



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA
UNINCINERADOR PIROLITICO DE DESECHOS
MEDICOS PARA EL CENTRO MEDICO SAN MARTIN-
LAMBAYEQUE 2016”**

**TESIS
Para Optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico**

**Presentada por:
BACH. ALVARADO BONILLA FELIX ROBERTO
BACH. FALLA DE LOS SANTOS RODOLFO NICANOR**

Aceptada por la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Ing. Ramírez Castro Manuel Javier
PRESIDENTE

Ing. Oblitas Vera Carlos Leonardo
SECRETARIO

Ing. Romero Cortez Oscar Uchelly
VOCAL

Lambayeque – Perú
2017

Diseño de un Sistema de Control para un Incinerador Pirolítico de Desechos Médicos para el Centro Médico San Martín – Lambayeque 2016

Felix Roberto Alvarado Bonilla
Rodolfo Nicanor Falla de los Santos

Tesis para optar el título de
Ingeniero Electrónico

Asesor:

Lucia Chaman Cabrera
Ingeniero Electrónico

DEDICATORIA

Con todo mi cariño y mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.
Mis padres Eusebio Alvarado y Bertila Bonilla.

Gracias a mis padres Rodolfo Falla Ramirez – Yolanda De Los Santos Inga, sus valores y enseñanzas son lo mejor que me pudieron transmitir, en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiar mis pasos, a mis Padres a quienes amo con todas mis fuerzas, a mis hermanos que siempre confiaron en mí, a mi esposa Lesly e Hijas que amo con todo mi corazón

A Dios y mi madre quienes guían mi camino. A mi padre, mis hermanos y mi esposa, quienes son a quienes más amo en el mundo, su empuje y apoyo son el motor para seguir adelante.

GLOSARIO

ALGORITMO: secuencia de pasos que conforman una tarea específica, usualmente en el ámbito computacional.

AUTOMATIZACIÓN: aplicación de procedimientos automáticos a un aparato, proceso o sistema.

BUFFER: memoria dedicada a almacenar temporalmente la información que debe procesar un dispositivo hardware para que éste pueda hacerlo sin bajar el rendimiento de la transferencia.

CONTROLADOR P: dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica en este caso de tipo proporcional.

CONTROLADOR PI: dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica en este caso de tipo proporcional – integral.

CONTROLADOR PID: dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica en este caso de tipo proporcional – integral – derivativo.

DIOXINAS: Las dioxinas son compuestos químicos obtenidos a partir de procesos de combustión que implican al cloro.

DRIVER: pequeño programa cuya función es controlar el funcionamiento de un dispositivo del ordenador bajo un determinado sistema operativo.

EXTRACTOR: dispositivo terminal de aire que se instala encima de un conducto de extracción de ventilación natural, con ayuda del cual, creando una presión negativa y dependiendo de la velocidad del viento, se puede evitar el rebufo y aumentar el caudal. Puede incluir o no partes móviles.

FURANO: Es un líquido claro, incoloro, altamente inflamable y muy volátil, con un punto de ebullición cercano al de la temperatura ambiente.

HARDWARE: componentes físicos de un ordenador o de una red, en contraposición con los programas o elementos lógicos que los hacen funcionar.

INCINERACIÓN: Tecnología térmica para el tratamiento de residuos, realizando la quema de materiales a alta temperatura (generalmente superior a 900 °C), mezclados con una cantidad apropiada de aire durante un tiempo predeterminado.

INTERFASE: es el dispositivo hardware o protocolo de programación encargado de realizar la adaptación que haga posible la conexión entre dos sistemas o elementos de la unidad central de procesamiento, entre unidades o con el usuario.

PATÓGENO: Que produce enfermedad.

PIROLISIS: Es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales excepto metales y vidrios causada por el calentamiento en ausencia de oxígeno.

REACTORES: Se refiere a reactancias o auto transformadores en serie con la carga, en los cuales se puede saturar el núcleo con un sistema electrónico.

SIMULACIÓN: es la experimentación con un modelo de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo.

SISTEMA DE CONTROL: es un conjunto de dispositivos de control de entrada lógicos y de salida que sirven para controlar procesos.

RESUMEN

El problema ambiental es considerado actualmente como un desafío técnico que exige mucho en cuanto a control, prevención y conocimiento riguroso que sirva para tomar medidas correctivas sobre todo en el área de la salud.

Los residuos generados en el centro de salud San Martín del departamento de Lambayeque, así como en otros centros de salud, ubicadas en zonas rurales como urbanas, cuenta con una inadecuada recolección, transporte, almacenamiento y disposición final de los mismos, lo cual puede provocar daños físicos serios e infecciones graves al personal que labora en estos centros, a los pacientes y a la población en general.

Además provoca contaminación atmosférica, del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas; a lo cual se suma el deterioro estético del paisaje natural y de los centros urbanos.

Los principales objetivos del presente trabajo será dimensionar un incinerador con su sistema de control apropiado y eficiente que pueda ser utilizado en el centro de salud San Martín y en otros centros de salud, para reducir el peligro asociado con los desechos y a su vez disminuir el volumen de los mismos; a través de la exposición de estos desechos hospitalarios a altas temperaturas superiores a 1200 °C durante un periodo de tiempo no menor a 2 segundos el cual es suficientemente largo para destruir organismos que pudieran ser una amenaza para el medioambiente y la salud pública. El poder calorífico para mantener el proceso de combustión es obtenido a través de los mismos residuos y del combustible auxiliar, al ser quemados en presencia de aire.

En los capítulos 1 y 2 se presentará las definiciones más importantes de un sistema de control, así como también la tipología de los

desechos hospitalarios; se presenta un análisis de las regulaciones o normativas que se utilizan para el proceso de incineración, en los capítulos 3 y 4 se presentan los procedimientos de cálculos para el dimensionamiento del horno; la cantidad de combustible necesario para operar el incinerador y lograr el tiempo de residencia de los gases dentro de los límites prescritos. Además se considera el calentamiento transiente del horno y en estado estable, en el cual la temperatura inicial de la masa del refractario será de 30°C y la temperatura de entrada en la cámara de combustión primaria deberá llegar a un valor de temperatura apropiada. En el capítulo 5 se realiza el diseño del sistema de control; así como un análisis de los costos de construcción y operación del equipo. Como último paso en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y observaciones obtenidas durante el estudio realizado.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	V
INDICE GENERAL	VIII
ABREVIATURAS	IV
SIMBOLOGIA	V
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLA	VII
INTRODUCCION	15
CAPITULO 1	
1. DEFINICIONES PRELIMINARES	21
1.1 Sistemas de Control	21
1.2 Sistemas de Lazo Abierto	21
1.3 Sistemas de lazo Cerrado	22
1.4 Función de Transferencia	23
1.5 Diagrama de Bloques	23
1.6 Control en Cascada	24
1.7 Diseño de Controladores en Lazo Cerrado	25
1.7.1 Acción Proporcional	25
1.7.2 Acción Integral	26
1.7.3 Acción Derivativa	26
1.7.4 Acción Proporcional Integral Derivativo	27
1.8 Sensores de Temperatura	28
1.8.1 Transductores de temperatura de unión semiconductor	29
1.9 PLC (Controlador Lógico Programable)	31
1.9.1 Fuente de Alimentación	32
1.9.2 CPU (Unidad Central de Proceso)	32
1.9.3 Memoria	33

1.9.4 Módulos de Entrada	33
1.9.5 Módulos de Salida	33
1.9.6 Interfaces de Comunicación	34
1.9.7 Operación de un PLC	34
1.9.8 Programación de un PLC	35
1.10 Reactores Químicos	35
1.10.1 Definición del reactor químico	36
1.10.2 Tipos de reactores químicos	36
1.10.3 Definición de reacción química	38
1.10.4 Clases de reacciones químicas	39
1.10.5 Desarrollo de modelos de proceso	39
CAPITULO 2	
2. TIPOLOGIA DE LOS DESECHOS	43
2.1 Desechos no Peligrosos	44
2.1.1 Ordinarios o Comunes	44
2.1.2 Inertes	44
2.1.3 Biodegradables	44
2.1.4 Reciclables	44
2.2 Desechos Peligrosos	45
2.2.1 Residuos Infecciosos o de Riesgo Biológico	45
2.3 Desechos Químicos	47
2.3.1 Fármacos	47
2.3.2 Citotóxicos Especiales	47
2.3.3 Metales Pesados	48
2.3.4 Residuos Radiactivos	48
2.4 Caracterización de Residuos Incinerables	51
CAPITULO 3	
3. CAMARA DE COMBUSTION DEL INCINERADOR	53
3.1 Partes de un Incinerador	53
3.1.1 Cámara Combustión	53
3.1.2 Cámara de Post-Combustión	54
3.1.3 Cuerpo Principal	55

3.1.4 Quemadores	55
3.1.5 Tablero de Control	56
3.1.6 Chimenea	59
3.2 Dimensionamiento de la Cámara de Combustión	59
3.2.1 Materiales Refractarios y sus Características	60
3.2.2 Calentamiento de la Pared	64
3.2.3 Cálculo de la Cámara de Combustión	78
3.2.4 Tiempo de Residencia	85
3.2.5 Selección de la Parrilla	88
3.2.6 Selección de Quemadores y Soplador	89
CAPITULO 4	
4. COMBUSTION Y CONTROL DE CONTAMINANTES	97
4.1 Análisis Químico del Combustible	98
4.2 Emisiones de Contaminantes Productos de la Incineración	103
4.2.1 Análisis Estequiometrico de los desechos más combustible	106
4.2.2 Requerimiento de Aire en Exceso	113
4.2.3 Tasa de Emisiones	118
4.3 Dimensionamiento de la Chimenea	119
CAPITULO 5	
5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y COSTOS	126
5.1 Algoritmo de Control	126
5.2 Visualización de los Datos	133
5.3 PID	135
5.4 Costos	140
5.4.1 Costo de Construcción	140
5.4.2 Costo de Operación	141
CAPITULO 6	
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
BIBLIOGRAFIA	145

ABREVIATURAS

cal/ Kg	Calorías sobre Kilogramos
°C	Grado Centígrado
Cm	Centímetros
ft ³ /min	Pies cúbicos sobre minutos
g/cm ³	Gramo sobre centímetro cúbico
GPH	Galones por horas
J/ Kg K	Joule sobre Kilogramo Kelvin
Kg/ m ³	Kilogramo sobre metro cúbico
Kpa	Kilo pascales
KJ / h	Kilo Joule sobre hora
K	Grados Kelvin
mg /m ³	Miligramos sobre metro cúbico
m/s	Metro sobre Segundo
M	Metro
N/m ²	Newton sobre metro cuadrado
r.p.m	Revoluciones por minuto
S	Segundo
Uma	Unidad de masa atómica
µg/m ³	Microgramo sobre metro cúbico
w/ m K	Watt sobre metros kelvin

SIMBOLOGIA

Al_2O_3	Trióxido de Aluminio
Allama	Área de la llama,
Aext	Área del horno
CaO	Monóxido de Carbono
C max	Concentración máxima
Cp	Calor Específico
Dex	Diámetro externo
D in	Diámetro interno
ϵ	Emisividad.
E pared	Energía almacenada en la pared
Fe_2O_3	Trióxido de Hierro II
F	Factor de forma
f_L	Calor latente
F_b	Parámetro de Boyantes
Fo	Número de Fourier
g	Gravedad
hr	Coefficiente de transferencia de calor por radiación
Δh	Altura de la pluma
hc	Coefficiente de transferencia de calor por convección
H	Altura Efectiva de la chimenea
Ho	Altura real de la chimenea
H_2O	Agua
K_2	Potasio Gaseoso
k	Conductividad térmica del material
Le	Longitud efectiva
MgO	Monóxido de Magnesio
m aire	Peso molecular del aire
mfuel	Peso molecular del combustible
N cont	Número de moles del contaminante
$N_{u,D}$	Número de Nusselt
N_T	Número total de tubos
n	Número de chimeneas
Na_2O	Oxido de Sodio
ΔP_r	Pérdidas a lo largo de la chimenea
PM cont	Peso molecular del contaminante
Δp	Caída de presión
q_{rad}	Pérdida de calor por radiación
Q_C	Razón de flujo volumétrico de salida
Q	Caudal máximo de sustancias contaminantes

$R_{e,D}$	Número de Reynolds
S_T	Separación transversal,
S_L	Separación longitudinal SL.
SiO_2	Dióxido de Silicio
Δt	Intervalo de tiempo
$T_w ;$	Temperatura de la pared
$T_{gas} ;$	Temperatura de gas
$T_s:$	Temperatura de salida de los gases
$T_a:$	Temperatura atmosférica
$t_{residencia}$	Tiempo de residencia
ΔT_{ml}	Temperatura media logarítmica
U	Coefficiente global de transferencia de calor
$U_C ;$	Velocidad de salida de la chimenea
V_{gas}	Velocidad de los gases
Δx	Intervalos de división del espesor de la pared
α	Difusividad térmica media
ρ	Densidad del material
ρ_{aire}	Densidad del aire
σ	Constante de Stefan Boltzmann

