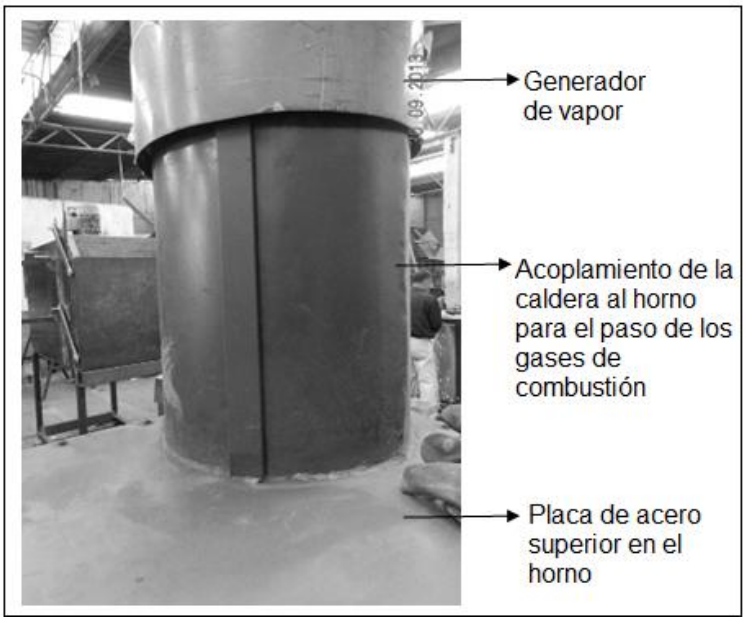

Figura 4.18 Fotografía del acoplamiento del horno al generador de vapor del caso de estudio

4.3. Tratamiento de gases de incineración

Cuando se considera la contaminación de aire hay que tomar en cuenta el control de emisiones que puede consistir en diluir la cantidad de contaminantes, hasta hacer una separación eficiente de cada uno de éstos. Esto depende de la energía

disponible para el tratamiento, de algunas características físicas como es la densidad, solubilidad, tamaño y forma de partículas contenidas en los gases y de la normatividad ambiental vigente.

En este caso se diseñara un lavador húmedo de gases, la mayoría de estos dispositivos usan una corriente de agua para aumentar la eficiencia de recolección. Las partículas sólidas interactúan con esta corriente de agua y son removidos como lodo líquido o posiblemente como una solución. Si no se toman las medidas de precaución correctas, esto se podría convertir en un problema de contaminación de agua. En general las lavadoras de gases funcionan con corriente fría para bajar la temperatura de los gases de incineración, lavan la corriente de aire y algunos también remueven gases (Sell, 1992).

El método de atomización es un método de baja energía entre los diseños existentes para lavadores de gases, en el que el gas es removido con el líquido drenado. El gas sucio que entra en una cámara amplia golpea con las gotas liquidas y se genera turbulencia, en esta zona muchas de las partículas más grandes se asentarán por gravedad, inercia o fuerza centrífuga, las partículas de polvo y gotas de agua chocan y se adhieren. Un atomizador con mayor presión producirá gotas de agua más finas, más turbulencia y mayor eficiencia de recolección. El tamaño óptimo de la gota de agua es aproximadamente 100µm. Arriba de 100µm hay muy pocas partículas y por debajo de este tamaño, las gotas de agua tienen fuerza insuficiente (Figura 4.19) (Brunner, 1985).

El agua que se requiere para este tipo de proceso puede ser reutilizada después de pasar por algún proceso como filtración o sedimentación en diferentes niveles para bombearse nuevamente. Para el diseño de este lavador de gases se usará la sedimentación para reutilizar el agua empleada.

a) Contaminantes presentes en los gases

Los contaminantes presentes en los gases producto de la incineración son:

- Óxidos de azufre, como el SO_2 y el SO_3.
- Acido clorhídrico (HCl)
- Monóxido de carbono (CO) originado por una combustión incompleta
- Óxidos de nitrógeno (NO_x) La procedencia de óxidos de nitrógeno puede ser de dos tipos:
  - ✓ NO_x Térmico, originado por la reacción entre el nitrógeno y oxígeno presentes en el aire de combustión a altas temperaturas.
  - ✓ NO_x Combustible, producto de la reacción entre el oxígeno del aire y el nitrógeno presente en el combustible.

- Compuestos orgánicos tales como dioxinas, furanos, clorobencenios, clorofenoles e hidrocarburos poliaromáticos.
- Partículas compuestas de compuestos no quemados provocados por combustiones incompletas.
- Metales pesados presentes en el flujo de residuos como plomo, cobre, cadmio, mercurio, siendo éste último el más problemático al volatilizar a 330 °C.

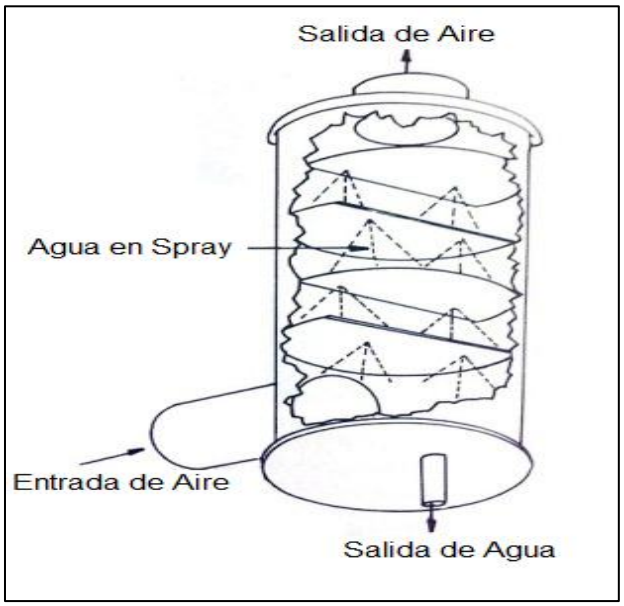

Figura 4.19 Modelo de lavador de gases del tipo atomizador (Sell, 1992)

b) Emisiones a la atmósfera NOM-098-SEMARNAT-2004

Los límites máximos permisibles de emisiones son los establecidos en la Tabla de la Norma Oficial Mexicana antes mencionada y se presenta en la Tabla 4.8.

4.3.1. Post-combustión

Tiene por objetivo garantizar la completa oxidación de los productos gaseosos que provienen de la primera cámara, por esto está considerada como el primer tratamiento de gases.

Los parámetros de funcionamiento deben ser:

- Tiempo de residencia mayor a 2 segundos.
- Temperaturas 850° - 1,100°C
- Oxígeno en exceso

La turbulencia garantiza el correcto mezclado de los gases de combustión que provienen de la primera cámara con el aire comburente, presente en exceso respecto del valor estequiométrico (el necesario para la completa combustión teórica).

El tiempo de residencia (que es el tiempo que permanecen los humos en la segunda cámara) debe ser mayor a 2 segundos (valor fijado por la NOM-098-SEMARNAT-2002), medidos a la temperatura de trabajo de esta cámara y a la máxima potencialidad del sistema, en las peores condiciones del sistema.

La temperatura debe ser superior a 850°C (si el contenido de sustancias orgánicas halogenadas expresadas en Cloro no supera el 1%, y debe ser superior a 1,100 °C si el contenido supera el 1%).

Tabla 4.8 Límites máximos permisibles (NOM-085-SEMARNAT-1994)

Contaminante	**Límite de emisión**	**Frecuencia de emisión**	**Norma que aplica o método**
CO (mg/m^3)	63	Continuo	Infrarrojo No Dispersivo y Celda Electroquímica
HCl (mg/m^3)	15	Trimestral	NMX-AA-070-1980
NOx (mg/m^3)	300	Semestral	Quimiluminiscencia
SO2 (mg/m^3)	80	Semestral	NMX-AA-55-1979
Partículas (mg/m^3)	50	Semestral	NMX-AA-10-SCFI-2001
Arsénico Selenico Cobalto Niquel Manganeso Estaño (mg/m^3)	0.7*	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Cadmio (mg/m^3)	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Plomo Cromo total Cobre Zinc (mg/m^3)	0.7*	Semestral	Espectrometría de absorción atómica
Mercurio (mg/m^3)	0.07	Semestral	Espectrometría de absorción atómica con vapor frío
Dioxinas y Furanos EQT (ng/m^3) Instalaciones de incineración nuevas	0.2	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de alta resolución
Dioxinas y Furanos EQT (ng/m^3) Instalaciones de incineración existentes antes de la publicación de la NOM	0.5	Anual	Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas de baja resolución

Todos los valores están referidos a condiciones estándar: 1 atmósfera, base seca, 25°C y 7% de Oxígeno O_2, de acuerdo a la NOM-085-SEMARNAT-1994 **Suma total metales pesados.*

4.3.2. Análisis de los gases de combustión por el método del peso molar

La combustión es la rápida oxidación de un material oxidable por medio de cualquier agente oxidante y que resulta en la liberación de energía térmica, acompañada por lo general de una llama. Esta última, aún cuando exista, puede tener tan poca luminosidad que sea difícilmente observable (como ejemplo se tiene la combustión del hidrógeno en el oxígeno). En términos generales la combustión, incluye cualquier combustible y cualquier oxidante arbitrario. En cualquier proceso de combustión, ocurre una reacción química que tiene como resultado la formación de nuevos compuestos a partir de los elementos que constituyen los reactantes originales. Sin embargo, la masa de cada elemento incluido permanece inalterada en la reacción.

Las reacciones de combustión que se producen en el horno son las siguientes:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \qquad \text{Ec 4.4}$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \qquad \text{Ec 4.5}$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \qquad \text{Ec 4.6}$$

$$Cl_2 + H_2 \rightarrow 2HCl \qquad \text{Ec 4.7}$$

Los RSU se quemarán utilizando aire como comburente. El oxígeno necesario para llevar a cabo la oxidación de las especies procederá del aire inyectado en el horno así como del oxígeno presente en los propios residuos. A todas las sustancias que están presentes al inicio de la reacción se les llama reactantes. Todas las que quedan después de la reacción química se denominan productos La Tabla 4.9 muestra el cálculo del oxígeno necesario para llevar a cabo la combustión estequiométrica para 100 kg de RSU (Fernández, 2007).

De acuerdo a la Tabla 4.6 la ecuación de la combustión teórica quedaría:

$$5.0967C + 3.8525H_2 + 0.2328O_2 + 0.1042N_2 + 0.0006S \qquad \text{Ec 4.8}$$

El número de moles de oxígeno requeridos para la completa combustión de 5.0967 moles de carbono, 3.8525 moles de hidrógeno y 0.0006 moles de azufre se pueden calcular como 5.097+3.8525+0.0006=8.9501 moles. Como los 0.2328 moles de oxígeno que se encuentran en el combustible se restan de este resultado, se obtienen 8.717, que es el número de moles que se necesitan.

Las cantidades de nitrógeno y oxígeno suministradas se anotan entonces en el lado izquierdo de la ecuación. Todo el oxígeno se consume y el nitrógeno suministrado se escapa junto con 0.1043 mol de N_2 ya presente en el combustible.

Por tanto el nitrógeno en el producto será 32.7760+0.1043=33.88 moles. La ecuación teórica de aire quedaría:

$$8.717O_2 + 32.7760N_2 \rightarrow 5.0967C + 3.8525H_2 + 0.2328O_2 + 0.1042N_2 + 0.0006S + 33.88N_2 \quad \text{Ec 4.9}$$

El aire de combustión se utiliza aire como comburente por ser la fuente de oxígeno más abundante, barato y fácil de manejar.

Sin embargo, según las circunstancias geográficas y metereológicas, pueden presentarse trazas de otros compuestos, monóxido de carbono, anhídrido sulfuroso, hidrocarburos ligeros y ozono. También contiene vapor de agua en mayor o menor proporción dependiendo de la climatología: presión barométrica y temperaturas. Además localmente puede contener muchos más compuestos dependiendo de equilibrios líquido/vapor, emisiones de fuentes contaminante, etc. (Castells y Alsina, 2012).

Tabla 4.9 Cálculo del peso molar del oxígeno en la combustión estequiométrica

Reacción oxidac.	Productos	% Peso	Peso mol (kg/kmol)	Cantidad (kmol/kg RSU)	Coeficiente De O_2	Total de moles O_2
C + O_2	CO_2	61.1600	12	5.0967	1.0000	5.0967
H_2 +1/2 O_2	H_2O	15.4100	2	7.7050	0.5000	3.8525
O_2	O_2	7.4500	32	0.2328	1.0000	-0.2328
N_2	N_2	2.9200	28	0.1043	0.0000	0.0000
S + O_2	SO_2	0.0200	32	0.0006	1.0000	0.0006
Cenizas	Cenizas	13.0400				
	TOTAL	100.00		13.1393		8.7170

El aire atmosférico es una mezcla de oxígeno, nitrógeno, argón, vapor de agua, anhídrido carbónico y partes muy pequeñas de otros gases, en cantidades variables. Las cantidades de vapor de agua, anhídrido carbónico y otros gases son tan pequeñas que son despreciables y por consiguiente se puede considerar al aire como una mezcla de 21% de oxígeno, 78% nitrógeno y 1% argón, en volumen. Como los pesos moleculares del oxígeno, nitrógeno y argón son respectivamente 28, 32 y 40, se verifica que el peso molecular promedio del aire es de 28.96.

En las reacciones químicas que envuelven el aire, sólo interviene el oxígeno del aire, mientras que los elementos inertes, nitrógeno y argón, escapan juntos con los productos de combustión. Por tanto, a fin de simplificar los cálculos necesarios, basta considerar al aire como una mezcla del componente activo, 21% en

volumen, mezclado con el componente inerte nitrógeno, que constituye 79% restante del volumen del aire. Sin embargo, si se calcula el peso molecular promedio del aire sobre esta base aproximada, resulta ser:

$$(0.21)\ (32) + (0.79)\ (28) = 28.84$$

Este valor es menor que el peso molecular correcto, que se vio era de 28.96. A fin de compensar el déficit, en la práctica se acostumbra a considerar que el nitrógeno del aire tiene un peso molecular de 28.16 (en lugar del valor correcto de 28). Entonces, el peso molecular del aire, considerándolo como una mezcla de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen resulta ser:

$$(0.21)\ (32) + (0.79)\ (28.16) = 28.96$$

El nitrógeno del aire con el peso molecular ficticio de 28.16 se conoce como nitrógeno atmosférico. Con base en esta suposición, se observa que para suministrar 100 moles de aire, es necesario suministrar 21 moles de oxígeno de peso molecular 32 y 79 moles de nitrógeno atmosférico de peso molecular 28.16.

En otras palabras, para suministrar 1 mol de oxígeno para combustión se deben suministrar además 79/21= 3.76 moles de nitrógeno atmosférico (Tabla 4.10), haciendo un total de 4.76 moles de aire (Fernández, 2007).

Tabla 4.10 Factores de moles para una combustión completa

Elementos	Mol/mol de materia prima para una combustión completa					
	Combustión			Productos de combustión		
	O_2	N_2	Aire	CO_2	H_2O	N_2
C	1.00	3.76	4.76	1.00		3.76
H_2	0.50	1.88	2.38		1.00	1.88
O_2						
N_2						
CO	0.50	1.88	2.38	1.00		1.88
CO_2						
S	1.00	3.76	4.76	1.00		3.76

Para calcular los moles de aire necesarios para una combustión completa se tiene la Tabla 4.11.

Una forma alterna de obtener los moles de aire es usar los moles de O_2 requeridos que aparecen en la Tabla 4.9, entonces se obtiene

$$(8.717)\ (3.76) = 32.7755 \text{ mol } N_2$$

Entonces, sumando el resultado anterior a los moles de O_2 resulta

32.7755 + 8.7169 = 41.4924 moles de aire

Lo cual da el mismo resultado que se obtuvo en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Moles de aire necesarios para llevar a cabo una combustión completa

Elemento	Moles (100 kg RSU)	Moles de aire (100 kg RSU)	Total de moles de aire
C	5.0967	4.76	24.2598
H_2	7.7050	2.38	18.3379
O_2	0.2328	Reduce el O_2 requerido	-1.1081
N_2	0.1043	Inerte en la combustión	
S	0.0006	4.76	0.0028
Total			41.4924

Una forma alterna de obtener los moles de aire es usar los moles de O_2 requeridos que aparecen en la Tabla 4.9, entonces se obtiene

(8.717) (3.76) = 32.7755 mol N_2

Entonces, sumando el resultado anterior a los moles de O_2 resulta

32.7755 + 8.7169 = 41.4924 moles de aire

Lo cual da el mismo resultado que se obtuvo en la Tabla 4.11.

El aire suministrado en cualquier reacción de combustión está casi siempre en exceso del requerimiento teórico porque no se puede asegurar en la práctica la completa combustión, si sólo se suministra el aire mínimo. Puede que no haya suficiente contacto entre el oxígeno del aire y la superficie del combustible o puede no haber suficiente turbulencia en el aire para la completa mezcla de los dos. En general, el aire que se suministra se expresa como porcentaje de aire teórico.

La ecuación teórica para la relación aire combustible es entonces:

$$Z_s = \frac{(8.717)(4.76)(28.96)}{100} = 12.01$$

Como el aire suministrado es de 30% de la cantidad teórica se obtiene: relación aire combustible

Z=1.3 * 12.01 = 15.613

En una combustión controlada, con emisión de calor, en el cual los residuos patogénicos son convertidos en gases residuales y sólidos no combustibles con el objetivo de reducir su volumen y peso, pudiéndose aprovechar la energía generada para obtener vapor, agua caliente y/o electricidad.

Se debe tener en cuenta que, a la combustión, que es de por sí un proceso complejo, se le debe sumar el hecho de que en la incineración aplicada a residuos, este es precisamente el combustible, y que se trata de una mezcla heterogénea de sustancias con composiciones químicas diversas.

4.4. Tablero eléctrico

En términos generales, los tableros eléctricos son gabinetes en los que se concentran los dispositivos de conexión, control, maniobra, protección, señalización y distribución; todos estos dispositivos permiten que una instalación eléctrica funcione adecuadamente.

Una importante medida de seguridad para los tableros eléctricos es la instalación de interruptores de seguridad. Dichos interruptores de seguridad suelen ser de dos tipos: termo magnéticos, que se encargan de proteger tanto el tablero eléctrico como la instalación de variaciones en la corriente, y diferenciales, que están dirigidos a la protección de los aparatos.

Tipos de tableros eléctricos

a) Según su ubicación en la instalación eléctrica, los tableros eléctricos se clasifican en:

- **Tablero principal de distribución:** Este tablero está conectado a la línea eléctrica principal y de él se derivan los circuitos secundarios.
- **Tableros secundarios de distribución:** Son alimentados directamente por el tablero principal.
- **Tableros de paso:** Son tableros que contienen fusibles cuya finalidad es proteger derivaciones que por su capacidad de transporte no pueden ser conectadas directamente al alimentador, subalimentador o línea de distribución del cual están tomadas.
- **Tablero de comando:** Son tableros que contienen dispositivos de protección y maniobra que permiten proteger y operar en forma simultánea sobre artefactos individuales o grupos de artefactos pertenecientes a un mismo circuito.
- **Tableros centro de control:** Son tableros que contienen dispositivos de protección y de maniobra o únicamente dispositivos de maniobra y que

permiten la operación de artefactos en forma individual, en conjunto, en subgrupos en forma programada o no programada.

b) Según el uso de la energía eléctrica

- Centro de control de motores
- Subestaciones
- Alumbrado
- Centros de carga o de uso residencial
- Tablero de distribución
- Celdas de seccionamiento
- Centro de distribución de potencia y centro de fuerza

Este tablero funciona como centro de mando para cada una de las etapas del proceso: Incineración, operación de turbina generadora de energía eléctrica y lavador de gases.

4.4.1. Diseño de Tablero eléctrico

En este proyecto se ocupará un tablero centro de control con la finalidad de controlar las válvulas solenoides, turboventilador y bomba de agua. El tablero es energizado al activar un selector de dos posiciones (Figura 4.20A), los solenoides son accionados por dos botones pulsadores iluminados (Figura 4.20B) uno para cada solenoide; se utilizan dos luces piloto con LED integrado en color rojo (figura 4.20A) las cuales indican la salida de los solenoides.

Los termopares son los encargados de censar la temperatura de la cámara de combustión, post-combustión y la emisión de gases al medio ambiente ya que la NOM-098-SEMARNAT-2002 especifica que la emisión de gases no debe rebasar una temperatura de 250°C.

Cuando se utiliza un equipo diferente a un lavador seco, estos termopares están conectados a tres pirómetros (Figura 4.21) los cuales actuarán de manera independiente en conjunto con un solenoide respectivo y una vez alcanzada la temperatura máxima los pirómetros serán los encargados de sacar de funcionamiento los solenoides.