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Sistema de lazo abierto	19
Figura 1.2	Sistema de lazo cerrado	19
Figura 1.3	Diagrama de Bloques	21
Figura 1.4	Diagrama del funcionamiento de la planta de destilación de productos químicos	21
Figura 1.5	Diagrama de bloques de control en cascada en serie	22
Figura 1.6	Clasificación de los sensores de temperatura	27
Figura 1.7	Efectos seebeck de una termocupla	27
Figura 3.1	Esquema de la pared del incinerador	64
Figura 3.2	Gráfico del método de Schmidt	73
Figura 3.3	Grafica de Schmidt – temperatura vs espesor de la pared	75
Figura 3.4	Grafica de superficie en base al método de Schmidt	76
Figura 3.5	Variación de la temperatura al método de Schmidt	76
Figura 3.6	Variación de la temperatura durante las cinco	77

	primeras horas	
Figura 3.7	Flujos de entrada y salidas en el proceso	79
Figura 3.8	Esquema de la parrilla	88
Figura 3.9	Esquema de la localización de las guías y de la parrilla en el interior de la primera cámara	88
Figura 3.10	Quemador industrial con rotación y toroide de recirculación	90
Figura 3.11	Estabilización de la llama, soplado por varios gases	96
Figura 3.12	Soplado de quemadores	96
Figura 4.1	Balance de flujo másico en el sistema	102
Figura 4.2	Diagrama de Ostwald	118
Figura 5.1	Entrada NO	126
Figura 5.2	Entrada NC	126
Figura 5.3	Salida NO	127
Figura 5.4	Salida NC	127
Figura 5.5	Salida Set	127
Figura 5.6	Salida Reset	128
Figura 5.7	Línea de programación el Ladder	128
Figura 5.8	Configuración de los timers	129
Figura 5.9	Ejemplo de salida en paralelo	130
Figura 5.10	Ejemplo de salto de línea	130
Figura 5.11	Ejemplo de asignación	131
Figura 5.12	Ejemplo de condición analógica	131
Figura 5.13	PLC y expansión analógica usados	131
Figura 5.14	Esquema de conexiones al PLC	132
Figura 5.15	Red Twido - Magelis	133
Figura 5.16	Pantalla del Magelis con información sobre la cámara primaria	134
Figura 5.17	Pantalla de Magelis con información sobre el proceso	134
Figura 5.18	Esquema de un proceso a lazo cerrado	135
Figura 5.19	Bloque PID en Twido Suite	136
Figura 5.20	Configuración del PID	137
Figura 5.21	Diagrama de flujo del proceso de combustión	138

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Clasificación de los sensores de temperatura	26
Tabla 1.2	Clasificación de las termocuplas	28
Tabla 2.1	Generación de los desechos hospitalarios	47
Tabla 2.2	Características de humedad, cenizas y poder calorífico para los diferentes tipos de residuos	51
Tabla 3.1	Características técnicas y especificaciones del ladrillo refractario	59

Tabla 3.2	Propiedades termo física de la arena silice	61
Tabla 3.3	Características técnicas y especificaciones del cemento refractario	63
Tabla 3.4	Variación de la temperatura en función del tiempo y del incremento de distancia en la pared	74
Tabla 3.5	Variación de temperaturas durante las primeras 5 horas de operación del incinerador	78
Tabla 3.6	Distribución y cálculo del peso seco para los diferentes residuos	81
Tabla 3.7	Poder calorífico de los residuos	82
Tabla 3.8	Valores de la energía total almacenada	83
Tabla 3.9	Propiedades de Fuel Oil N° 2	84
Tabla 3.10	Consumo de combustible por hora	85
Tabla 3.11	Tiempo de residencia	86
Tabla 3.12	Dimensionamiento de las cámaras	87
Tabla 3.13	Características técnicas del quemador principal	91
Tabla 3.14	Características técnicas del quemador secundario	92
Tabla 4.1	Características técnicas de Fuel Oil N° 2	98
Tabla 4.2	Concentraciones en base húmeda y en base seca	101
Tabla 4.3	Masa de los productos generados por el combustible	101
Tabla 4.4	Límite de emisiones establecido por la unión Europea	104
Tabla 4.5	Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión	104
Tabla 4.6	Cantidad de masa seca y húmeda de los residuos	106
Tabla 4.7	Composición de los desechos hospitalarios (porcentaje)	108
Tabla 4.8	Composición de los desechos hospitalarios más combustible (peso seco)	109
Tabla 4.9	Composición de los desechos hospitalarios más combustible (peso húmedo)	110
Tabla 4.10	Cantidad total de elementos generados en la mezcla de residuos más combustible	111
Tabla 4.11	Concentraciones en base húmeda y en base seca	112
Tabla 4.12	Concentraciones en base húmeda y en base seca	112
Tabla 4.13	Porcentaje de exceso de aire con variación de O ₂ y CO ₂	114
Tabla 4.14	Contaminantes productos de la combustión	119
Tabla 5.1	Materiales y equipos directos	139
Tabla 5.2	Mano de obra	140
Tabla 5.3	Costos indirectos	140

INTRODUCCIÓN

La tesis consiste en dar una solución para el tratamiento de los residuos sólidos generados en el centro de salud San Martín del departamento de Lambayeque y en las diferentes zonas rurales o urbanas; el cual consiste en transformar las características físicas, químicas y biológicas de un residuo peligroso en uno menos peligroso para hacer más segura las condiciones de almacenamiento, transporte o disposición final.

En la actualidad existen diversos sistemas de tratamiento para la desinfección de estos desechos. Los sistemas más utilizados son desinfección térmica húmeda (autoclave), desinfección por microondas, desinfección por incineración, y relleno sanitario.

	Incineración	Autoclave	Microondas	Relleno Sanitario
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none">• Reduce el volumen en un 80- 95%.• Eliminación instantánea de patógenos si se opera adecuadamente.• Alto grado de efectividad.• Destruye cualquier material que contiene carbón orgánico.• Aplicable a cualquier tipo de residuo• Ausencia de malos olores.• Reducción del 70 % del peso inicial.	<ul style="list-style-type: none">• Alto grado de efectividad.• No emisiones gaseosas peligrosas.• Fácil operación, no hay riesgo.• Efluentes estériles.• Riesgo bajo la contaminación, reducción de peso por deshidratación.	<ul style="list-style-type: none">• Reduce el volumen en 60.• No emisiones gaseosas peligrosas.• Bajo riesgo de operación.• No tiene efluente.• Alto grado de efectividad.• Contaminación mínima.	<ul style="list-style-type: none">• Fácil de instalación y operación.• Medianos a bajo costo de instalación.• Bajo costo de operación.

	Incineración	Autoclave	Microondas	Relleno Sanitario
DESVENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo en combustible. • Riesgo en la operación. • Costo de mantenimiento elevado. • Conlleva el riesgo de posibles emisiones y sustancias tóxicas en la atmósfera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita un tratamiento posterior para hacer irreconocibles los residuos. • Requiere de línea a vapor • No reduce el volumen de los desechos tratados. • Puede producir malos olores. • Alto a medianos costo de instalación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de inversión. • Alto costo de mantenimiento. • Requiere personal entrenado para su operación. • No todos los parásitos y bacterias son destruidos. • No es apropiado para tratar 800 y 1000 Kg de desechos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del suelo.

De estos diferentes tratamientos se optó por el método de incineración, que desde el punto de vista técnico es más viable su construcción, mantenimiento y diseño ya que al momento en el país existen materiales y personal capacitado para la elaboración y puesta en marcha de estos equipos.

El incinerador deben contar con doble cámara: primaria, que alcanza temperaturas entre 600 y 850 °C; y con cámara secundaria con temperaturas superiores a los 1200 °C; y tiempo de residencia de 2 s, además de contar con un sistema que permita disminuir la temperatura y emisiones de contaminantes que no fueron destruidos completamente en la cámara secundaria, antes que los gases de combustión circulen por la chimenea.

La finalidad del proceso de incineración es reducir el volumen de los residuos mediante un proceso de oxidación de los componentes orgánicos, logrando así disminuir el riesgo de contaminantes de este proceso se obtiene cenizas y escorias inorgánicas que pueden ser reutilizados o eliminados en vertederos de un modo más seguro. De

igual forma, también se puede recuperar la energía del sistema logrando de este modo menos consumo de combustible.

Sin embargo, el funcionamiento inadecuado de estos incineradores puede generar a la atmósfera contaminante perjudicial para la salud. Los residuos peligrosos incinerables pueden contener, además de compuestos orgánicos, metales pesados, cloro, azufre, etc. que pueden formar sustancias orgánicas parcialmente oxidadas y ácidos.

Estos equipos operan con máxima eficiencia cuando los desechos que se queman tienen un poder calórico suficientemente alto, es decir, cuando la combustión produce una cantidad de calor suficiente para evaporar la humedad de los desechos y mantener la temperatura de combustión.

CAPITULO 1

1. DEFINICIONES PRELIMINARES

A continuación se presentarán las definiciones más importantes relacionadas con el desarrollo de este trabajo de tesis, se tratará temas como control en cascada, PLC's, reactores químicos entre otros.

1.1 Sistemas de Control

A un sistema de control se lo puede definir como un sistema de regulación retroalimentado encargado de censar variables establecidas denominadas como entradas las cuales hacen referencia a una salida establecida, también se define como un conjunto de constantes que varían en un rango de tiempo, donde el objetivo es mantener el valor de la salida de un sistema estable a pesar de las perturbaciones que se puedan presentar en la planta como el conjunto de elementos relacionados que funcionan de una manera determinada.

1.2 Sistemas de Lazo Abierto (No retroalimentados)

Estos sistemas se caracterizan porque no necesitan satisfacer requerimientos de desempeños críticos, es decir la diferencia entre la entrada y la salida del sistema no son valores que deban considerarse como indispensables para el control del mismo. Los elementos de este tipo de sistemas se pueden dividir en dos partes principales: el controlador y la planta. La acción de una señal de entrada obtenida de la planta ingresa en el controlador el cual ejerce una acción directa sobre el proceso en función de parámetros establecidos. Se puede considerar como ejemplo a un filtro, un amplificador u otro elemento de control.

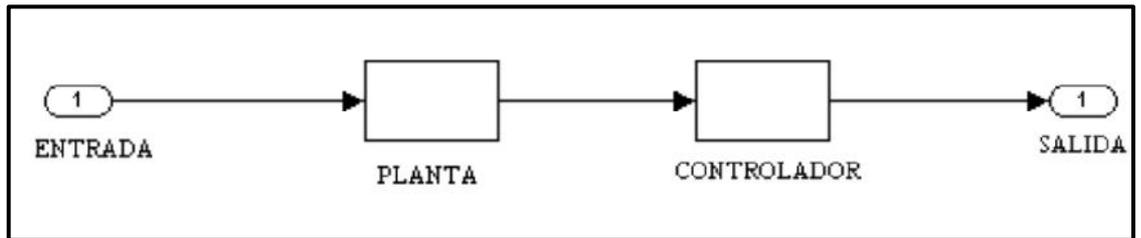


Figura 1.1 Sistema de Lazo Abierto.

1.3 Sistemas de Lazo Cerrado (Retroalimentados)

Un sistema retroalimentado es aquel que toma las acciones correctivas o de control en función de una señal de error, que es el resultado de la diferencia entre la entrada y la salida del sistema. Este tipo de sistemas son ampliamente usados cuando se habla de procesos críticos ya que la tendencia de este tipo de control es la reducción constante del error hasta llegar a un valor aceptable o establecido.

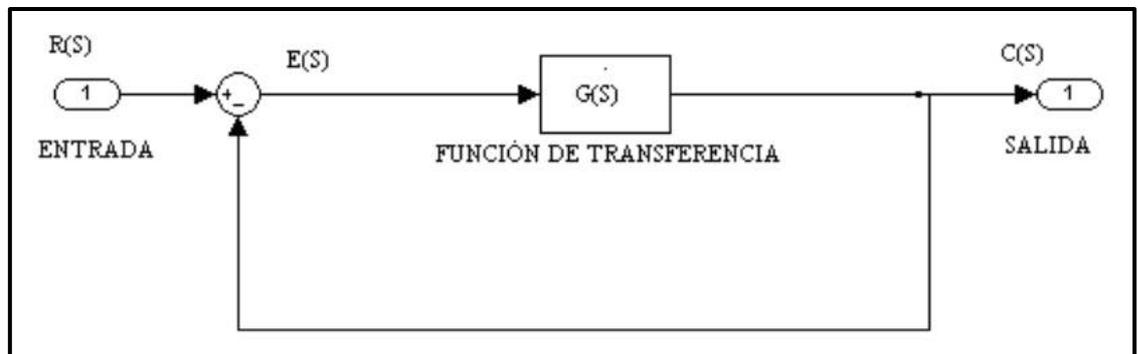


Figura 1.2 Sistema de Lazo Cerrado.

La figura 1.2 muestra el diagrama de bloques de un sistema de lazo cerrado, donde la salida es alimentada hacia el sumador la misma que es comparada con la entrada resultando en una señal creada de la diferencia entre la entrada y la salida del proceso. La retroalimentación se usa para reducir los errores de la entrada de referencia y la salida del sistema. La reducción del error del sistema es uno de los efectos más importantes que se puede

realizar sobre el sistema. Para evaluar los efectos de la retroalimentación sobre un sistema de control, es esencial examinar el fenómeno.

1.4 Función de Transferencia

Se define como función de transferencia de un sistema de ecuaciones diferenciales invariantes en el tiempo como la relación entre la transformada de Laplace de la salida y la función de Laplace de la entrada, suponiendo que las condiciones iniciales son igual a cero.

$G(s) = \frac{L(\text{salida})}{L(\text{entrada})}$	ecuación (1.1)
---	----------------

1.5 Diagrama de Bloques

Se considera un diagrama de bloques a la representación gráfica de las funciones de un sistema, con cada uno de sus componentes y el flujo de entradas y salidas que se relacionan con éste.

En estos diagramas cada una de las variables del proceso se enlazan por medio de los denominados bloques funcionales, los mismos que son símbolos matemáticos que muestran la operación que el bloque produce a la salida sobre la entrada. Para indicar la dirección de flujo de las señales se utilizan flechas entre cada bloque.

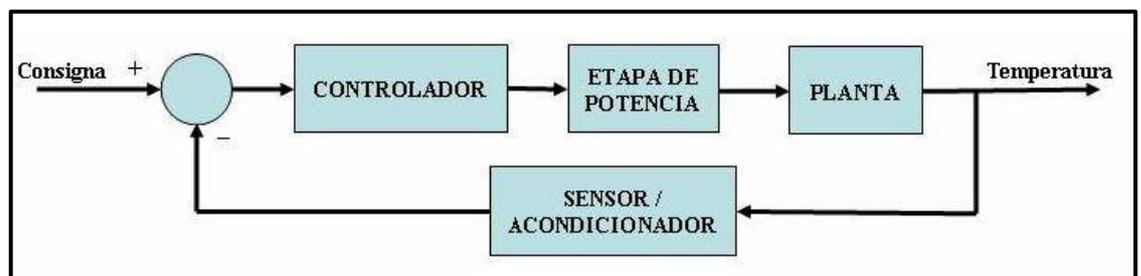


Figura 1.3 Diagrama de Bloques.

1.6 Control en Cascada

Existen aplicaciones en las cuales el control a lazo cerrado no es suficiente como para asegurar el óptimo funcionamiento de una planta, ante esto existen tipos alternativos de control como por ejemplo el control en cascada.

Este tipo de control es recomendable para procesos en los cuales se desea una respuesta inmediata sobre las variaciones de una u otra variable dependiendo de la configuración de la planta. Así se tienen dos controladores de los cuales uno se selecciona como MASTER y es el encargado de establecer un Set Point el mismo que se introduce al segundo controlador o ESCLAVO encargado de realizar la acción de control sobre elementos físicos como válvulas, relés entre otros en función del set point dado por el controlador maestro. En el siguiente ejemplo se muestra el comportamiento de un control en cascada.

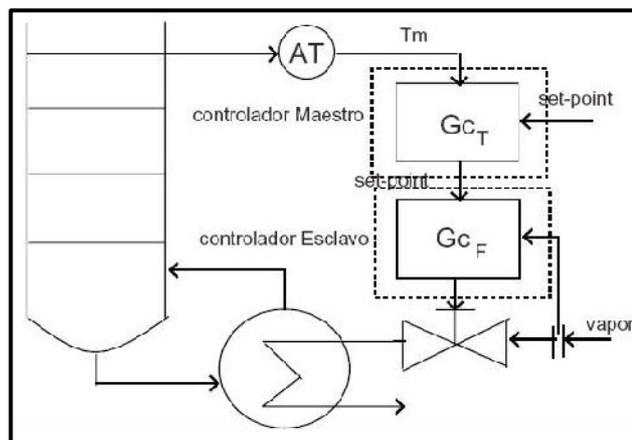


Figura 1.4 Diagrama del funcionamiento de la planta de destilación de productos químicos

En la figura anterior se observa una planta encargada de destilación de productos químicos mediante el flujo de vapor, tal como se muestra está compuesta por dos controladores G_{cT} (Master) y G_{cF} (Esclavo), G_{cF} tiene como propósito el ejercer una acción de control de manera prácticamente inmediata cuando el flujo de vapor solicitado por el controlador maestro (En función del valor de la temperatura censada en el interior del destilador) no es

igual al que pasa a través de la válvula de ingreso.

Se caracteriza porque la variable manipulada X tiene un efecto avalancha o dominó sobre la variable que desea controlar. Como se muestra en la figura X afecta a W y esta a su vez afectará a Y .

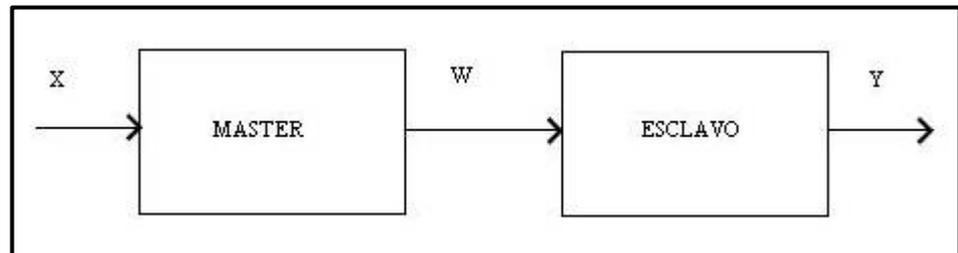


Figura 1.5 Diagrama e Bloques de Control en Cascada en Serie

1.7 Diseño de Controladores en Lazo Cerrado

El diseño de controladores presentados en este trabajo de tesis se basan en mejorar las características de comportamiento de un sistema mediante la adición de un compensador, éste se lo puede definir como un filtro cuya función es disminuir el efecto de las perturbaciones en la respuesta de la planta.

1.7.1 Acción Proporcional

El diseño de controladores presentados en este proyecto se basan en este tipo de acción el error es multiplicado por una constante proporcional P (banda proporcional del controlador), y enviada a la salida. El modo de control proporcional, está basado en un algoritmo lineal y proporcional, que tiene como objetivo reducir la magnitud del error (Es decir la diferencia entre la entrada y la salida), así dará estabilidad al proceso.

El modo proporcional, tiene como desventaja que produce un error en estado estacionario; siendo más estricto, el modo proporcional depende del valor del error, mejorar las características de comportamiento de un sistema mediante la adición de un compensador, éste se lo puede definir como un filtro cuya función es disminuir el efecto de las

perturbaciones en la respuesta de la planta.

1.7.2 Acción Integral

Una característica común de la actuación proporcional y la proporcional-derivativa es que se hace cero cuando el error desaparece. Sin embargo, en algunos casos puede ser necesario que esto no sea así. La solución automatizada más adecuada a este problema es ir aun entrando el valor de la entrada de forma proporcional a la integral del error. La función integral del error aumenta paulatinamente mientras exista error no nulo hasta alcanzar, con error nulo, un valor finito.

La acción Integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El error es integrado, lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo de tiempo determinado; Luego es multiplicado por una constante. Posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo Proporcional para formar el control P + I con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

1.7.3 Acción Derivativa

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). El error es la desviación existente entre el punto de medida y el punto de ajuste o también conocido como Set Point.

Una forma de evitar las fuertes oscilaciones que se pueden producir en torno a la referencia es añadir a la actuación proporcional otra actuación proporcional a la derivada del error. Esto es lo mismo que dotar al sistema una cierta capacidad de "anticipación" porque la inclusión del término

derivativo es equivalente a actuar proporcionalmente al error que existirá dentro de T_d segundos.

La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la velocidad misma que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

1.7.4 Acción Proporcional Integral Derivativa

PID significa control proporcional integral derivativo es el controlador más utilizado en los procesos industriales cubriendo un 95% de las aplicaciones debido a su gran flexibilidad y comprensión. Una de sus ventajas es que su ajuste se lo puede realizar mediante tanteo, sin tener un previo conocimiento del modelo matemático de la planta.

Este reúne todas las ventajas de las acciones P, I, D, con la acción integrativa, aumenta aunque el error permanezca temporalmente constante, la acción derivativa logra una alta sensibilidad al error y le entrega al sistema características predicativas, añade amortiguamiento pero al mismo tiempo amplifica el error.

1.8 Sensores de Temperatura

Se definirá a la temperatura como una variable física que expresa la mayor o menor agitación de los cuerpos (Evalúa la energía cinética). Esto debido a que los sensores que se emplearán se basan en las propiedades físicas del material sobre el cual se va a medir dicha variable. En función de esto se pueden definir los siguientes métodos de medición de temperatura:

- Variación del volumen o del estado de los cuerpos (Termómetros)
- Variación de la resistencia de un conductor (Detectores de temperatura resistivos)
- Variación de la resistencia de un semiconductor (Termistores)

- Variación de la tensión en una unión n-p (Transductores de unión semiconductor)
- Fuerza electromotriz creada en la unión de dos metales (Efecto Seebeck, Termocuplas)
- Intensidad de radiación emitida por un cuerpo (Pirómetros)
- Velocidad de sonido de un gas, frecuencia de resonancia de un cristal (Termómetros ultrasónicos de cristal de cuarzo).

Se cuenta con dos criterios para la clasificación de los tipos de transductores de temperatura, la primera hace referencia a la relación física que se mantiene con el objeto a medir (Con o sin contacto) y la segunda toma en cuenta las diferentes familias en las que se puede encuadrar atendiendo al fenómeno eléctrico asociado con la medida. En el gráfico se muestra la clasificación basada en este concepto.

Familia	Tipos	Captadores/Sensores
Eléctricos	Par termoelectrónico	Termopar
	Resistencia metálica	Sonda termométrica (RTD)
	Semiconductor	Termistor (NTC, PTC) diodo, transistor, circuito integrado
	Cuarzo	Cristal de cuarzo
Ópticos	Radiación total	Pirómetro óptico Espejo de radiación
	Radiación parcial	
	Bicromáticos (de 2 colores)	
Mecánicos	Dilatación de sólido	Termómetro bimetalico
	Dilatación de fluido o de gas	Termómetros de vidrio, de bulbo y capilar
Otros	Cristales líquidos	Cristales líquidos
	De marca	Pinturas termosensibles
	De fibra óptica	Fibra óptica

Tabla 1.1 Clasificación de los Sensores de Temperatura.

1.8.1 Transductores de Temperatura de Unión Semiconductora

Estos se basan en la variación que experimenta la tensión en la unión N-P de un semiconductor cuando la temperatura en su entorno varía. El problema que se presenta con este tipo de transductores es su respuesta no lineal.

La diferencia que presentan las termocuplas con el resto de sensores de este tipo estriba en que no requieren de energía adicional para realizar la conversión y se los puede considerar como transductores autónomos o activos.

Está constituido por dos conductores unidos por uno de sus extremos, esta unión recibe el nombre de unión sensora, los otros dos extremos estarán a una misma temperatura de referencia (Esta se debe mantener a una temperatura constante).

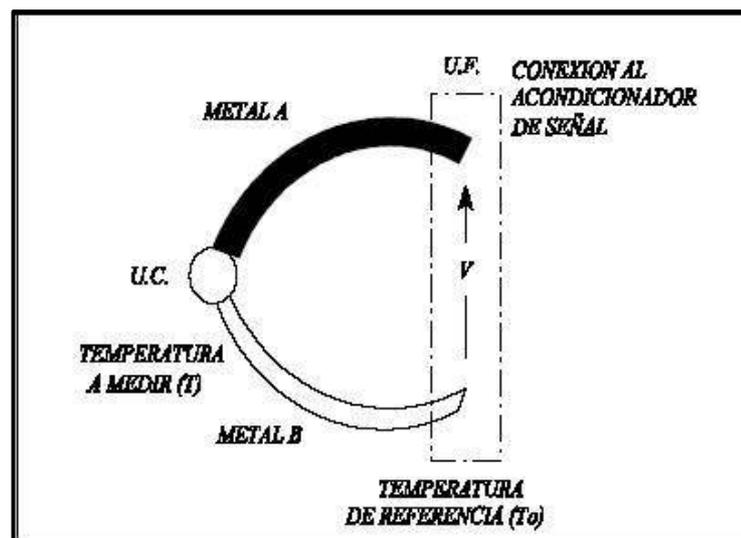


Figura 1.6 Clasificación de los Sensores de Temperatura.

La Termocupla genera una diferencia de potencial

proporcional a la diferencia de temperatura en sus uniones, el principio de funcionamiento se basa en el efecto Seebeck. Dicho efecto consiste en que la unión de los extremos de dos metales distintos y expuestos a una variación de temperatura generará una diferencia de potencial y en consecuencia una corriente en el circuito formado por los metales como se muestra en la figura:

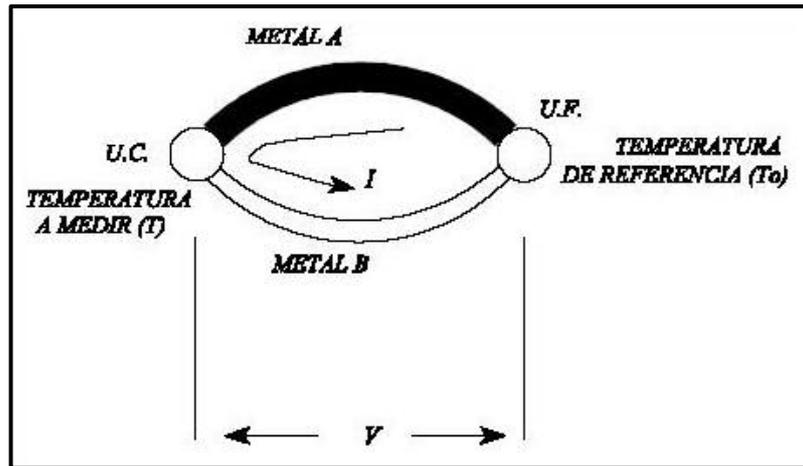


Figura 1.7 Efecto Seebeck de una Termocupla

Las termocuplas se clasifican en función de su aleación de la siguiente manera:

Tabla.1.2
Clasificación
de las
Termocuplas.
1.9 PLC

Tipo de termopar	Composición		Rango de temperatura	Tolerancia
	Polo +	Polo -		
B	Aleación Platino-Rodio (30%)	Aleación Platino-Rodio (6%)	+600°C a +1700°C	±4°C ó ±0'5%
R	Aleación Platino-Rodio (13%)	Platino	0°C a +1600°C	±1'5°C ó ±0'25%
S	Aleación Platino-Rodio (10%)	Platino	0°C a +1600°C	±1'5°C ó ±0'25%
K	Aleación Ni-C	Aleación Al-Ni	0°C a 1000°C	±1'5°C ó ±0'4%
			0°C a 1200°C	±2'5°C ó ±0'75%
			-200°C a 0°C	±2'5°C ó ±1'5%
E	Aleación Ni-Cr	Aleación Cu-Ni	0°C a 800°C	±1'5°C ó ±0'4%
			0°C a 800°C	±2'5°C ó ±0'75%
			-200°C a 0°C	±2'5°C ó ±1'5%
J	Hierro	Aleación Cu-Ni	0°C a 750°C	±1'5°C ó ±0'4%
			0°C a 750°C	±2'5°C ó ±0'75%
T	Cobre	Aleación Cu-Ni	0°C a 350°C	±0'5°C ó ±0'4%
			0°C a 350°C	±1°C ó ±0'75%
			-200°C a 0°C	±1°C ó ±1'5%

(Controlador Lógico Programable)

Se puede definir a un PLC (Controlador Lógico Programable) como un equipo electrónico que ejecuta un programa de forma cíclica. Dicha ejecución puede ser interrumpida en función de tareas o monitoreo de mayor prioridad, sin que esto signifique la interrupción del programa principal (mantiene la filosofía de interrupciones características de los sistemas microprocesados).