Para verificar el estado de apagado de los solenoides se utilizaron dos botones iluminados los cuáles indican cuando los solenoides salgan de funcionamiento, de igual forma cuando disminuya la temperatura en las cámaras de combustión, los solenoides entrarán en funcionamiento para mantener una temperatura estable mientras se realiza la combustión.

El tercer termopar trabaja en conjunto con su pirómetro respectivo el cual sólo cumple la función de censar los gases de salida. El turboventilador permanece siempre encendido y es accionado por un botón pulsador iluminado, la bomba de agua es accionada por un botón pulsador que se apaga de la misma forma.

El tablero se diseñó en un principio con la turbina en el interior, sin embargo cuando se puso en operación el vapor ocasionaba que el proceso de operación fuera muy incómodo, por lo que se cambió de lugar para su mejor aprovechamiento. Como se puede apreciar en el plano anexo se colocó a la salida de la caldera.

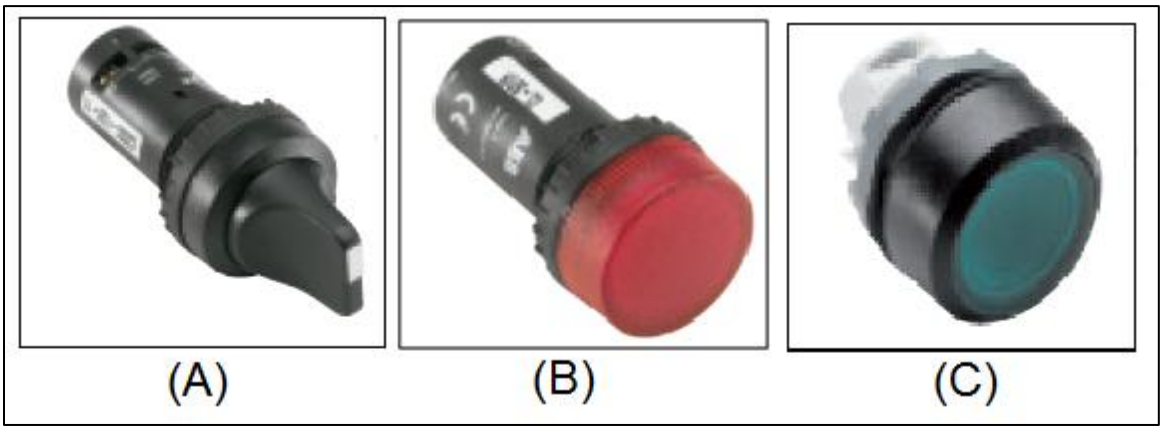

Figura 4.20 Botones instalados en el tablero de control para el caso de estudio (A) Selector de dos posiciones ABB, (B) luz piloto con LED integrado ABB y (C) pulsador luminoso momentáneo ABB

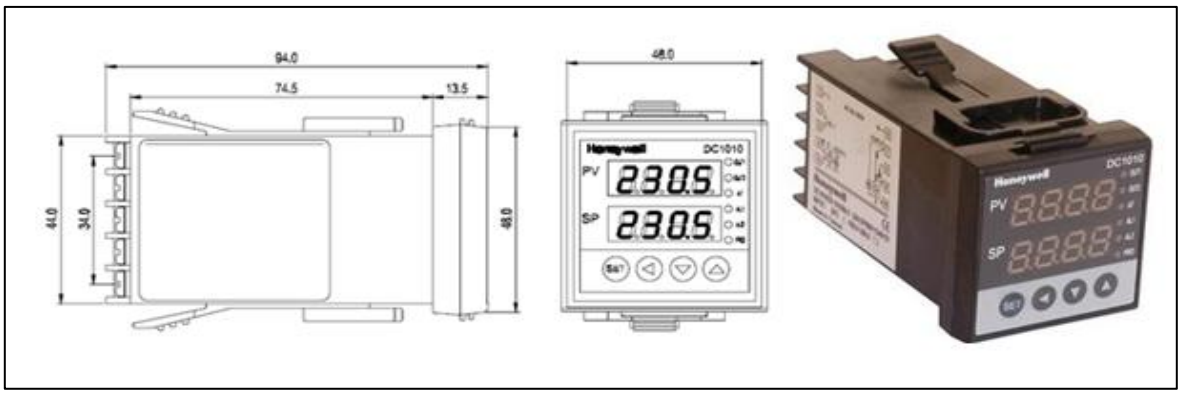

Figura 4.21 Diagrama y fotografía de pirómetro Honeywell DC1010 que se instalados en el tablero de control

El diagrama de la Figura 4.22 representa el diagrama de escalera del proceso de funcionamiento para los quemadores, turbo-soplador y bomba para lavadora de gases.

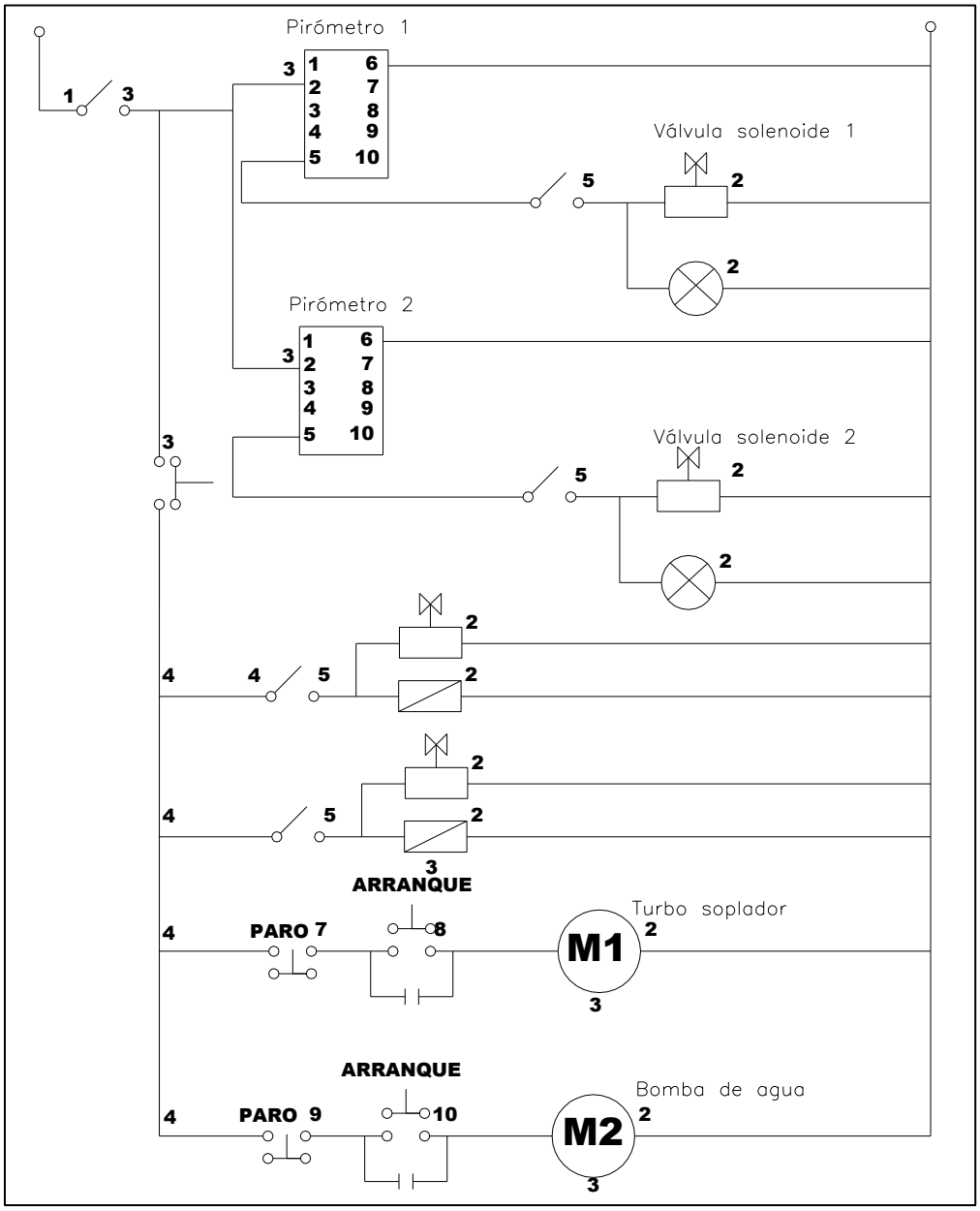

Figura 4.22 Diagrama eléctrico respecto al control de incinerador, turbo ventilador y bomba de agua

El tablero se diseñó en un principio con la turbina en el interior, sin embargo cuando se puso en operación el vapor ocasionaba que el proceso de operación fuera muy incómodo, por lo que se cambió de lugar para su mejor

aprovechamiento. Como se puede apreciar en el plano anexo se colocó a la salida de la caldera. El funcionamiento del tablero de control se describe en la Figura 4.23.

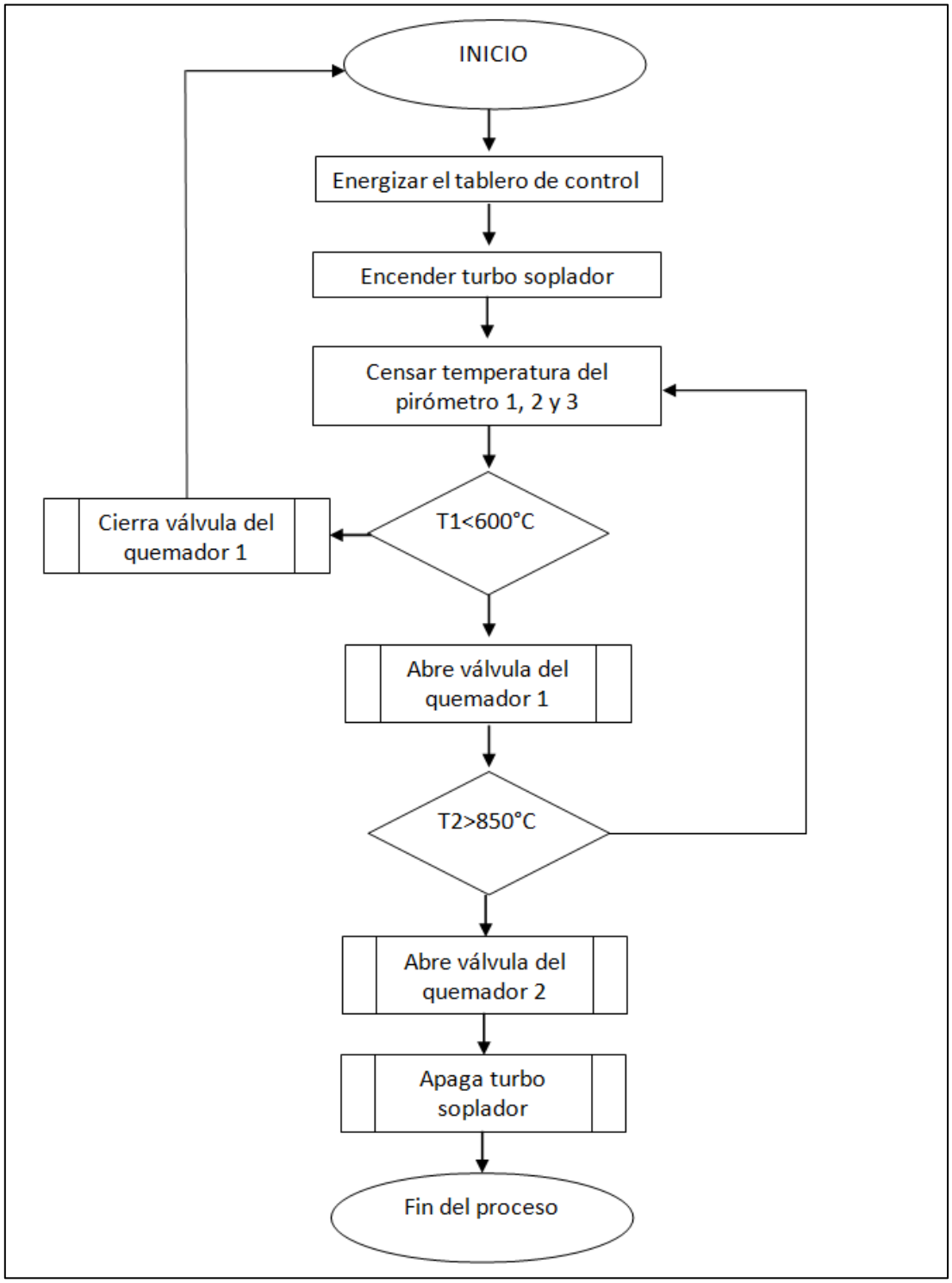

Figura 4.23 Diagrama de flujo del proceso de operación del incinerador

4.5. Manual para el uso del generador de vapor

a. Recomendaciones previas (refiérase a Figura 4.24)

1) La descarga de la válvula de seguridad (14) se recomienda se dirija al ambiente parte alta y aislada de la presencia del personal.
2) La salida de vapor del alojamiento de la turbina se recomienda que descargue por lo menos al drenaje.
3) Si el equipo no está en uso y/o servicio, debe guardarse en un lugar limpio y seco.
4) Si se planea no usar el equipo durante periodos largos (seis meses o más), es recomendable tomar medidas de precaución para asegurar que permanezca en buenas condiciones y que tenga un correcto funcionamiento.
    - Asegurarse que ambos tanques del generador (1 y 2) estén completamente vacíos.
    - Una vez que esté seco el generador cerrar todas las válvulas.
    - No es recomendable mover ninguna tubería y/o instrumento de medición.

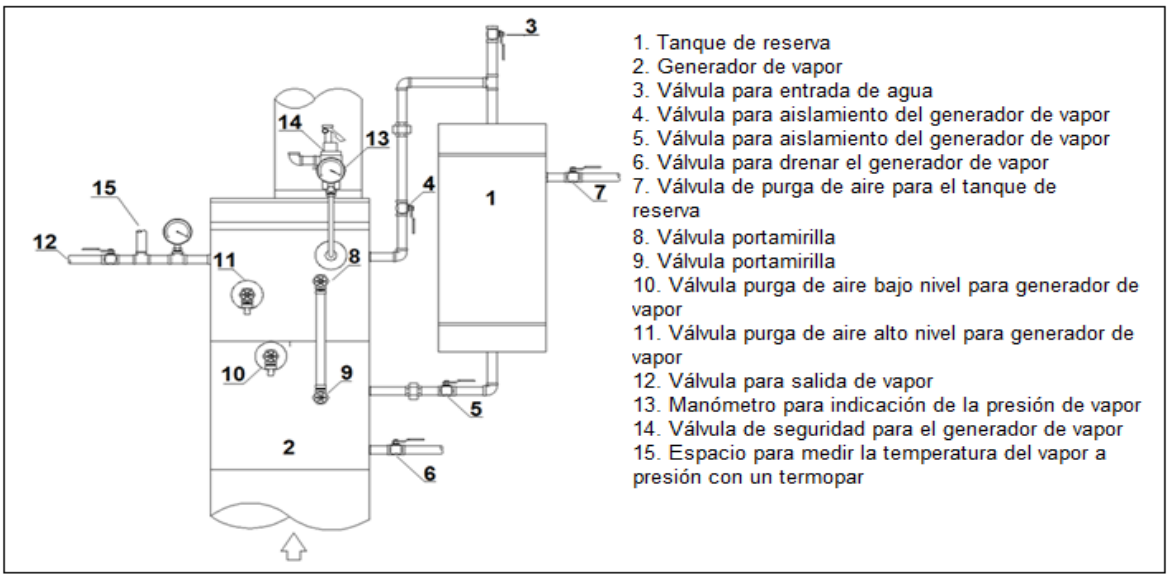

Figura 4.24 Configuración general del generador de vapor del caso de estudio

b. Procedimiento de llenado

1) Asegúrese que la unidad generadora de vapor se encuentre fría y con el indicador de presión en 0 psig (13).
2) Gire la válvula 11 en el sentido opuesto de las manecillas del reloj con cuidado y lentamente para asegurarse que el generador de vapor no tiene presión.
3) Revise la posición de las válvulas según la Tabla 4.12

Tabla 4.12 Posicionamiento de las válvulas antes del vertido del agua al generador de vapor

Válvula	Posición
3	Abierta (palanca paralela a la tubería)
4	Abierta (palanca paralela a la tubería)
5	Abierta (palanca paralela a la tubería)
6	Cerrada (palanca transversal a la tubería)
7	Abierta (giro total a la izquierda)
8	Abierta (giro total a la izquierda)
9	Abierta (giro total a la izquierda)
10	Abierta (giro total a la izquierda)
11	Abierta (giro total a la izquierda)
12	Cerrada (palanca transversal a la tubería)

Una vez que se han revisado que las válvulas estén en las posiciones correctas se procede al vertido de agua desmineralizada en el generador de vapor siguiendo los pasos que se describen a continuación:

1) Tener listos y a la mano 35 lts de agua desmineralizada.
2) Verter el agua poco a poco (ayudándose de un embudo) por la válvula 3 hasta que empiece a salir por la válvula 10, cuando esto ocurra girar la válvula 10 hacia la derecha (totalmente cerrada), a partir de ese momento se podrá observar el incremento de nivel a través de la mirilla, el llenado deberá ser hasta ¾ de inclinación de la mirilla.
3) La válvula 11 permitirá no sobrepasar el nivel indicado, ya que si esto ocurre empezará a salir agua por esta válvula, por lo que se debe suspender el llenado y cerrar dicha válvula.
4) Revisar la posición de las válvulas según la Tabla 4.13

.

Tabla 4.13 Posicionamiento de las válvulas después del vertido de agua en el generador de vapor

Válvula	Posición
3	Cerrada (palanca transversal a la tubería)
4	Cerrada (palanca transversal a la tubería)
5	Cerrada (palanca transversal a la tubería)
6	Cerrada (palanca transversal a la tubería)
7	Cerrada (giro total a la izquierda)
8	Abierta (giro total a la derecha)
9	Abierta (giro total a la derecha)
10	Cerrada (giro total a la derecha)
11	Cerrada (giro total a la derecha)
12	Cerrada (palanca transversal a la tubería)

Una vez que se han logrado las condiciones mencionadas el generador de vapor se encuentra listo para dar paso al proceso de calentamiento, el cual se describe a continuación.

4.6. Proceso de calentamiento

a. Condiciones iniciales (refiérase Figura 4.25)

1) Verificar que las válvulas de gas estén cerradas
2) Verificar que la cámara primaria esté libre de cenizas o de algún residuo si se ha usado con anterioridad
3) Llenar la cámara primaria del horno preferentemente con biomasa o RSU, el tiempo de operación del horno dependerá de la cantidad y composición del contenido.

b. Procedimiento de calentamiento (refiérase Figura 4.26)

1) Energizar el tablero de control de incineración con el selector girándolo a la derecha (Figura 4.27b)
2) Encender el piloto del quemador de las cámaras primaria y secundaria, y vigilar que permanezcan encendidos
3) Abrir al máximo la válvula de compuerta de cada tren de válvulas
4) Iniciar el pirómetro de incinerador 1 abriendo la válvula solenoide con el botón 2 (Figura 4.27c) y pirómetro de incinerador 2 abriendo la válvula solenoide con el botón 5, el indicador No. 3 y No. 6 avisarán cuando los quemadores de la cámara primaria y secundaria respectivamente estén encendidos.
5) Una vez que las válvulas solenoides se abran, se debe revisar que la presión de los manómetros de cada quemador sea la adecuada (0,45 kg), de lo contrario, se puede hacer uso de la válvula de compuerta y la de ajuste fino (Figura 4.14)

6) Pulsar el botón No. 9 para iniciar el turboventilador
7) Abrir suavemente las válvulas de compuerta para suministrar aire a cada quemador
8) Para vigilar que los gases de incineración lleguen a temperatura superior a los 850°C es necesario revisar el sensor de temperatura