El PLC nace como una respuesta ante el problema ocasionado por el mantenimiento y manipulación de relés mecánicos para la estructuración de una secuencia dentro de un proceso, de esta manera también es válido definir al PLC como una opción electrónica de reemplazo para los circuitos auxiliares de naturaleza mecánica.

En la actualidad un PLC es la selección preferida en aplicaciones de control industrial y se los encuentra con un número de funciones complejas, cada vez más creciente. De hecho, un PLC actual es un microcomputador que maneja aplicaciones de control industrial. Si bien la operaciones booleanas e instrucciones de comando para relés fueron las primeras en implementarse en la lógica del PLC, ahora se cuenta con funciones complejas que operan con arreglos de estructuras y una variedad de formatos numéricos, así como también con grandes cantidades de memoria y altas velocidades de ejecución.

La composición básica de un controlador lógico programable es la siguiente:

- Fuente de alimentación
- CPU
- Memoria
- Módulos de entrada
- Módulos de salida
- Interface de Comunicación

1.9.1 Fuente de Alimentación

Es la encargada de convertir la tensión de la red, usualmente 115 V o 220 V AC, a baja tensión de DC, normalmente 24 V.

1.9.2 CPU (Unidad Central de Proceso)

La Unidad Central de Procesos controla la ejecución de todas las operaciones del PLC. Ejecuta el sistema operativo, maneja la memoria y monitorea las entradas; es decir, recibe las órdenes del operario, desde la consola de programación, y desde el módulo de entradas. Posteriormente las procesa en concordancia con la lógica del usuario para enviar respuestas al módulo de salidas. En su memoria se encuentra residente el programa destinado a controlar el proceso. Maneja también las comunicaciones e interacciones con los otros componentes del sistema

1.9.3 Memoria

Para todos los PLC's existentes en el mercado se puede establecer tres áreas de memoria: Una tabla de datos de entrada, una tabla de datos de salida, y un área de memoria donde se almacena el programa definido por el usuario.

1.9.4 Módulos de Entrada

Son interfaces que transforman las señales externas al PLC (Sea de transductores, de transmisores, etc), en señales digitales para su posterior utilización dentro de la lógica del programa.

Estas son de dos tipos: Discretas y Analógicas, la primera convierte la señal en un estado lógico (0 o 1), dependiendo del valor de la misma, generalmente se usan voltajes comprendidos entre 0 para un cero lógico y 5v. para un uno lógico, pero esto depende del tipo de PLC (5v, 24v, 120v). Tanto en voltaje continuo como en alterno.

Por su parte para entradas análogas se usan módulos

convertidores analógicos digitales encargados de transformar señales analógicas en valores numéricos digitales.

1.9.5 Módulos de Salida

Los módulos de salida son interfaces especiales que transforman el valor digital de un PLC en señales eléctricas; es el encargado de activar y desactivar los actuadores tales como bobinas de contactores, lámparas, motores pequeños, etc. Al igual que las entradas éstas pueden ser tanto discretas como analógicas siendo las primeras las usualmente más usadas.

1.9.6 Interfaces de Comunicación

Estas proveen el hardware y el protocolo para transferir la información desde un PLC a otros, a una PC o a cualquier otro dispositivo electrónico inteligente. Usualmente se dispone de un pórtico de comunicaciones en el módulo de la CPU para propósitos de programación y para monitoreo en línea.

1.9.7 Operación de un PLC

El algoritmo que se utiliza en los PLC para su funcionamiento es el de “Barrido”, el mismo que funciona de la siguiente manera:

1. Leer las entradas, esto para transferir o enviar el estado de las entradas a la “Tabla de datos de entrada”.
2. Ejecución de la lógica programada (El programa desarrollado para una tarea de control), la misma que usando los datos de entrada y valores de datos en salida (En caso de que el programa lo necesite) inicia la ejecución del proceso, la tabla de salida de datos cambia para reflejar el resultado de la lógica programada, pero sin que ningún módulo de salida cambie su estado.

3. Cambio o actualización de las salidas obtenidas por la ejecución del programa mediante la transferencia de estos datos al módulo de salida del PLC.
4. El último paso es un auto diagnóstico para asegurar que las funciones del PLC funcionan correctamente.

1.9.8 Programación de un PLC

Cuando surgieron los autómatas programables, lo hicieron con la necesidad de sustituir a los enormes cuadros de maniobra contruidos con contactores y relés. Por lo tanto, la comunicación hombre-máquina debía ser similar a la utilizada hasta ese momento. El lenguaje usado debía ser interpretado con facilidad por los mismos técnicos electricistas que anteriormente estaban en contacto con la instalación. Con esta idea aparecieron los primeros lenguajes o métodos para programar un PLC. Estos lenguajes han evolucionado en los últimos tiempos, de tal forma que algunos de ellos ya no tienen nada que ver con el típico plano eléctrico a relés.

Por la gran diversidad de PLCs, hay muchos métodos para programar, que no son aplicables para todos. No se pretende aquí mencionar a todos, pero entre los más populares se tiene:

- FBD
- LADDER
- SFC
- ST
- IL

1.10 Reactores Químicos

La actual investigación se basa en el calentamiento de un tanque de alimentación continua mediante un serpentín alimentado por vapor de agua, sin embargo se ha incluido en el

capítulo dos modelos de simulación para el calentamiento y enfriamiento de un reactor químico, esto para facilitar el desarrollo del prototipo del calentador para futuras investigaciones. Por este motivo se incluye definiciones sobre reactores químicos.

1.10.1 Definición de Reactor Químico

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora está constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control. Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.

Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

1.10.2 Tipos de Reactores Químicos

Existen infinidad de tipos de reactores químicos, y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular, entre los tipos más importantes, más conocidos, y mayormente utilizados en la industria se puede mencionar los siguientes:

- **Reactor discontinuo.** Es aquel en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino más bien, al inicio del proceso se introducen los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido, luego se descargan los productos de la reacción y los reactantes no convertidos. También es conocido como reactor tipo batch.
- **Reactor continuo.** Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción.
- **Reactor semicontinuo:** es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material de manera casi continua.
- **Reactor tubular:** En general es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. Tienen forma de tubos, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.
- **Tanque con agitación continua:** Este reactor consiste en un tanque donde hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado. La agitación del contenido es esencial, debido a que el flujo interior debe estar en constante circulación y así producir una mezcla uniforme.
- **Reactor de mezcla perfecta:** En este reactor las

propiedades no se modifican ni con el tiempo ni con la posición, ya que suponemos que estamos trabajando en estado de flujo estacionario y la mezcla de reacción es completamente uniforme. El tiempo de mezcla tiene que ser muy pequeño en comparación con el tiempo de permanencia en el reactor. En la práctica se puede llevar a cabo siempre que la mezcla fluida sea poco viscosa y esté bien agitada.

- **Reactores de membrana:** Son aquellos que combinan la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana selectivamente remueve una (o más) de las especies reactantes o productos. Estos reactores han sido comúnmente usados para aplicaciones en las cuales los rendimientos de la reacción están limitados por el equilibrio. También han sido propuestos y usados para otras aplicaciones; para incrementar el rendimiento y la selectividad de reacciones enzimáticas y catalíticas influyendo a través de la membrana sobre la concentración de una (o más) especies intermedias, removiéndolas selectivamente (o ayudando a mantenerlas en una concentración baja), evitando la posibilidad de que dichos compuestos envenenen o desactiven el catalizador y para proveer una interfase controlada entre dos o más reactantes.

1.10.3 Definición de Reacción Química

Se conoce como reacción química a aquella operación unitaria que tiene por objeto distribuir de forma distinta los átomos de ciertas moléculas (compuestos reaccionantes o reactantes) para formar otras nuevas (productos). El lugar físico donde se llevan a cabo las reacciones

químicas se denomina reactor químico. Los factores que hay que tener en cuenta a la hora de llevar a cabo o desarrollar una reacción química son:

- Condiciones de presión, temperatura, y composición necesarias para que los materiales entren en estado de reacción.
- Las características termodinámicas y cinéticas de la reacción.
- Las fases (sólido, líquido, gaseoso) que se encuentran presentes en la reacción.

Las formas en que se producen las reacciones químicas son las siguientes:

- **Descomposición**, consiste en que una molécula se divide en moléculas más pequeñas, átomos o radicales.
- **Combinación**, ésta se realiza cuando una molécula o átomo se une con otra especie para formar un compuesto nuevo.
- **Isomerización**, en este caso la molécula no efectúa ninguna descomposición externa o adición a otra, es simplemente un cambio de configuración estructural interna.

1.10.4 Clases de Reacciones Químicas

- **Reacciones Homogéneas:** Cuando se afecta solamente una fase, ya sea gaseosa, sólida, o líquida.
- **Reacciones Heterogéneas:** Cuando se requiere la presencia de al menos dos fases para que tenga lugar la reacción a una velocidad deseada.
- **Reacciones Catalíticas:** Son aquellas reacciones que requieren de una sustancia adicional (que no aparece

en el balance global) para modificar la velocidad de reacción; esta sustancia por su mera presencia provoca la reacción química, reacción que de otro modo no ocurriría.

- **Reacciones Autocatalíticas:** En esta reacción, uno de los productos formados actúa como catalizador, participando en otra etapa del proceso donde la velocidad de reacción es más rápida que en la primera.
- **Reacciones Endotérmicas:** Son aquellas que adsorben calor del exterior.
- **Reacciones Exotérmicas:** Son aquellas que liberan calor hacia el exterior.

1.10.5 Desarrollo de Modelos de Proceso

El objetivo del proyecto se basa en el control del proceso químico dentro de un reactor químico mediante el control de temperatura del mismo, la reacción de los reactivos por si misma desprende calor, el mismo que se toma como la variable a controlarse. Para esto es necesario tener ciertos criterios básicos para la modelación del sistema (no se profundiza en los temas referentes al proceso ya que no competen al alcance del proyecto, sólo se analizarán las ecuaciones que dan la posibilidad de la modelación y simulación del sistema).

En resumen, la forma general de la ecuación fundamental de conservación es:

$$\begin{array}{l} \text{(Razón de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{la cantidad que} \\ \text{se conserva)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{(Razón de} \\ \text{la cantidad que} \\ \text{se conserva} \\ \text{entrando)} \end{array} - \begin{array}{l} \text{(Razón de} \\ \text{la cantidad que} \\ \text{se conserva} \\ \text{saliendo)} \end{array} \quad \text{ecuación 1.2}$$

La cantidad que se conserva puede ser masa total, masa de un componente, energía y momento. Los términos de

razón de entrada y salida se deben tomar en cuenta para todos los mecanismos debido a los cuales la cantidad que se conserva entra o sale del volumen de control; la energía puede entrar y salir mediante conducción de calor y radiación; los componentes se pueden transferir mediante difusión, y el momento se puede generar o destruir mediante fuerzas mecánicas. En el caso de las reacciones químicas, la razón de reacción se debe tomar en cuenta como término de entrada para los productos de la reacción, y como término de salida para los reactivos.

La razón de acumulación generalmente se da de la siguiente manera:

$$\text{Razón de acumulación de la cantidad que se conserva)} = \frac{d}{dt} \text{(Cantidad total que se conserva en el volumen de control)} \quad \text{ecuación 1.3}$$

Donde t es tiempo. Esto significa, que los modelos matemáticos consisten en un sistema de ecuaciones diferenciales simultáneas de primer orden o, en su forma más simple, en una sola ecuación diferencial de primer orden cuya variable independiente es el tiempo.

Además, en el modelo puede haber ecuaciones algebraicas que resultan de las expresiones para las propiedades físicas y para las razones de entrada y salida, así como de las ecuaciones de balance en las que se desprecia el término de acumulación. Para expresar la cantidad total que se conserva y las razones de entrada y salida en términos de las variables del proceso (temperaturas, presiones, composiciones), estas variables deben ser relativamente uniformes en todo el volumen de control. Para desarrollar el modelo matemático es importante tener en cuenta la cantidad máxima de ecuaciones de balance, independientes que

se aplican a cada volumen de control (o punto) del proceso; en un sistema con N componentes, éstas se expresan con:

- N balances de masa
- 1 balance de energía
- 1 balance de momentos

Los N balances de masa independientes pueden ser N balances de componentes o un balance total de masa y $N - 1$ balances de componentes.

Generalmente, el balance de momentos no se utiliza en la simulación del proceso, porque con él entran como incógnitas las fuerzas de reacción sobre el equipo y las paredes de la tubería, las cuales rara vez son de interés. Además de las ecuaciones de balance se escriben otras ecuaciones de manera separada para expresar las propiedades físicas (por ejemplo, densidad, entalpia, coeficientes de equilibrio) y las razones (por ejemplo, de reacción, de transferencia de calor, de transferencia de masa) en términos de las variables del proceso (por ejemplo, temperatura, presión, composición).

El método que se utiliza para desarrollar los modelos matemáticos básicamente es el siguiente:

- Se escriben las ecuaciones de balance.
- Se contabilizan las nuevas variables (incógnitas) que aparecen en cada ecuación, de manera que se tengan los antecedentes de la cantidad de variables y ecuaciones.
- Se introducen relaciones hasta que se tiene la misma cantidad de ecuaciones y variables y se toman en cuenta todas las variables de interés.

El orden en que se escriben las ecuaciones de balance

es el siguiente:

- Balance total de masa
- Balance de componentes (o elementos)
- Balance de energía
- Balance de energía mecánica

CAPITULO 2

2. TIPOLOGÍA DE LOS DESECHOS

Los desechos son considerados una heterogénea gama de objetos que se generan como resultado de las múltiples actividades humanas. Por sus cualidades físicas pueden ser materiales inertes (metales, vidrios, tierra y otros), materiales fermentables (restos orgánicos) y materiales combustibles (papel, cartón, plásticos, madera, goma, etc.).

Los residuos de los establecimientos de salud u hospitalarios se caracterizan por estar contaminados con agentes infecciosos o que pueden contener altas concentraciones de microorganismos que son de potencial peligro para la comunidad.

Un mal manejo de desechos puede facilitar la transmisión de enfermedades intrahospitalarias, causando un aumento en el número de días de hospitalización, en los costos de tratamiento y la mortalidad.

2.1 Desechos No Peligrosos

Son los residuos que se generan diariamente en algunas actividades comunes en un hospital, clínica, en nuestras casas y en oficinas. En general estos residuos no presentan ningún tipo de riesgo para la salud humana y el medio ambiente si se manejan adecuadamente. Son residuos que pueden ser en su gran mayoría reciclables o reutilizables.

Dentro de esta categoría están:

2.1.1 Ordinarios o Comunes

Son los generados en el desempeño normal de actividades. En general estos residuos se generan en todos los sitios del hospital como oficinas, pasillos, áreas comunes y cafeterías.

Ejemplo papeles, bolsas, botellas y material típico generado en oficinas y que no están contaminados por ningún tipo de fluido corporal. Estos residuos pueden ser entregados al sistema de recolección de basuras del municipio sin ningún tipo de tratamiento y pueden ser reciclados para un uso posterior.

2.1.2 Inertes

Son residuos que por su naturaleza no permiten una fácil descomposición, su transformación en materia prima y su degradación natural requiere de grandes períodos de tiempo. Algunos tipos de papel, plásticos

2.1.3 Biodegradables

Son residuos químicos o naturales que se desintegran en el ambiente, sin alterarlo ni producir riesgo alguno para la salud. En estos se encuentran residuos vegetales, residuos alimenticios de cocina y cafeterías, papeles que no son aptos para el reciclaje, algunos jabones, detergentes y otros residuos que se puedan transformar fácilmente en materia orgánica y pueden ser entregados al servicio de recolección de basuras del municipio para ser llevados al relleno sanitario.

2.1.4 Reciclables

Son residuos que pueden volver a ser utilizados como materia prima en procesos productivos. Entre estos se encuentran el papel, vidrio, cartón, plástico, la chatarra, las telas y madera.

2.2 Desechos Peligrosos

Son los residuos generados en la institución u hospital que deben tener un tratamiento especial por el riesgo de contaminación, ante la posibilidad de haber estado en contacto con agentes patógenos

y cuentan con algunas de las siguientes características: Infecciosas, combustibles, inflamables, explosivas, reactivas, radiactivas, volátiles, corrosivas y tóxicas, que pueden causar daño a la salud humana y al medio ambiente.

2.2.1 Residuos Infecciosos o de Riesgo Biológico

Son aquellos que contienen gérmenes patógenos y, por tanto son peligrosos para la salud humana. Constituyen del 10 al 15% de los desechos. Los residuos infecciosos o de riesgo biológico se clasifican en:

- **Biosanitarios.**

Son todos aquellos elementos o instrumentos utilizados durante la ejecución de los procedimientos asistenciales que tienen contacto con materia orgánica, sangre o fluidos corporales del paciente tales como: gasas, apósitos, algodones, escobillas, vendajes, material de laboratorio o cualquier otro elemento desechable que la tecnología médica introduzca para estos fines.

- **Anatomo- patológicos**

Son aquellos residuos que se generan en procedimientos de cirugía y laboratorio. Dentro de estos tenemos las biopsias, placentas, tejidos, órganos amputados, partes y fluidos corporales que se remueven durante cirugías u otros, incluyendo muestras para análisis autopsia u otro procedimiento médico.

- **Corto punzantes**

Son todos los residuos cortantes o punzantes utilizados en la actividad de la salud. Se trata especialmente de agujas, bisturís, lancetas, jeringas, mangueras, puntas de equipos de venoclisis, catéteres con aguja de sutura,

pipetas y otros objetos de vidrio, que han estado en contacto con agentes infecciosos. Estos residuos dada la facilidad para crear una puerta de entrada de los gérmenes patógenos en el organismo humano, constituyen fundamentalmente 1 % de todos los desechos.

- **Desechos de laboratorio.**

Cultivos de agentes infecciosos y desechos biológicos, vacunas vencidas o inutilizadas, cajas de Petri, placas de frotis y todos los instrumentos usados para manipular, mezclar o inocular microorganismos.

- **Desechos de sangre**

Sangre de pacientes, suero, plasma u otros componentes; insumos usados para administrar sangre, para tomar muestras de laboratorio y paquetes de sangre que no han sido utilizados.

- **Residuos de aislamiento**

Residuos biológicos, excreciones, exudados o materiales de desecho provenientes de las salas de aislamiento de pacientes con enfermedades altamente transmisibles. Se incluyen también a los animales aislados.

- **Desechos de investigación**

Cadáveres o partes de animales contaminadas, o que han estado expuestos a agentes infecciosos en laboratorios de experimentación, industrias de productos biológicos y farmacéuticos, y en clínicas veterinarias.

2.3 Desechos Químicos

Son los restos de sustancias químicas y sus empaques o cualquier otro residuo contaminado con éstos, los cuales, dependiendo de su concentración y tiempo de exposición pueden causar daños a los seres humanos y al medioambiente.

Los Contaminantes químicos pueden ser orgánicos o inorgánicos. Los contaminantes inorgánicos son diversos productos disueltos o dispersos en el agua que provienen de descargas domésticas, agrícolas e industriales o de la erosión del suelo. Los principales son cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos, elementos de limpieza, solventes, etc.

Gran parte de estos contaminantes son liberados directamente a la atmósfera y bajan arrastrados por la lluvia.

2.3.1 Fármacos

Son aquellos medicamentos o excedentes de las sustancias que han sido empleados en cualquier tipo de procedimiento y están vencidos, deteriorados o parcialmente consumidos.

Los más peligrosos son los antibióticos y las drogas citotóxicas usadas para el tratamiento del cáncer.

2.3.2 Citotóxicos Especiales

Son residuos que por sus características físico-químicas y su composición, presentan riesgos para el medio ambiente.

Presentan características agresivas tales como corrosividad, reactividad, inflamabilidad, toxicidad, explosividad y radiactividad

2.3.3 Metales Pesados

Son cualquier objeto o elemento que contengan metales pesados como: Plomo, Cromo, Mercurio, Cadmio, Antimonio, Bario, Níquel, Estaño, Vanadio, Zinc.

2.3.4 Residuos Radiactivos

Son las sustancias emisoras de energía predecible o

continúa en forma alfa, beta o de fotones, cuya interacción con la materia, puede dar lugar a la emisión de rayos X y neutrones, provenientes de laboratorios de investigación química y biología; de laboratorios de análisis clínicos y servicios de medicina nuclear.

Materiales Peligrosos	Lugar de Generación	Lugar de Uso y Disposición	Disposición Común
Quimioterapia y químicos antineoplásticos	Preparado en clínicas o farmacias	Áreas de cuidado de pacientes, farmacias y clínicas especiales	Incineración como residuos hospitalarios; disposición como residuos patológicos.
Formaldehído	Patología, Autopsias, diálisis, unidades de enfermería	Patología, Autopsias, diálisis, unidades de enfermería	Diluidos y arrojados en los desagües sanitarios.
Solventes	Patología, Histología, Ingeniería, Laboratorios	Patología, Histología, Ingeniería, Laboratorios	Evaporación; arrojados en los conductos sanitarios.
Mercurio	En todas las áreas clínicas en termómetros, aparatos de medición de presión sanguínea, tubos de anor, laboratorios.	Áreas clínicas, laboratorios	Los termómetros rotos se colocan en los contenedores para objetos cortantes; si no hay disponibles kits para derrames, se desecha como residuo

			hospitalario o residuos sólidos urbanos.
Gases Anestésicos	Quirófano	Quirófano	Con frecuencia son eliminados al exterior por extractores de aire
Oxido Etileno	Central de reproceso y esterilización; terapia respiratoria.	Central de reproceso y esterilización; terapia respiratoria	Se elimina sacando el gas de escape al exterior.
Radio Nucleídos	Radiación Oncológica	Radiación Oncológica	Almacenaje seguro por el tiempo necesario para la descomposición de los elementos nucleares.
Soluciones desinfectantes para limpieza	Servicios de limpieza, infraestructura general, quirófano	Áreas de diagnóstico, quirófano e infraestructura general	Dilución, disposición en cloacas, desagüeros
Mantenimiento: Residuos de aceites, sobrantes de pintura, tubos fluorescentes	Mantenimiento	Mantenimiento	Residuos sólidos, cloacas, desagües
Químicos fotográficos	Radiología, Clínicas satélites que ofrecen servicios radiológicos	Radiología, Clínicas satélites que ofrecen servicios radiológicos	Los reveladores y fijadores son arrojados con frecuencia por los desagües sanitarios

Tabla 2.1 Generación de los desechos hospitalarios

Existen diferentes sistemas de clasificación para la caracterización de los residuos hospitalarios, un estudio realizado por el CEPIS-OPS (centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente – organización panamericana de la salud) en agosto del 1998 muestran la clasificación sugerida de la Organización Mundial de la Salud y la Clasificación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de América. La adopción de una de ellas dependerá de las características particulares del centro de salud.

2.4 Caracterización de residuos incinerables

El residuo ideal para la incineración, desde el punto de vista económico, es aquel que presente una alta proporción de materia orgánica y baja de agua e inertes (inorgánicos), de forma que pueda ser quemado sin el empleo de combustible adicional y con aprovechamiento del calor producido, para dar lugar a un reducido volumen de residuo final.

En la práctica, la técnica de incineración es factible en el contexto técnico, económico y medioambiental para los residuos peligrosos que satisfacen los siguientes requisitos:

- Compuestos inorgánicos < 15% (cenizas, que deben ser las mínimas posibles).
- Agua < 65% (influye en la economía del proceso)
- Compuestos orgánicos > 30% (determina el poder calorífico del residuo)

La caracterización de los residuos incinerables constituye la base de partida para abordar la elección de los equipos, su diseño y las condiciones de operación de las diferentes etapas que conforman

el proceso. Además de los requerimientos puramente técnicos, en el caso de las incineradoras, hay que tener en cuenta ciertos condicionantes legales que regulan las condiciones de funcionamiento y los límites de emisión de los gases a la atmósfera.

Estado y propiedades físicas de los residuos

El estado y algunas propiedades físicas como la viscosidad, densidad, características reológicas, del residuo condicionan principalmente el modo de alimentación al horno de combustión, con objeto de lograr el contacto adecuado entre la materia combustible y el oxígeno.

Análisis elemental de la materia orgánica

Consiste en la determinación de C, H, O, N, S, P y halógenos. La presencia de compuestos orgánicos halogenados producirá HCl y Cl₂, HF y HBr. El N y S conducen a la formación de compuestos como NO_x y SO₂, también de carácter ácido. La existencia de Cl₂, junto a determinadas condiciones de operación, puede generar por reacciones secundarias la formación de dioxinas y furanos, que exigen su destrucción total por exigencias legales debido a su carácter cancerígeno y mutágeno.

Análisis de compuestos de alta peligrosidad

Es posible la presencia de compuestos cuya destrucción pudiera presentar dificultades especiales para alcanzar los niveles de eficacia exigibles para su total eliminación del residuo, debido a su tremenda toxicidad (Componentes orgánicos peligrosos PCOPs).

Poder Calorífico

El poder calorífico del residuo constituye un factor determinante en la economía de la incineración. Un residuo con un poder calorífico

por encima de unas 3500 kcal/kg resulta incinerable sin necesidad de combustible adicional. Para el tratamiento de ciertos residuos que contienen compuestos orgánicos de alta peligrosidad, requieren el empleo de combustible adicional.