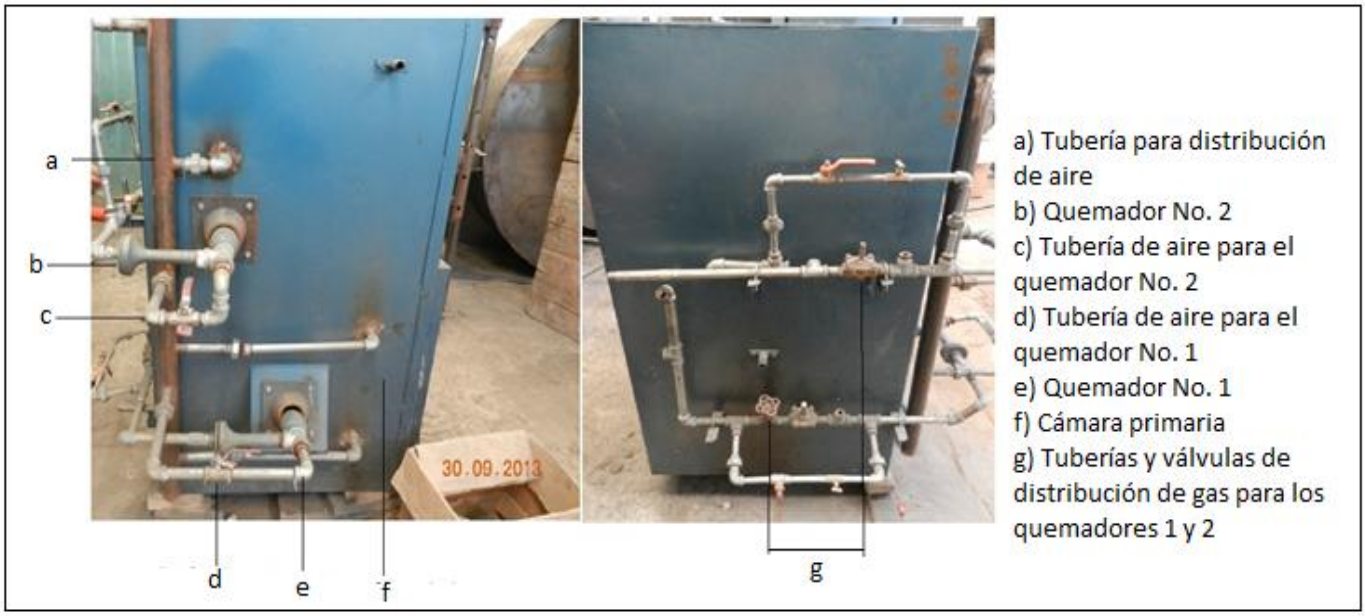

Figura 4.25 Configuración del tren de válvulas para el combustible (gas LP) e inyección de aire en el caso de estudio

4.7. Proceso de operación de turbina

1. Condiciones iniciales

El tiempo de calentamiento y levantamiento de presión con una temperatura en la caldera aproximada a los 200°C es cercana a los 45 minutos hasta llegara a una presión de operación de la turbina, que debe vigilarse apoyándose en el manómetro número 13. Esto es muy importante si se pone énfasis que la operación de este sistema es manual, cuando la presión de operación indique 140 psig el generador de vapor estará en condiciones de ser empleado, recordando que el vapor deberá salir a través de la válvula número 12 (refiérase a Figura 4.27).

2. Instrucciones de uso:

a) Pulsar el botón verde para habilitar el tablero de control de la turbina (Figura 4.28)
Nota: En caso de que indique menos de 12 Volts significa que la batería está baja y no podrá tener un correcto funcionamiento, por lo

que será necesario recargar la batería externamente. Esto se hace de la siguiente manera:

i. Pulsar el botón rojo de paro de arranque
ii. Conectar 110 V c.a en plug 14
iii. Poner el selector de corriente de carga de batería en posición derecha
iv. El tiempo de carga será por lo menos de 8 hrs
v. Pasado el tiempo poner el selector de corriente de carga de batería en posición central
vi. Retirar el cable de entrada de voltaje en plug 14
vii. Reiniciar paso 1 de arranque

b) Poner el selector de excitación de alternador en posición ON
c) Permitir la entrada de vapor con una presión máxima de 145 psig. Hasta alcanzar 950 r.p.m las cuales se leerán en el tacómetro. En estas condiciones la turbina está generando voltaje, esto es comprobable porque el indicador de corriente deberá moverse al valor de corriente para recargar la batería

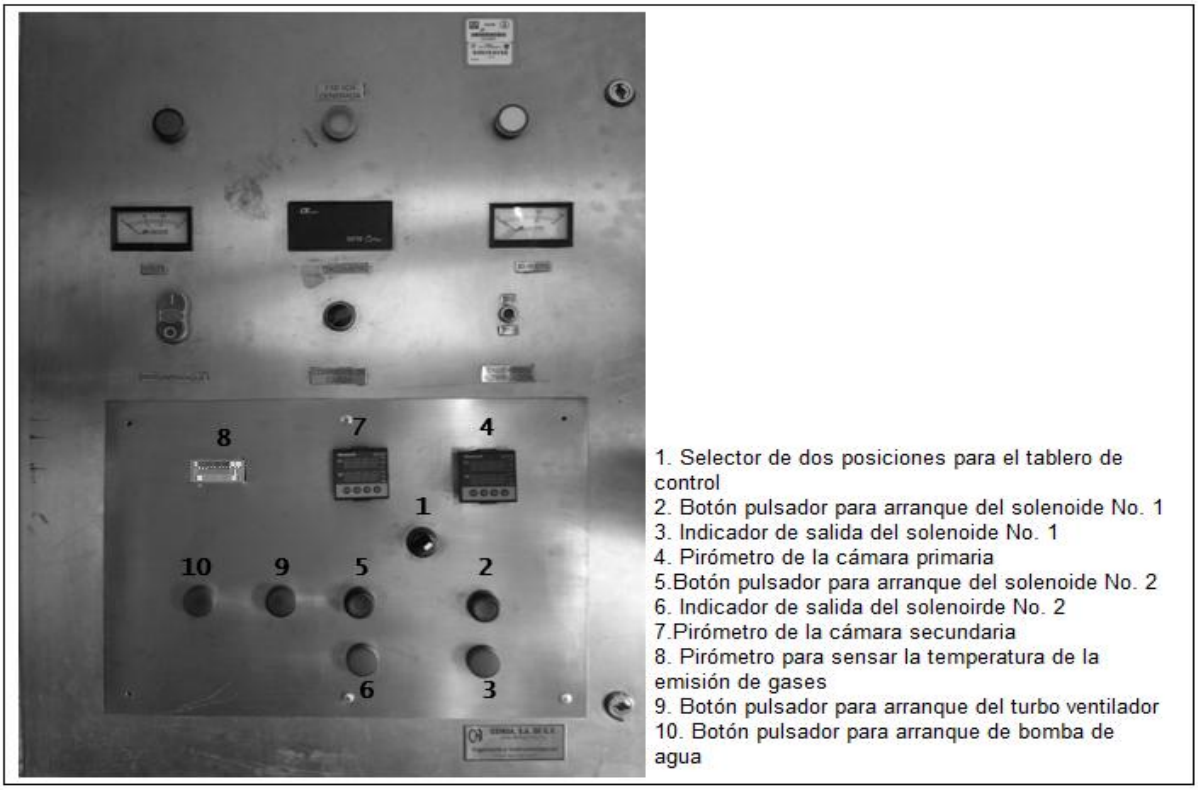

Figura 4.26 Configuración del tablero de control respecto al funcionamiento para incinerador, turbo ventilador y bomba de agua del caso de estudio

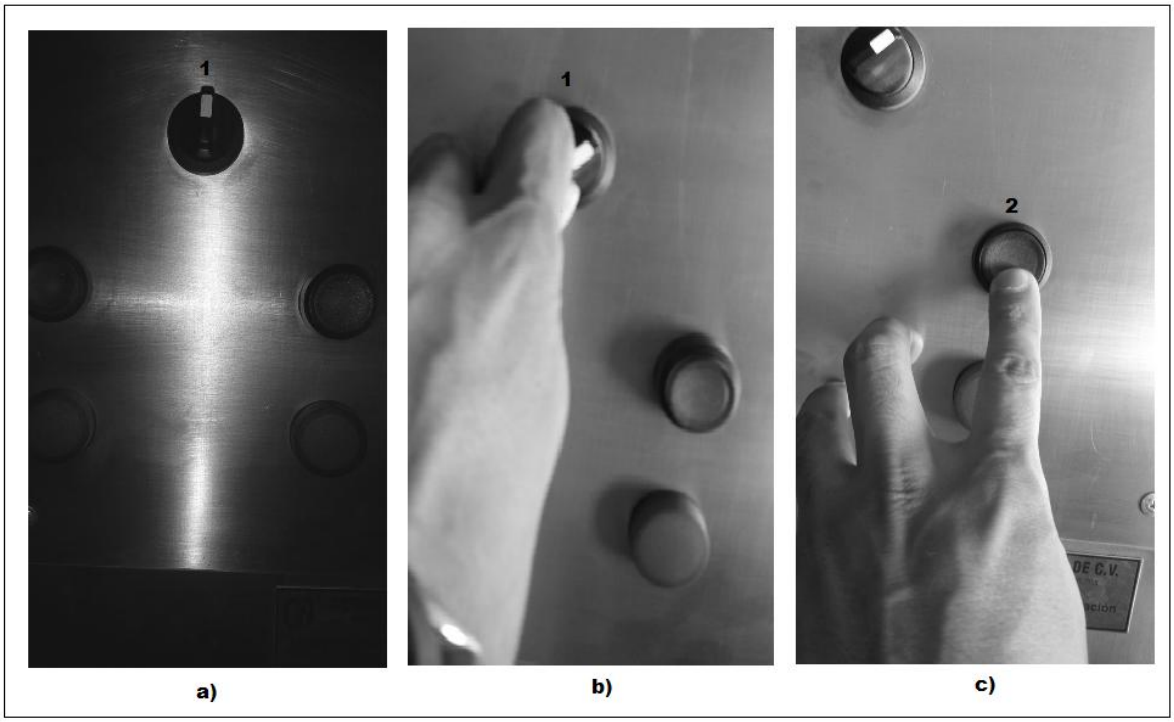

Figura 4.27 Accionamiento del tablero de control para el proceso de calentamiento