De acuerdo a la norma internacional NFPA (National Fire Protection Association) los residuos se clasifican en tipo 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 dependiendo de su porcentaje de humedad, compuestos volátiles y potencia calorífica.

- **Residuos Tipo 0:** Altamente combustibles. Dentro de ellos tenemos: papel, carbón, cartón barredura de piso de lugares comerciales e industriales. También basuras que contienen 10% en bolsas plásticas, revestimientos de papel laminado, cartones tratados, desperdicios aceitosos y fragmentos de caucho. En general se puede decir que son residuos altamente combustibles.
- **Residuos Tipo 1:** Mezcla de desperdicios tales como vegetales, trozos de fibras, líquidos para limpieza doméstica, cartones, madera, papel y barreduras de suelo que se encuentren en establecimientos completamente industriales. También basuras con un 20% de su peso en desperdicios de cafetería, restaurantes y pequeñas cantidades de, plásticos y cauchos.
- **Residuos Tipo 2:** Es la mezcla de residuos tipo 1 y tipo 3, en proporciones iguales. Es muy común en apartamentos y residencias.
- **Residuos Tipo 3:** Consiste de desperdicios de vegetales y desperdicios animales, de restaurantes, cafeterías, mercados y sitios de estar.
- **Residuos Tipo 4:** Son residuos de animales y humanos, esqueletos y partes orgánicas. Corresponde a los residuos de hospitales, mataderos, expendios de carne y sitios similares.
- **Residuos Tipo 5:** son residuos líquidos y semilíquidos como

el alquitrán, disolventes, pinturas, lodos, gases tóxicos y residuos similares, provenientes de la operación industrial. Su composición y poder calorífico no están estandarizados y por tanto deben ser determinados, para cada circunstancia específica.

- **Residuos Tipo 6:** Básicamente son residuos compuestos por caucho, plástico provenientes de operaciones industriales. su composición y poder calorífico deben ser determinados para cada circunstancia específica.

Residuo	Kcal/kg (combustible)	Contenido másico cenizas (%)	Contenido másico humedad (%)
Plásticos	9000	0.5	2
Trapos	4000	0.2	10
Periódicos	4000 - 4400	1.5	6
Polietileno	11100	0	0
Madera	5000 – 6000	4	20
Aserrín de madera	4300 – 4700	3	1
Grasas animales	9450	0	0
Desechos linóleos	6100	20 - 30	1

Tabla 2.2 Características de Humedad, cenizas y poder calorífico para los diferentes tipos de residuos

CAPITULO 3

3. CAMARA DE COMBUSTIÓN DEL INCINERADOR

3.1 Partes de un Incinerador

Un incinerador está compuesto por varios elementos que se detallan a continuación.

3.1.1 Cámara de Combustión

Se le llama también cámara primaria o cámara de encendido, recibe el residuo y comienza la combustión en condiciones de deficiencia de oxígeno. Es decir, trabaja con menos oxígeno de lo necesario, por lo que se produce la pirolisis. La limitación de aire en la cámara primaria previene la rápida combustión y permite condiciones de “tranquilidad” en la cámara, o sea: tiempo para que se queme el residuo. Estas condiciones evitan que partículas de material pasen a la cámara secundaria y que de esta manera sea emitido a la atmósfera.

La cámara principal se construye de acero, con resistencia a las temperaturas altas, esta cámara se encuentra revestida con ladrillos refractarios, cuya finalidad es la de retener el calor producido por los quemadores, la temperatura mínima

de la cámara primaria para incineradores de desechos sólidos hospitalarios debe de ser 850 grados Celsius.

En la cámara primaria ocurren principalmente tres procesos:

- El residuo ingresado se volatiliza
- La fracción volátil del residuo se vaporiza y pasa a la cámara secundaria
- El remanente es quemado y reducido a cenizas

3.1.2 Cámara de Post-Combustión

Se le llama también cámara secundaria, ésta recibe los gases que generaron los combustibles volátiles de la cámara primaria. Las condiciones de combustión son reguladas para tener aire en exceso y asegurar la completa combustión del residuo antes de su eliminación. La cámara secundaria es de menor tamaño que la primaria, se construye también de acero y se reviste con material refractario que resiste mayores temperaturas en comparación con la cámara primaria.

Las condiciones necesarias para lograr alta eficiencia en la cámara secundaria son:

- Alta temperatura (± 1.200 °C, mínimo 1.300 °C)
- Exceso de aire (100%)
- Turbulencia (alto tiempo de residencia, mínimo 2 segundos)

El exceso de aire en la cámara secundaria debe ser suficiente como para mantener el rango de temperatura deseado. Considerar que a medida que se incrementan los

niveles de oxígeno, la temperatura en la cámara secundaria desciende.

3.1.3 Cámara de Post-Combustión

El cuerpo principal de un incinerador es el conjunto de las cámaras de combustión primaria y secundaria y los componentes necesarios para realizar el proceso de combustión, en él se encuentran instalados los quemadores, el tablero de control, así como la compuerta de ingreso de los desechos a incinerar y la compuerta para extracción de cenizas.

Se construye de acero resistente a altas temperaturas y se ancla a la cimentación.

3.1.4 Quemadores

Los quemadores, de los que pueden existir uno o más según el tamaño de la cámara o las temperaturas que se desean alcanzar, consisten en una boquilla donde se pulveriza el combustible a través de una bomba, en una mezcla con aire a presión, el cual se encenderá mediante una chispa producida por un sistema eléctrico parte del equipo.

Para poder producir la chispa es necesario un transformador de voltaje, la chispa se produce debido al alto voltaje en dos electrodos que se encuentran alineados y calibrados a la salida de la boquilla de pulverización de combustible y salida de aire para la combustión. Un motor eléctrico es el encargado de dar movimiento tanto a la bomba de combustible así como al ventilador de aire.

3.1.5 Tablero de Control

En el tablero de control se encuentran los mandos para activar los distintos componentes eléctricos del incinerador, consta de: Interruptor general, interruptores de los quemadores, indicador de temperatura, contactores, relés térmicos, transformador, luces piloto y temporizadores.

3.1.6 Chimenea

Es un sistema utilizado para evacuar los gases resultados de la incineración de los desechos, es de acero en forma cilíndrica y posee recubrimiento refractario en su interior, según la capacidad del incinerador así serán las dimensiones de la chimenea (altura y diámetro).

3.2 Dimensionamiento de la Cámara de Combustión

Para de realizar el dimensionamiento de las cámaras de combustión de un incinerador para la destrucción de los desechos hospitalarios se considera que el sistema se encuentra en estado transigente y por lo tanto se tomara en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cantidad de residuos cargados al incinerador
- Porcentaje de humedad del desecho
- Propiedades Térmicas del material
- Forma de Geométrica de la Cámara
- Longitud de la Cámara
- Temperatura de entrada y salida de los Gases
- Tipo de Combustible
- Velocidad del gas de salida
- Tiempo de residencia
- Recuperación de calor

3.2.1 Materiales Refractarios y sus Características

Un parámetro importante en el dimensionamiento del incinerador es el material refractario con objeto de perder la menor cantidad posible de energía y así facilitar su posterior recuperación.

Se deben utilizar materiales refractarios que resistan altas temperaturas y resistentes a la abrasión por efecto de las cenizas. El material será adecuado si:

- Resiste altas y bajas temperaturas
- Integridad estructural en el ciclo de expansión y compresión
- Debe resistir la penetración de las cenizas fundentes y los gases
- Resistente a la erosión y corrosión
- Debe tener características de aislamiento
- Porosidad
- Capacidad de mantener temperatura
- Capacidad de calentarse
- Calor específico
- Expansión térmica
- Resistencia a la penetración de las cenizas fundentes y gases
- Límite de incendio
- Límite de explosión

Para la realización de este estudio se ha considerado como materiales piedra pómez, ladrillos refractarios, cemento refractario, arena sílice.

➤ **Piedra Pómez**

La piedra pómez es una roca porosa, grisácea o blancuzca, frágil y de bajo peso específico, procedente de magma volcánico reciente; está compuesta por cuarzo y silicatos (principalmente feldespato). Se encuentra pura o mezclada con varias sustancias, sobre todo obsidiana, que se distingue por su color negro brillante y por su densidad relativa, cuatro veces mayor.

El proceso industrial comprende varias operaciones: selección para separar la obsidiana, molido y pulverización en máquinas con muelas de piedra o de metal, secado en hornos abiertos, cernido y tamizado usando cedazos abiertos manuales y tamices rotatorios y oscilantes, recuperándose generalmente la materia residual.

La piedra pómez se utiliza como abrasivo (en bloque o en polvo), como material ligero de construcción y para la fabricación de artículos de piedra, explosivos, etc. Es de color blanco grisáceo hasta amarillento, raramente de color café o gris. El término "piedra pómez" incluye todas las rocas piroclásticas porosas.

- **Composición química:** Compuesto de trióxido de sílice y trióxido de aluminio, entre otros componentes: 71% de SiO_2 , 12.8% de Al_2O_3 , 1.75% de Fe_2O_3 , 1.36% de CaO , 3.23% de Na_2O , 3.83% de K_2 , 3.88% de H_2O .
- **Dureza:** 5/6 Mohs. Aunque de dureza media, debido a su alta friabilidad el poder abrasivo es muy bajo, produciendo un efecto muy suave sobre la superficie
- **Textura:** esponjosa o espumosa. Escoriácea, con muchos huecos y cavidades
- **Propiedades:** Sus poros cerrados le confieren una baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es

muy ligero. $0,7$ ($0,4$ a $0,9$) $\text{g/cm}^3 = 700 \text{ Kg/ m}^3$,
 conductividad térmica $k = 0.4 \text{ w/ m K}$, calor específico $C_p =$
 J/ Kg K .

➤ **Ladrillos Refractarios**

Se presentan las características comunes de los ladrillos refractarios cuya serie es de $9" \times 4\frac{1}{2}" \times 2\frac{1}{2}"$ recto.

Análisis Químico %	
Al_2O_3	34.0
SiO_2	61.0
Fe_2O_3	1.0
TiO_2	1.2
CaO	0.3
MgO	0.4
Álcalis	1.8
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	32
Temperatura Equivalente ($^{\circ}\text{C}$) NTC - 706, ASTM C-24	1717
Porosidad Aparente (%) ASTM C-20	66.0 - 71.0
Resistencia a la compresión en frío. Mpa (kg/cm^2)	1.5 - 3.5 (15 -35)
Módulo de ruptura en frío. Mpa (kg/cm^2) NTC - 682, ASTM C-133	0.8 - 2.0 (8 – 20)
Cambio lineal permanente ($^{\circ}\text{C}$ - %)	1230 0.0C - 0.1C

NTC -859, ASTM C-210	1400 0.5C - 1.3C
Densidad aparente (g/cm ³) NTC - 674, ASTM C-20	2.16 - 2.26
Conductividad térmica, a temperatura 819 0.274 media, (°C- kcal/m hr K) ASTM C-201	1060

Tabla 3.1 Características Técnicas y Especificaciones del Ladrillo Refractario.

Densidad	:	2325 – 2600 Kg/m ³ ,
Conductividad Térmica	:	1.3 W/mK
Calor Especifico	:	Cp = 960 J / Kg K.

➤ **Arena Sílice**

SiO₂ es el principal constituyente de las arenas de sílice y procede de rocas ricas en sílice, tanto intrusivas como extrusivas (granito y riolitas, respectivamente) y de las sedimentarias areniscas.

Su composición suele ser 100% de SiO₂ (46.7% de Si y 53.3% de O₂). Aparece con frecuencia como mineral de ganga en los yacimientos metalíferos.

Se presenta en cristales prismáticos terminados generalmente en una combinación de romboedros positivos y negativos que en ciertas ocasiones tienen idéntico desarrollo y producen el efecto de una bipirámide

hexagonal. Tiene una dureza de 7, peso específico de 2.65; índice de refracción de 1.548, carece de exfoliación evidente; tiene propiedades piroeléctricas y piezoeléctricas. El color del cuarzo varía de incoloro a blanco lechoso, amarillo, morado, amatista y gris.

En este aspecto, la pasta es capaz de soportar unos cuantos grados de fusión de cono pirométrico a la temperatura de 1 710° a 1 730° C, y que puede utilizarse en condiciones de seguridad en estructuras hasta los 1650° C (3 002° F). La arena sílice tiene muchas aplicaciones industriales. Este mineral es útil debido a sus propiedades inherentes, entre las cuales se pueden citar las siguientes: es químicamente inerte en un rango muy amplio de pH, lo que permite su aglutinamiento sin dejar residuos ajenos a la mezcla, conservando sus características físicas, aun en condiciones de carga y temperatura refractaria; Una de las propiedades más importantes es su resistencia, por lo que se extraen grandes volúmenes para ser utilizados en la industria de la construcción, principalmente para la elaboración de ladrillos silicocalcáreos que sobrepasan los estándares de resistencia de otro tipo de materiales; mientras que un ladrillo de construcción estándar resiste una compresión de 160 kg/cm², el ladrillo silicocalcáreo específica de 320 a 350 kg/cm², según sea el aglutinamiento y la selección de mineral.