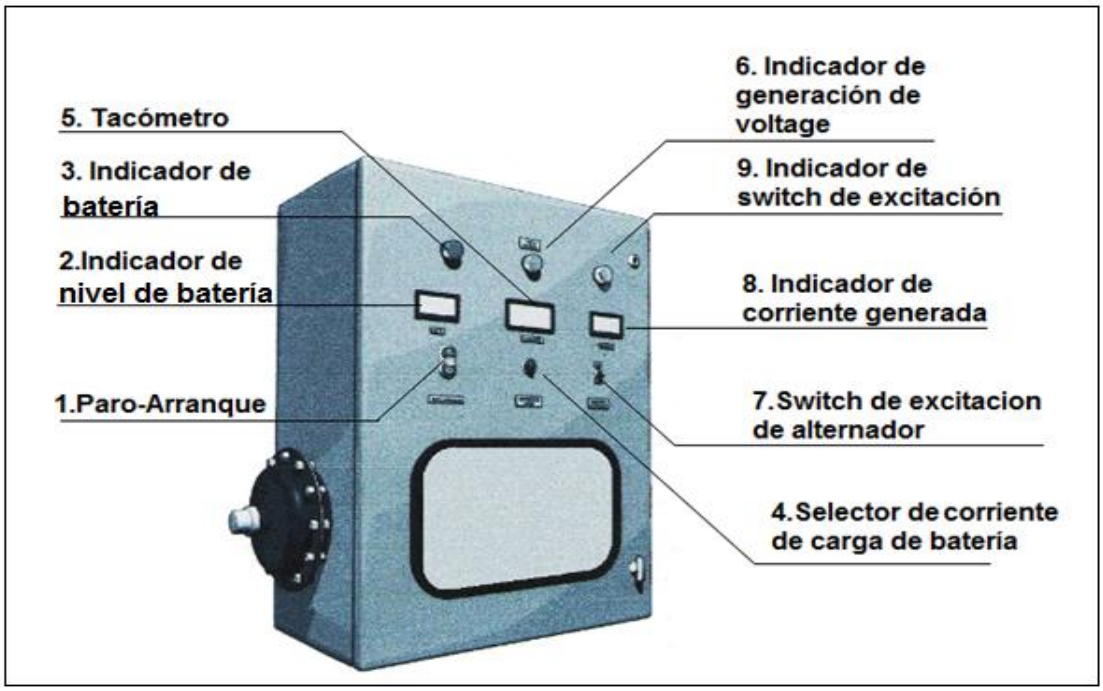

Figura 4.28 Tablero de control respecto al funcionamiento de la turbina

4.8. Ventajas y desventajas del proceso de incineración

Actualmente la incineración es uno de los métodos más utilizados en los países desarrollados para el control de los residuos sólidos municipales. Las ventajas y desventajas que se presentan en este proceso están detallas en la Tabla 4.14.

Tabla 0.44 Cuadro de ventajas y desventajas del proceso de incineración

Ventajas	Desventajas
Permite la reducción del volumen de los desechos sólidos hasta en un 90%, ayuda a recuperar espacios que se ocupan como vertederos, evita la contaminación del suelo ocasionada por los lixiviados segregados por los RSU, de igual manera se evitan plagas de animales rastreros e infecciones a las poblaciones cercanas a los espacios que se ocupan como vertederos	La operación de incineradores universales está asociada con emisiones a la atmósfera de metales pesados, sustancias orgánicas (dioxinas y furanos), hexaclorobencenos e hidrocarburos poliaromáticos, éstos últimos derivados de procesos de combustión incompleta, sustancias potencialmente tóxicas y bio acumulables muy peligrosos
Tecnologías modernas permiten tener un mayor control de emisiones a la atmósfera aunque elevan demasiado los costos	Las emisiones de partículas y gases que se generan en este proceso, provocan la contaminación de áreas cercanas a la planta, y en algunos casos, en zonas más alejadas al ser acarreadas por el viento
Tecnologías modernas permiten la recuperación de la energía calorífica generada durante la combustión de los residuos sólidos la cual se puede emplear en la generación de electricidad, calefacción y otros usos	La mala o deficiente operación del proceso conduce a una combustión incompleta de los residuos, con lo que se generan gases tóxicos que son emitidos a la atmósfera
Si no existe terreno disponible para construir un relleno sanitario o facilidades para compostaje, dentro de una distancia en que resulte económico el transporte de los residuos sólidos desde el centro de producción, un incinerador puede representar el sistema total más económico para el tratamiento de estos	Es una tecnología que requiere de altos costos de inversión para la construcción y funcionamiento de una planta, costos prácticamente no recuperables
Un incinerador diseñado de manera adecuada es capaz de procesar mezclas variables de residuos y no depende de variaciones climáticas	
La recuperación de los materiales del residuo de la incineración puede producir ingresos significantes	

La principal ventaja del proceso es que reduce el volumen y el peso de los desechos sólidos hasta en un 90%. Sin embargo, entre las desventajas se tiene que es una tecnología costosa y en la que no se recuperan básicamente los costos de la inversión, además de que se generan emisiones contaminantes que se acrecientan con una operación no adecuada del proceso. Aún cuando en el presente se cuente con equipos que tienen sistemas para un mayor control de las emisiones a la atmósfera, éstos se incrementan en su costo hasta en un 20% con lo que resulta una tecnología casi inaccesible para países en vías de desarrollo.

El proceso de incineración utilizado para el prototipo se conformará de los siguientes pasos para su proceso (Figura 4.29):

1. Realizar almacenamiento de la materia prima en este caso RSU y/o biomasa.
2. La materia prima antes mencionada se introducirá en la cámara primaria del incinerador, asegurándose de cerrar bien la misma, consecuentemente se procederá a realizar la combustión la cual se inicia en el quemador No. 1 haciendo una mezcla del combustible (gas LP) y de aire, una vez que se ha obtenido la combustión, los gases de combustión obtenidos pasarán a la cámara secundaria.
3. Los gases de combustión serán transportados a la caldera a través del acoplador horno-caldera, con el fin de calentar el agua y obtener vapor de agua sobrecalentado seco.
4. Los gases de incineración serán llevados a una lavadora de gases del tipo atomización, donde se eliminará el excedente de contaminantes mencionados en la Tabla 4.8, a su vez esta lavadora de gases cumplirá con el proceso de bajar la temperatura de los gases emitidos a la atmósfera.

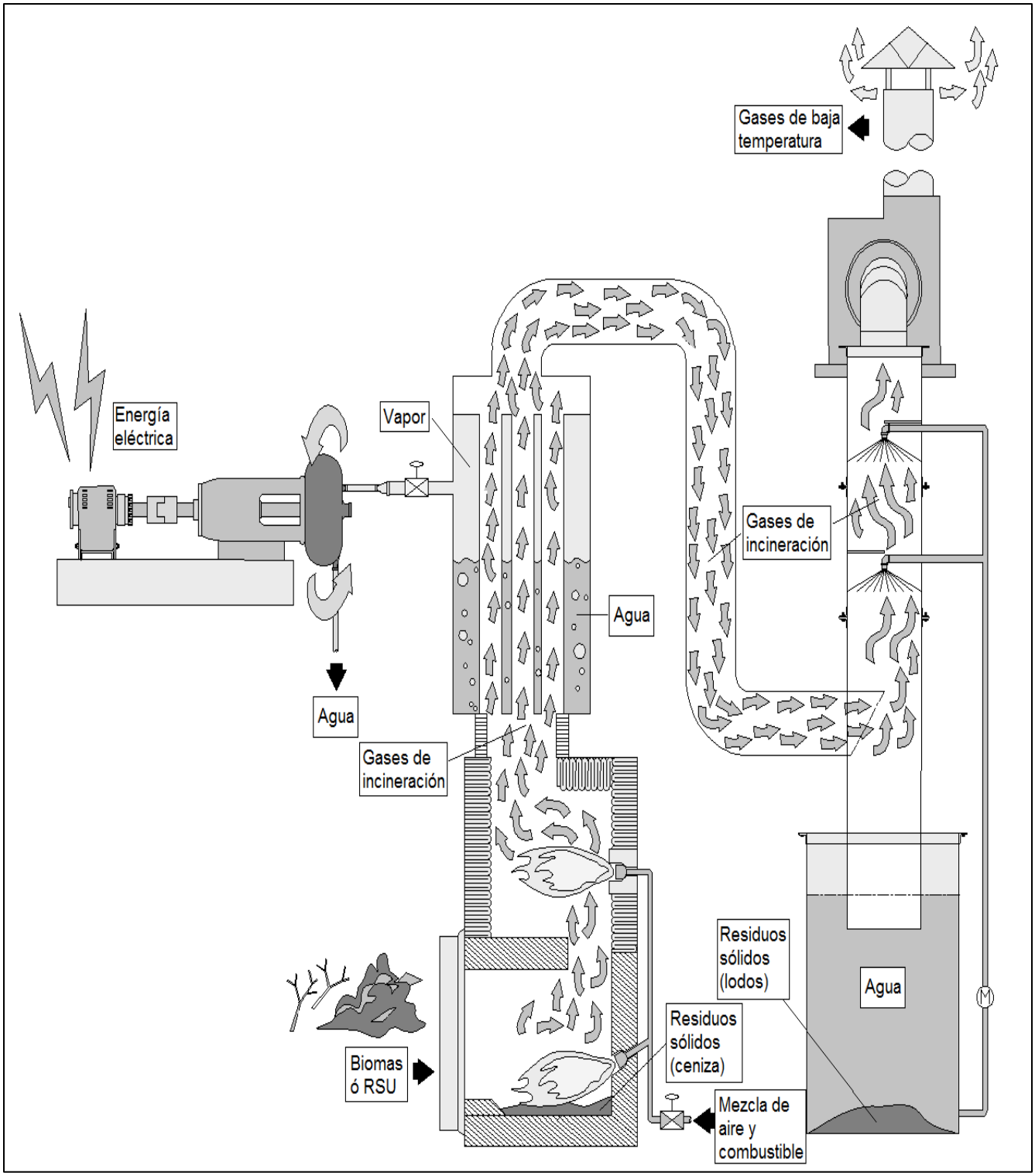

Figura 4.29 Descripción del proceso de incineración del caso de estudio

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

5.1. Conclusiones

Al analizar los resultados referentes a la instalación y operación del proceso de incineración se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ El poder calorífico de los residuos sólidos urbanos y de la biomasa permiten que la incineración pueda ser una alternativa para procesarlos utilizando la energía térmica desprendida en el proceso de oxidación para generar energía eléctrica.
- ✓ El proceso de incineración no requiere de un constante flujo de combustible en este caso se utilizó el gas LP y aire para provocar la combustión y así incinerar los residuos y/o biomasa, durante la incineración de estos productos se logró obtener el calentamiento constante del agua almacenada en la caldera la cual logró mantener una presión de vapor durante más de 15 min de forma constante.
- ✓ Es indispensable contar con un control de temperatura en el horno de incineración, ya que si no se logra, el aumento de la temperatura dentro de las cámaras de incineración llega a representar un verdadero peligro porque se tiene la ruptura de la protección que nos brinda el ladrillo cerámico y la fibra de vidrio cerámica.
- ✓ Es indispensable hacer un uso responsable del proceso de incineración ya que los gases de combustión pueden llegar a producir sustancias tóxicas, las emisiones deben ser vigiladas y monitoreadas de acuerdo a su composición química, según la cantidad de materiales emitidos y dependiendo de estas será el proceso de tratamiento según la NOM-098-SEMARNAT-2004
- ✓ La implementación de prototipos para el estudio de fenómenos ayuda a comprender de forma clara las variables que intervienen en el proceso, los prototipos permiten hacer mejoras o puesta a punto según sean los resultados obtenidos con el fin de lograr un rendimiento satisfactorio
- ✓ Es necesario antes de poner en funcionamiento los equipos, cerciorarse que cumplan con las medidas de seguridad adecuadas para su correcto funcionamiento, ya que sin estas se pone en peligro tanto al usuario como a terceros.
- ✓ Fue necesario la implementación de dos diseños de incineradores con el fin de hacer eficiente el proceso e incrementar la seguridad para con el usuario, esto se logró gracias al asesoramiento de la empresa Calor Controlado S.A de C.V.
- ✓ Se cumplió con el objetivo, que consistió en la instalación y operación del prototipo de incineración, así como la producción de energía eléctrica a partir de dicho prototipo.

5.2. Sugerencias

Al sistema de incineración propuesto se le pueden hacer las siguientes mejoras:

- ✓ Para aumentar la potencia eléctrica generada se requiere una caldera con más capacidad para generar más vapor, más presión y consecuentemente una turbina con un generador superior, que pueda aprovechar por completo la presión
- ✓ Hacer una instalación para toma de muestra de las emisiones de gases en el área anterior y posterior de la lavadora de gases
- ✓ En el horno se puede agregar un sistema de desnitrificación con el objetivo de eliminar los NO_x producidos durante la combustión
- ✓ El grupo turboalternador del prototipo se puede mejorar teniendo una turbina con extracción , esto ayudará a que el vapor generado sea transportado a un condensador termodinámico, el agua obtenida tendrá que circular por un desgasificador y dos bombas de alimentación para que el agua retorne a la caldera en un circuito cerrado de ciclo Rankine
- ✓ Como tratamiento para las cenizas producidas se pueden mezclar con agua, cemento y aditivo para su inertización y colocarlo en vertederos de residuos no tóxicos ni peligrosos
- ✓ En caso de expeler ácidos nocivos , metales pesados en forma de gas y de partículas de polvo volante en el gas de combustión , se puede agregar un sistema semi-seco compuesto de absorbedor y filtro de mangas , con inyección intermedia de carbón activo
- ✓ Agregar un economizador antes y después de la lavadora de gases esto con el fin de precalentar el agua de la caldera

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A2A, 2008. Informe del Observación de la operación del incinerador de Brescia para los años 2006 y 2007. Comunne di Brescia Settore Ambiente ed Ecologia. Brescia, Millan, Italia.

A2A, 2011. Sustainability Report. A2A S.p.A. Brescia, Millan, Italia.

AEB, 2011. Energyzing Society. Source of Energy Raw Materials and Innovation. Publicación de Afval Energie Bedrijf. Amsterdam, Holanda.

Amador, M. 2000. Proceso de elaboración del cemento. Tesis de licenciatura Ingeniería Civil. Pág. 74. Universidad de Sonora. Sonora. México.

Ambrose, J. 2007.Cincuenta años de electricidad. Memorias de un ingeniero eléctrico. Editado por Antonio Colino López y José Manuel Sánchez Ron. Pág. 14-17. Barcelona, España.

Arrègle, J., Broatch, J., Galindo, J., Luján, J., Pastor, J., Payri. R., Serrano, J. y Torregrosa, A. 2002. Procesos y tecnología de máquinas y motores térmicos. Pág. 31-32. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Atkins, W. y Jones, L. 2007. Principios de Química. Los caminos del descubrimiento. Pág. 474-475. Editorial Médica Panamericana 3ª edición. Buenos Aires, Argentina.

ATMOSFERIS, 2013. Solar Fotovoltaica. Publicación de ATMOSFERIS. Barcelona, España.

Ausubel, D. Novak, J. y Hanesian, H. 1983. Psicología Educativa: Un punto de vista cognoscitivo. Editorial Trillas S.A. México. D.F., México.

AUTOCAR. 2013. Hyundai ix35 FCEV. The ix35 drives with the hushed civility and slightly characterless sense of function common to all EVs. Publicación de *AUTOCAR First for car news and reviews*. Inglaterra, Reino Unido.

Azcaráte, B. y Mingorance, A. 2008. Energies and Environmental Impact. Pág 140-141. Equipo Sirius. Antequera, Madrid, España.

Balairón, L. 2002. Gestión de los recursos hídricos. Universitat Politécnica de Catalunya, Cataluña, España.

Barrero, F. 2004. Sistemas de energía eléctrica. Pág. 1-17. Ed. Paraninfo. Magallanes, Madrid, España.

Baukal, E. 2000. Transferencia de Calor en combustión Industrial. Impresiones CRC. Tulsa, Oklahoma, EE. UU.

Bayon, R. 1978. La protección contra incendios en la construcción. Pág. 234-241. Editores técnicos asociados. Barcelona, España.

Brunner, C. 1984. Incineration system selection and design. Van Nostrand Reinhold Company. Ontario, Cánada.

Brunner, C. 1985. Hazardous Air Emissions from Incineration. Pag. 136,137. Chapman and Hall. New York. EE.UU.

Castells, X. 2005. Tratamiento y Valorización energética de residuos. Ediciones Díaz Santos, S.A. Madrid, España.

Castells, X. y Alsina, S. 2012. Energía, agua, medioambiente territorialidad y sostenibilidad. Pág. 684-692. Ediciones Díaz de Santos, S.A. Madrid, España.

CEAC, 2004. Manual ceac del automóvil. Pág. 25-27. Ediciones CEAC. Barcelona, España.

CENTROVOLTA, 2013. Brescia's Waste Incinerator. Publicación del Centro di Cultura Scientifica "Alessandro Volta". Provincia de cómo, Italia.

Cervantes, S. 2010. Alcances y perspectivas del diseño y construcción de prototipos didácticos realizados por estudiantes de ingeniería para su uso en el laboratorio de ciencias experimentales.TESCI. Foro Nacional de las Ciencias Básicas. México D.F., México.

CFE, 2008. Del fuego a la energía nuclear. Publicación de la Comisión Federal de Electricidad y Grupo Consultor del Noroeste. Central Laguna Verde, Municipio Alto Lucero, Veracruz, México.

Chapman, J. 2000. Máquinas eléctricas. Pág. 272-341. Editorial Mc Graw Hill. México. D.F., México.

CNH2, 2013. Pilas de combustible. Publicación de Centro Nacional del Hidrógeno. Puertollano, España.

COVANTA, 2012. Durham York Facility. Publicación de Covanta Energy. Nueva Jersey, EE.UU.

COVANTA, 2013. Covanta Delaware Valley, L.P. Publicación de Covanta Energy. Nueva Jersey, EE.UU.

Dong, Y. 2011. Development of Waste-To-Energy in China; and Case Study of the Guangzhou Likeng WTE plant. Tesis de Maestría Recursos de Ingeniería en el Planeta. Departamento de Ingeniería Ambiental y de la Tierra. Universidad de Columbia. Nueva York, EE.UU.

Durán, A., Garcés, M. Velasco, A. Marín, J. Gutiérrez, R. Moreno, A. y Delgadillo, A. 2012. Mexico City's municipal solidwaste characteristics and composition analysis. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.

ECOPROG. 2012a. Boom on worldwide Waste-to-Energy market continues. Publicación de ECOPROG GmbH. Colonia, Alemania.

ECOPROG. 2012b. The World Market for Waste Incineration Plants. Publicación de ECOPROG GmbH. Colonia, Alemania.

EGE, 2008. Towards 2010. Waste-to-Eenergy. Agency (Oslo Energigjenvinningstetaten). Oslo, Noruega.

EGE, 2010. Annual and Enviromental Report 2010. Waste-to-Energy Agency (Oslo Energigjenvinningsetaten). Oslo, Noruega.

EPA, 1999b. Particulate Matter Controls. Publicación de United States Environmental Protection Agency. Washington D.C, EE.UU.

EPA, 2003a. Venturi Scrubber. Publicación de United States Environmental Protection Agency. Washington D.C, EE.UU.

EPA, 2003c. Air Pollution Control Technology Fact Sheet. Fabric Filter-Pulse-jet Cleaned Type. Publicación de United States Environmental Protection Agency. Washington D.C, EE.UU.

Escudero, J. 2008. Manual de energía eólica. Pág 130-138 , Grupo Mundi Prensa. Madrid, España.

Faires, Virgil M. 1979. Termodinámica. Pp. 128-129, Pp. 222. Talleres Offset Nerecan S.A. San Sebastian, España.

Fernández, A. 2007. Planta de incineración de residuos sólidos urbanos con tecnología de parrilla y recuperación energética. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Industrial. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España.

Fernández, P. 2009. Eliminación de partículas. Publicación de biblioteca sobre Ingeniería Energética. Santander, España.

Font, J. y Dols, J. 2004. Tratado sobre automóviles. Tomo I Tecnología del automóvil. Pág 92-94. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

García, M. 1999. Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo. Pág. 21. IEPALA Editorial. Madrid, España

Garzón, A., Duque, C. y Roa, M. 2004. Introducción general a la tecnología de propulsión. Pág. 30-37. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

González, V. 1996. Física fundamental. Pág. 160-161. Editorial Progreso, México, D.F., México.

GREENPEACE, 1999. Plantas incineradoras de residuos en Austria. Viena, Austria.

Gromer, A. 2006. Física en la ciencia y en la industria. Pág. 581. Editorial Reverté, S.A, Barcelona, España.

Guidice, F. La Rosa Guido, Risitano, A. 2006. Product design for the enviroment. Edición Taylor y Francis Group. EE.UU.

Hafslund, 2011. Energy from Waste. Publicación de Hafslund. Oslo, Noruega.

Horwitz, H. 1990. Soldadura: Aplicaciones y Práctica. Pág. 107. Editorial Alfa Omega. México D.F, México.

IEEE, 2003. Grounding and Ground Fault Protection of Multiple Generator Installations on Medium-Voltage industrial and Commercial Power Systems. Publicación de Institute of Electrical and Electronics Engineers. Houston, Texas, EE.UU.

INE, 2002. Evaluación de la incineración de residuos peligrosos. Publicación del Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.

INTI, 2008. Energías Renovables 2008 – Energía Biomasa. Publicación de la Coordinación de Energías Renovables Dirección Nacional de Promoción y Subsecretaría de Energía Eléctrica. San Martín, República de Argentina.

IPPC, 2006. Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles para incineración de residuos. Publicación del Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos. Sevilla, España.