La sílice utilizada en esta industria es como grava de cuarzo, con diámetros de 2 a 4 mm, para la fabricación de ferroaleaciones; arena sílica para elaborar moldes y corazones de diferentes piezas fundidas y también arena sílice como materia prima en la fabricación de refractarios. El mineral que se utiliza en la carga para la fabricación de ferrosilicio son gravas de cuarzo con contenido no menor del 95% de

SiO₂ , no mayor de 0.02% de P₂O₅ (Pentóxido de fósforo) y una menor cantidad posible de impurezas escoriificantes de Al₂O₃ (Alúmina), debiendo cumplir además especificaciones del tamaño de la partícula entre +1/2" y -2". Acuerdo a su contenido de sílice, que varía de 18 a 45%, 75%, 80% y 90%.

Análisis Químico	Arena Sílice
Si O ₂	34.0
Al ₂ O ₃	0.8
Fe ₂ O ₃	32
Temperatura Equivalente (°C) NTC - 706, ASTM C-24	1717
Porosidad Aparente (%) ASTM C-20	66.0 - 71.0
MgO	0.3
Alcalis	0.5
P.P.I (%)	0.2
Punto de fusión de cono (°C)	1690 °C
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	329
Porosidad (%)	26.8
Densidad a Granel (g/cm ³)	1.7
Conductividad térmica (BTU)	7.5

Tabla 3.2 Propiedades termo física de la arena sílice

➤ **Cemento Refractario**

El cemento refractario que se ha considerado es el Concrax 1500 (Concreto refractario sílice-aluminoso denso), cuya aplicación es general en zonas cuya temperatura de trabajo no exceda de 1540 °C, como en calderas, hornos de tratamiento térmico, hornos de foso, máximo tamaño del grano 3 mm, presentación sacos de 25 kg.

Análisis Químico	
Al ₂ O ₃	49.5
SiO ₂	0.2
Fe ₂ O ₃	1.3
TiO ₂	2.0
CaO	7.5
MgO	0.3
Álcalis	0.4
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	32
Temperatura Equivalente °C NTC-706, ASTM C-24	1717
Máxima temperatura de servicio recomendada °C	1540
Máximo tamaño de grano mm	5
Material seco requerido por metro cúbico kg	2000 - 2100
Agua de preparación cm ³ de agua/kg de material seco NTC-	120 – 135

988, ASTM C-860	
Densidad Volumétrica °C – g/cm ³	2.0 – 2.1
Módulo de ruptura en frío	110 5.0 – 8.0 (50 - 80)
°C – Mpa (Kg/cm ²) NTC – 988, ASTM C-133	1000 1.5 – 2.5 (15 - 25) 1260 4.0 – 6.0 (40 - 60) 1370 12.0 – 14.0 (120 - 140) 1480 14.0 – 15.0 (140 - 150)
Resistencia a la Compresión	110 25.0 – 40.0 (250 - 400) en frío °C
Mpa (Kg/cm ²) NTC – 682, ASTM C - 133	1000 9.0 – 11.0 (90 - 110) 1260 13.0 – 15.0 (130 - 150) 1370 29.0 31.0 (290 - 310) 1480 50.0 – 54.0 (500 - 540)
Cambio lineal permanente °C - %	1000 0.0C – 0.3C 1260 0.2C – 0.5C 1370 0.3C – 0.6C 1480 1.0C – 1.5C
NTC – 988, ASTM C-401 y ASTM C-865	

Tabla 3.3 Características técnicas y especificaciones del cemento refractario

Basándome en normas se recomienda que un incinerador de desechos hospitalarios deberá cumplir con un espesor de pared entre 18 - 22 cm., por lo cual para este caso se considera que el espesor de la pared será de 20 cm., se procederá a realizar una distribución de materiales por capas:

- **Primera capa:** piedra pómez + Cemento refractario
- **Segunda capa:** ladrillo refractario + Cemento refractario + Sílice
- **Tercera capa:** arena sílice + cemento refractario

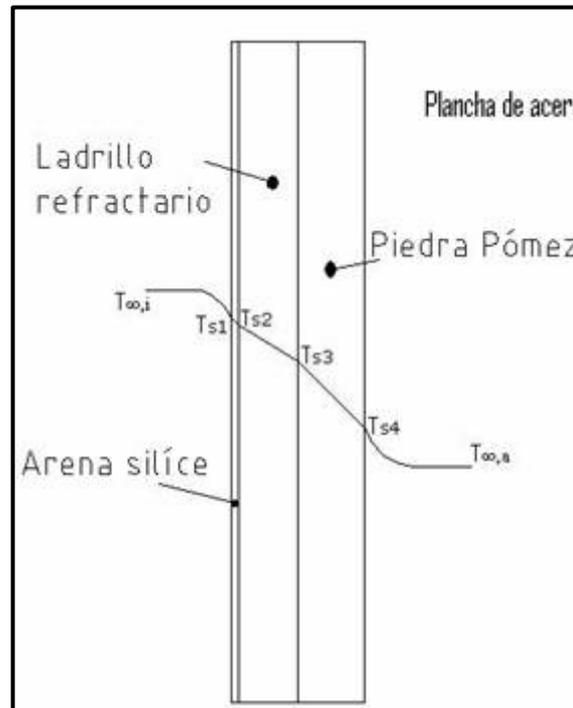


Figura 3.1 Esquema de la pared del incinerador

3.2.2 Calentamiento de la Pared

Según las normas técnicas que debe cumplir un incinerador para la cremación de los desechos hospitalarios. Se toma en consideración que un incinerador cuenta con 2 o más cámaras de combustión en la cual la primera cámara se alojaran los desechos sólidos los cuales se combustionan en deficiencia del oxígeno, esta debe operar con bajas condiciones de gas y temperaturas controladas, también se debe garantizar que las reacciones de combustión mantengan la autotermicidad, es decir que no se apague la llama que es generada a través del quemador principal, de esta forma se podrá garantizar que después de un determinado tiempo se obtendrá una temperatura de llama

constante, los gases de combustión generados en esta primera cámara pasaran a una segunda cámara que por presencia de un quemador secundario formaran una mezcla de gases turbulentos, un aumento en la velocidad de salida de los gases y se obtendrá un tiempo de residencia mayor de 2 segundos, si se logra un buen diseño y calibración de estos equipos, deben prevenir la generación de cenizas, metales pesados volátiles y óxido de nitrógeno.

Para establecer el método de cálculo que se utilizará para obtener la variación de las temperaturas a través del tiempo, debemos considerar los siguientes parámetros:

1. Se producirá un calentamiento transversal a través de la pared, al inicio todo el sistema estará en temperatura ambiente (30 °C) a medida que pasan los minutos el flujo de combustible que genera el frente llama sedera calor a la pared, por lo que se considera una transferencia de calor por convección y radiación.
2. Se producirá un calentamiento longitudinal a través de las cámaras, y un aumento en la velocidad de los gases de salida. Por tal condición se debe efectuar un balance de energía en el sistema.
3. Para efecto de cálculo se considera a la pared como un solo material, obteniendo una propiedad promedio de la unión de todos los materiales que estará construida las cámaras de combustión.
4. Las cámaras de combustión tendrá forma cilíndrica con un espesor de pared de 20 cm. con un diámetro interno de d (m), considerando que la plancha de acero será rolada, el diámetro externo será $D(m) = d + e$.

Para determinar el calentamiento de la pared por cada hora a una determinada distancia se usara el método de Schmidt.

Método de Schmidt:

Para efectuar el cálculo de la distribución de la temperatura a través de la pared se considera al sistema en estado transiente en el cual la temperatura inicial de la masa del refractario sea de 30°C, la conductividad térmica promedio del material es de 0.85 W/m°K, calor específico 980 J/ Kg K y la densidad 1512.5 Kg/ m³.

La construcción grafica de temperaturas por el método de Schmidt se basa primeramente en calcular el intervalo de tiempo de exposición de la temperatura en la pared, dividiendo el espesor (20 cm.) en varias partes iguales.

En condiciones transitorias con propiedades constantes y sin generación interna con propiedades constante y sin generación interna, la forma apropiada de la ecuación es:

$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$	ecuación 3.1
--	--------------

Con un sistema unidimensional en x, se considera que:

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$	ecuación 3.2
---	--------------

Usando la aproximación de diferencia central para las derivadas espaciales, donde: $t=p\Delta t$

La derivada respecto al tiempo en la ecuación se expresa como:

$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right _n \approx \frac{T_n^{p+1} - T_n^p}{\Delta t}$	ecuación 3.3
---	--------------

El subíndice n sirve para designar las posiciones x de los puntos nodales discretos.

El superíndice p se utiliza para denotar la dependencia con respecto al tiempo de T, y la derivada con respecto al tiempo se expresa en términos de la diferencia de temperaturas asociadas con los tiempos nuevos (p+1) y anterior (p). Por ello los calculas deben llevarse a cabo en tiempos sucesivos separado por el intervalos Δt . En el método explícito de solución, estas temperaturas se evalúan en el tiempo anterior (p), por esto se considera una que es una aproximación en diferencia hacia delante para la derivada con respecto al tiempo. Evaluando los términos la ecuación queda expresada como:

$\frac{1}{\alpha} \frac{T_n^{p+1} - T_n^p}{\Delta t} = \frac{T_{n+1}^p + T_{n-1}^p - 2T_n^p}{(\Delta x)^2}$	ecuación 3.4
---	---------------------

Donde: F_0 es una forma de diferencia finita del número de Fourier.

$F_0 = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$	ecuación 3.5
--	---------------------

La forma explícita de la ecuación para un nodo interior n se reduce en:

$T_n^{p+1} = F_0 \cdot (T_{n+1}^p + T_{n-1}^p) + (1 + 2F_0) \cdot T_n^p$	ecuación 3.6
--	---------------------

Al decir que el criterio de estabilidad de un nodo interior unidimensional es $(1 + 2 \cdot F_0) \geq 0$, es decir el número de Fourier será menor igual que un medio ($F_0 \leq \frac{1}{2}$).

Remplazando este valor en la ecuación 3.5, la expresión a usar para calcular el intervalo de tiempo se expresa de la siguiente manera:

$\Delta t = \frac{\Delta x^2}{2\alpha}$	ecuación 3.7
---	--------------

Donde:

Δx : Intervalos de división del espesor de la pared el cual será de 2.5 cm.

α : Difusividad térmica media, que se mantendrá como un valor constante.

La difusividad térmica mide la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad para almacenar energía, esta se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$	ecuación 3.8
-------------------------------------	--------------

Donde:

K: Conductividad térmica del material

ρ : Densidad del material

C_p : Calor específico

Reemplazando los valores en la ecuación 3.8, se obtiene el siguiente resultado:

$\alpha = \frac{0.85 \text{ w/mK}}{(1512.5 \text{ Kg/m}^3)(980 \text{ J/KgK})} = 5.7 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
--

Reemplazando el valor de la difusividad térmica en la ecuación 3.7 obtenemos el intervalo de tiempo que transcurre en variar la temperatura de la pared.

$$\Delta t = \frac{(0.025m)^2}{2 * (5.7 * \frac{10^{-7}m^2}{s})} = 545.3 s$$

545.3 seg = 9 min. , para establecer la variación de la temperatura por cada hora se consideró una división de 7 segmentos.

Como se estableció al inicio de esta sección la pared se calentara en forma transversal por tal motivo se debe considerar que existe transferencia de calor por radiación y convección entre el frente llama y la pared.

Donde la pérdida de calor por radiación está dada por la siguiente expresión:

$q_{rad} = \varepsilon * \sigma * F * A_{llama} * (T_{llama}^4 - T_w^4)$	ecuación 3.9
--	---------------------

Esta ecuación proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se gana debido a la absorción de radiación.

Otra forma de expresar el intercambio neto de calor por radiación es:

$q_{rad} = h_r * A_{ext}(T_{gas} - T_w)$	ecuación 3.10
--	----------------------

Despejando la ecuación 3.9 y 3.10 se obtiene la expresión para determinar el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$h_r = \varepsilon * \sigma * F * \frac{A_{llama}}{A_{ext}} * \frac{(T_{llama}^4 - T_w^4)}{(T_{gas} - T_w)}$	ecuación 3.11
--	----------------------

Donde:

- ϵ : Propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. (0.6 emisión de la llama amarilla).
- σ : Constante de Stefan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/ m}^2 \text{ K}^4$)
- F: Factor de forma
- A_{llama} : Área de la llama, la cual depende del diámetro interno de la cámara de combustión $A_{\text{llama}} = \pi * d^2 / 4$
- A_{ext} : Área del horno, esta depende del diámetro externo de las cámara de combustión y de la longitud total del mismo $A_{\text{ext}} = 2 * \pi * D * L$
- T_{llama} : Temperatura de la llama, se asume que la temperatura de esta se mantendrá constante a lo largo de todo el proceso (1200 °C)
- T_w : Temperatura de la pared
- T_{gas} : Temperatura de gas; se asume que a lo largo del proceso tomaría el valor de la temperatura de la llama por la variación de transferencia de calor longitudinal.