Jiménez, O., Cantú, V., y Conde, E. 2006. Líneas de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica. Publicación de Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL. Monterrey, Nuevo León, México.

Lucas, M. 2007. Termotecnia básica para ingenieros químicos: procesos termodinámicos y máquinas. Pág. 26. Universidad de Castilla La Mancha, Albacete, España.

LucienVivier. 1975. Turbinas de vapor y gas. Urmo S.A. de C.V., México D.F., México.

Manzano, J. 2008. Electricidad I, teoría básica y prácticas. Pág 61. Marcombo, ediciones técnicas, Barcelona, España.

Mata, A. 2005. Diccionario didáctico de ecología. Pág. 135. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Métivier, H. 2009. Plutonium: Mythes et réalitè. Pág. 125. EDP Sciences. Francia.

Morán, M. y Shapiro, H. 2005. Fundamentos de termodinámica técnica. Ed. Reverté, S.A. Loreto, Barcelona, España.

Moreno, C y Paniagua I. 2010. Protección diferencial de generadores síncronos usando redes neuronales artificiales. Tesis de Licenciatura de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, República de Colombia.

Myers, J. 1988. Incineración, Manual de Práctica OM-11. Water Pollution Control Federation. Virginia. EE.UU.

Myers, J., Chairman, W., y Patrick, B.1994. Incineration Manual of Practice OM-11.Water Polution Control Federation.Alexandria, EE.UU.

NIB, 2007. More waste treatment capacity in southern Sweden. Publicación de Nordic Investment Bank. Helsinki, Finlandia.

Nutec, 2012. Hoja de seguridad y Datos. Nutec Fibratec, S.A. de C.V. Empresa dedicada a lanas aislantes de alta temperatura. Monterrey, México.

OCEB, 2010. Overview of Mashima Incineration Plant. Publicación de Environment Bureau. Osaka, Japón.

Oerlikon. 2005. Manual de Soldadura y Catálogo de Productos. EXSA. S.A. Empresa dedicada a la fragmentación de roca para las industrias de minería e infraestructura. Lurín, Lima. Perú.

OPEXenergy, 2013. Operación y Mantenimiento de plantas de energía. Publicación de Grupo DEENMA. Madrid, España.

PEMEX, 2010. Sistema de control y protecciones de turbogeneradores. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios. Subcomité Técnico de Nomalización de PEMEX Refinación. México.

Pérez, E. 2008. Diseño de Modelos y prototipos experimentales orientados al Aprendizaje de la Óptica. Tesis de Maestría en Educación en Física, FACE, Universidad.

Plonus, M. 1994. Electromagnetismo aplicado. Pág 110. Editorial Reverté, Loreto, Barcelona, España.

Pypesa. 2009. Catálogo,Productos y Piezas Especiales, S.A. de C.V. Empresa dedicada a la creación de conexiones de gas para la industria. Guadalajara Jalisco, México.

RENOVETEC, 2013. Turbinas de gas. Publicación de RENOVETEC. Fuenlabrada. Madrid, España.

Rodríguez, G. 2000. Operación de calderas industriales. Tratado práctico operacional. Ecoe Ediciones. Pág. 49-75, 179-190, 205-226. Santa Fé de Bogotá, D.C. Colombia.

Rolle, K. 2006. Termodinámica. Pág. 373, 412-414. Pearson Prentice Hall. México. D.F., México.

Romero, M. 2010. Energía solar fotovoltaica. Pág. 53-54. Ediciones CEAC. Barcelona, España.

Rowe, D. 2006. Thermoelectrics handbook. Macro at Nano. Ed. Taylor & Francis. Pág. 56-11. Miami, EE.UU.

Russell, J y Ronald, C. 2012. Radioisotope Thermoelectric Generator. Bookvika publishing. Londres, Inglaterra.

Sancho, J., Miró, R., y Gallardo, S. 2006 Gestión de la energía. Pág 110.Ed. Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, Valencia, España.

Scielo México. Universidad Nacional Autónoma de México. Dirección General de Bibliotecas. México, D.F. México.

Seippel, R. 1977. Fundamentos de electricidad. Principios de electricidad, electrónica, control y ordenadores. Ed. Reverté. Pág. 73-77. Loreto, Barcelona, España.

Sell, J. 1992. Industrial Pollution Control: Issues and techniques. Pág. 55. Van Nostrand Reinhold. New York. EE.UU.

SEMARNAT, 2004. Norma oficial NOM-098-SEMARNAT-2004. Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F, México.

SEMARNAT, 2005. Informe de la situación del medio ambiente en mexico. Compendio de estadísticas ambientales. Publicación de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F, México.

SENER, 2013. Generación bruta por tecnología. Secretaría de Energía. México D.F, México.

Serway, R. y Jewett, J. 2005. Física para ciencias e ingenierías. Volumen I. International Tomsom Editores, S.A. México. D.F., México.

Severns, W., Degler, H., y Miles, J. 1973. Energía mediante vapor, aire o gas. Pág. 263-264. Editorial Reverté, Loreto, Barcelona, España.

SOGAMA, 2013. Incineración con recuperación de energía. Publicación de la Sociedad Galega Do Medio Ambiente. Coruña, España.

SYSAV, 2012. Heat and electricity from waste. Sysav's waste-to-energy plant. Publicación de SYSAV. Malmö, Suecia.

Tipler, P. y Gene, M. 2006. Física para la ciencia y la tecnología. Pág. 552-553. Ed. Reverté. Loreto, Barcelona, España.

Ulrich, K. y Eppinger, S. 2013. Diseño y desarrollo de productos. Enfoque multidisciplinario. Ed. Mc Graw Hill. México, D.F., México.

UNESA, 2011. Funcionamiento de las centrales eléctricas. Publicación de la Asociación Española de la Industria Eléctrica. Madrid, España.

UNICAN, 2012. Centrales de generación eléctrica. Universidad de Cantabria. Santander, Cantabria, España.

US. 2009. Ciclo Brayton. Departamento de Física Aplicada III. Universidad de Sevilla. Sevilla, España.

Varetto, R. 2012. Conducción de generadores de vapor. Librería y Editorial Alsina. Pág. 27. Buenos Aires, Argentina.

Villarubia, M. 2012. Ingeniería de la Energía Eólica. Nuevas Energías. Ed. Marcombo. Barcelona, España.

Watson, K., Ragatz, A., y Hougen, A. 1982. Principios de los procesos químicos. Pág. 227,267. Ed. Reverté, Loreto, Barcelona, España.

Wildi, T. 2007. Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. Pág. 71-94, 343-372. Editorial Pearson Prentice Hall. Edo. de México, México.

Yáñez, C. 2001. Modelo de Prototipo. UNEMI. Guayas, Ecuador.

ANEXO A

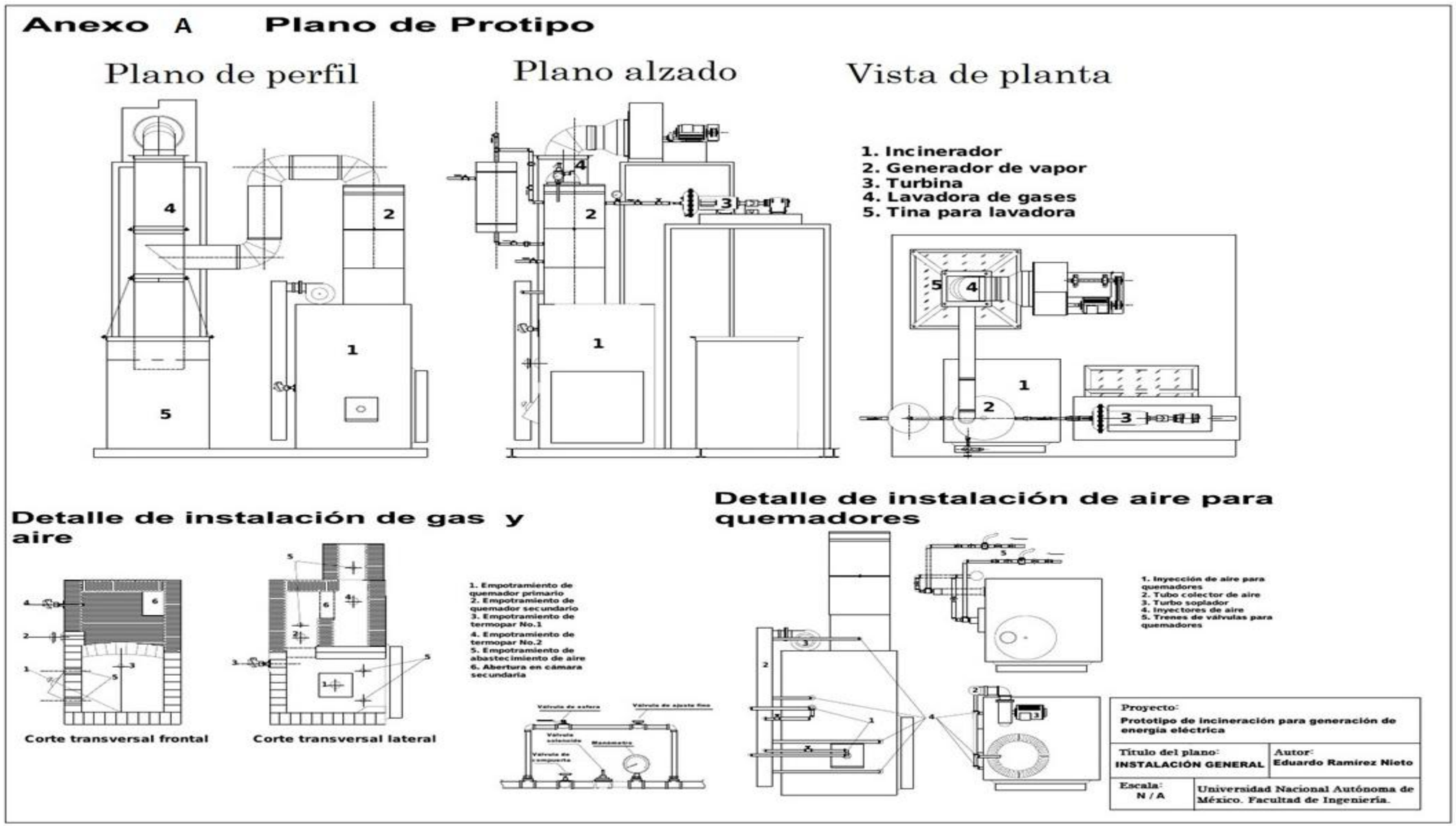

Figura A.1 Plano de la configuración general del prototipo de incineración del caso de estudio