Para estimar como varia energía que transmite la convección se procede la temperatura de la pared en función a la frente de llama por efecto de radiación y a calcular el término denominado longitud efectiva, la cual está en función de la conductividad térmica del material de la pared y el coeficiente de transferencia de calor total del sistema:

$h_T = h_r + h_c$	ecuación 3.12
-------------------	----------------------

Esta expresión relaciona el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r y el coeficiente de transferencia de calor por convección h_c (13 - 20 W/m² K) de la llama. Por consiguiente la ecuación de la longitud efectiva (m) es:

$L_e = \frac{k}{h_t}$	ecuación 3.13
-----------------------	----------------------

Para realizar el método gráfico de Schmidt se divide la placa en un cierto número de incrementos de distancias Δx , sea $t_{n,m}$ la temperatura a un incremento de distancia n del origen $n\Delta x$, después de “m” incrementos de tiempo $m\Delta\theta$, cuando x es constante, el cambio de temperatura con el tiempo en el plano $m\Delta x$ desde la superficie es:

$\Delta T_\theta = \frac{T_{n,m+1} - T_{n,m}}{\Delta x}$	ecuación 3.14
--	----------------------

Cuando el tiempo es una constante, la variación de la temperatura con la distancia es:

$\Delta T_x = \frac{T_{n+1,m} - T_{n,m}}{\Delta x}$	ecuación 3.15
---	----------------------

Siendo que el incremento con la distancia y el tiempo se toman de manera que:

$\alpha \frac{\Delta\theta}{\Delta x^2} = \frac{1}{2}$	ecuación 3.16
--	----------------------

Cada línea tiene una pendiente muy próxima a la gradiente de temperatura en el centro de la capa, dado que existe una diferencia de temperatura, el calor puede fluir desde un área de alta temperatura (zona de flama) a región de baja temperatura a través de una taza proporcional de la gradiente de temperatura.

En la primera capa de gradiente inicial de temperatura es

$(T_0^0 - T_1^0) / 2$, y en la segunda capa es $(T_1^0 - T_2^0) / 2$. Durante un intervalo de tiempo el calor se conduce por consiguiente desde la superficie al plano de corte seccional.

En la misma manera se puede expresar que la temperatura en algunos planos en el tiempo $(t+1) \Delta\theta$ es la media aritmética en las temperaturas en el plano de cada cara en $t\Delta\theta$ es:

$T_n^{t+1} = \frac{T_{n-1}^t + T_{n+1}^t}{2}$	ecuación 3.17
---	----------------------

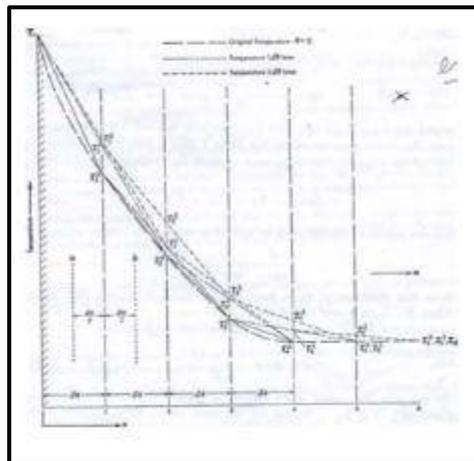


Figura 3.2 Gráfico del método de Schmidt

TIE MPO	T llama (K)	T1(K)	T2 (K)	T3(K)	T4 (K)	T5 (K)	T6 (K)	T7 (K)	T8 (K)	T9 (K)	Tam b (K)	hr	K/Ht (cm)
0	1473	303	303	303	303	303	303	303	303	303	303	1,9418	0,05
1	1473	718.06	303	303	303	303	303	303	303	303	303	2,7725	0,048
2	1473	741.88	510.53	303	303	303	303	303	303	303	303	2,807	0,048
3	1473	873	522.44	406.77	303	303	303	303	303	303	303	3,192	0,047
4	1473	888.82	639.88	412.72	354.88	303	303	303	303	303	303	3,2207	0,047
5	1473	961.95	650.77	497.38	357.86	328.94	303	303	303	303	303	3,4729	0,046
6	1473	973.16	729.67	504.32	413.16	330.43	315.97	303	303	303	303	3,4963	0,046
7	1473	1021.8	738.74	571.41	417.37	364.57	316.72	309.49	303	303	303	3,6822	0,046
8	1473	1030.1	796.59	578.06	467.99	367.04	337.03	309.86	306.24	303	303	3,7017	0,046
9	1473	1065.5	804.1	632.29	472.55	402.51	338.45	321.63	306.43	304.62	303	3,8474	0,045
10	1473	1072	848.89	638.32	517.4	405.5	362.07	322.44	313.13	304.71	303	3,8638	0,045
11	1473	1099.2	855.16	683.15	521.91	439.74	363.97	337.6	313.58	308.06	303	3,9827	0,045
12	1473	1104.4	891.17	688.54	561.44	442.94	388.67	338.77	322.83	308.29	303	3,9967	0,045
13	1473	1126.1	896.46	726.31	565.74	475.05	390.86	355.75	323.53	312.92	303	4,0963	0,045
14	1473	1130.4	926.22	731.1	600.68	478.3	415.4	357.19	334.33	313.27	303	4,1084	0,045
15	1473	1148.3	930.75	763.45	604.7	508.04	417.75	374.87	335.23	318.67	303	4,1937	0,044
16	1473	1151.8	955.87	767.72	635.75	511.22	441.45	376.49	346.77	319.11	303	4,2043	0,044
17	1473	1166.9	959.79	795.81	639.47	538.6	443.86	394.11	347.8	324.88	303	4,2783	0,044
18	1473	1169.9	981.35	799.63	667.2	541.66	466.36	395.83	359.5	325.4	303	4,2877	0,044
19	1473	1182.8	984.77	824.28	670.65	566.78	468.75	412.93	360.61	331.25	303	4,3529	0,044
20	1473	1185.4	1003.5	827.71	695.53	569.7	489.85	414.68	372.09	331.81	303	4,3613	0,044
21	1473	1196.5	1006.5	849.53	698.7	592.69	492.19	430.97	373.24	337.54	303	4,4192	0,044
22	1473	1198.8	1023	852.62	721.11	595.45	511.83	432.72	384.26	338.12	303	4,4267	0,044
23	1473	1208.6	1025.7	872.07	724.03	616.47	514.08	448.04	385.42	343.63	303	4,4787	0,044
24	1473	1210.6	1040.3	874.87	744.27	619.06	532.26	449.75	395.84	344.21	303	4,4855	0,044
25	1473	1219.2	1042.7	892.3	746.97	638.26	534.4	464.05	396.98	349.42	303	4,5324	0,044
26	1473	1221	1055.8	894.85	765.28	640.69	551.16	465.69	406.73	349.99	303	4,5385	0,044
27	1473	1228.7	1057.9	910.53	767.77	658.22	553.19	478.94	407.84	354.87	303	4,581	0,043
28	1473	1230.3	1069.6	912.84	784.37	660.48	568.58	480.51	416.9	355.42	303	4,5866	0,043
29	1473	1237.2	1071.6	926.99	786.66	676.48	570.5	492.74	417.97	359.95	303	4,6252	0,043
30	1473	1238.6	1082.1	929.11	801.74	678.58	584.61	494.23	426.35	360.48	303	4,6303	0,043
31	1473	1244.8	1083.8	941.91	803.84	693.17	586.4	505.48	427.36	364.67	303	4,6656	0,043
32	1473	1246	1093.3	943.84	817.54	695.12	599.33	506.88	435.08	365.18	303	4,6702	0,043
33	1473	1251.6	1094.9	955.44	819.48	708.43	601	517.2	436.03	369.04	303	4,7025	0,043
35	1473	1257.8	1105	967.73	833.72	722.38	614.38	527.97	444.02	373.06	303		
		0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	Cm.		

Tabla 3.4 Variación de la temperatura en función del tiempo y del incremento de distancia en la pared.

Cada intervalo de tiempo equivale a 9 min., es decir en cada 7 espacios transcurrirá una hora.

Debido a que el acero tiene un coeficiente de conductividad térmica mucho mayor que el refractario para el presente diseño se considera que la temperatura de la cara exterior del refractario sea la misma que la temperatura del lado exterior de la plancha a utilizar.

Como se puede observar en el tabla 3.4 estableciendo una temperatura constante de la flama de 1473 K (1200 °C) y una temperatura inicial de la masa del refractario sea de 303 K (30° C), en la primera hora la temperatura

interna de la pared es de 972.2 K (699,19 °C), temperatura externa 303 K (30 °C). A medida que pasa el tiempo en la quinta hora se puede observar una la temperatura interna del horno es 1209 K (936 °C) y la temperatura externa es de 365.37 K (92.37 °C), por lo cual es necesario colocar un sistema de aislamiento en la parte exterior del horno con la finalidad que cumpla con la norma requerida para su funcionamiento.

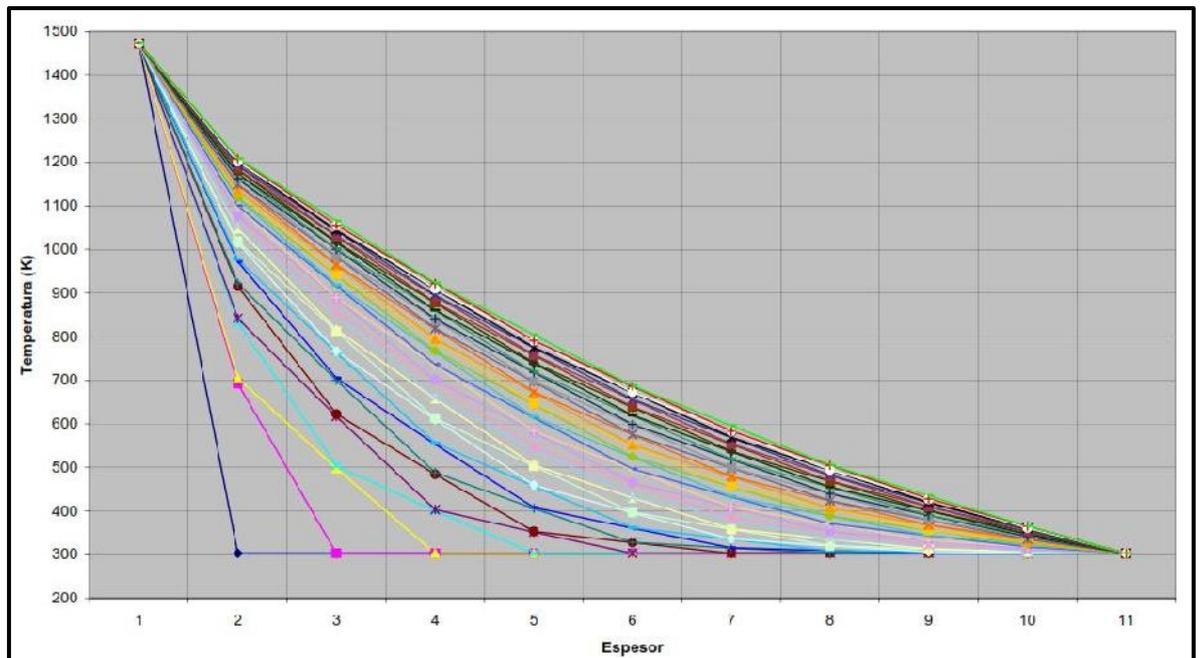


Figura 3.3 Grafica de Schmidt – Temperatura VS Espesor de la pared

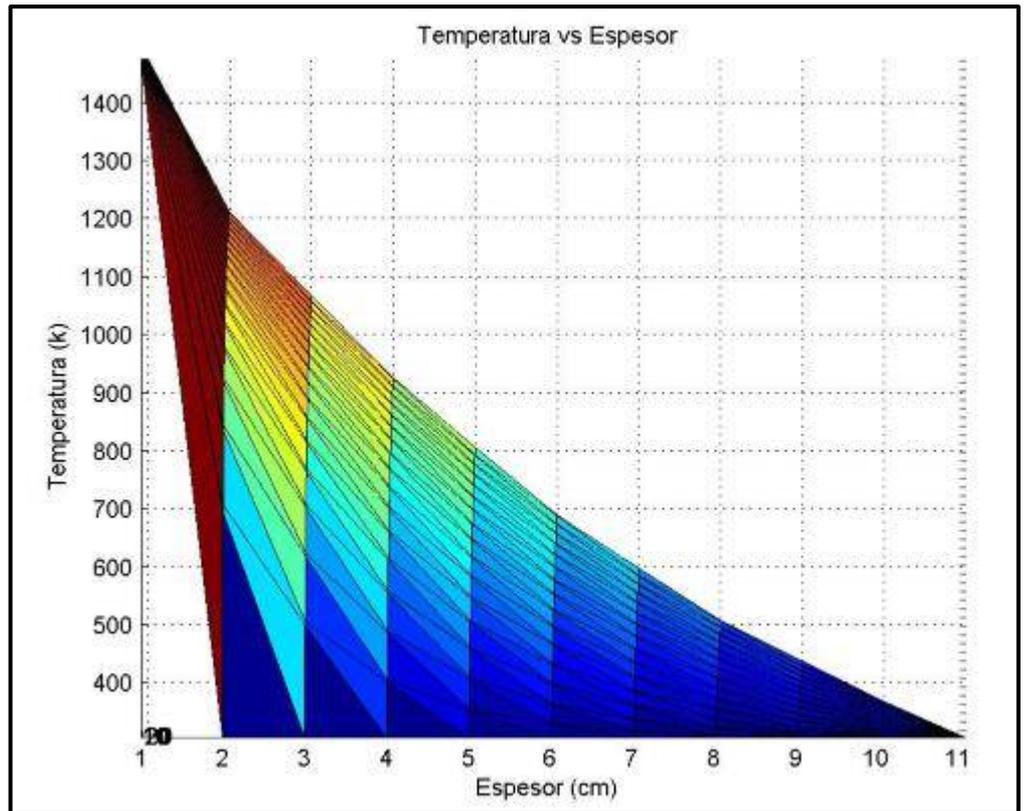


Figura 3.4 Grafica de superficie en Base al método de Schmidt

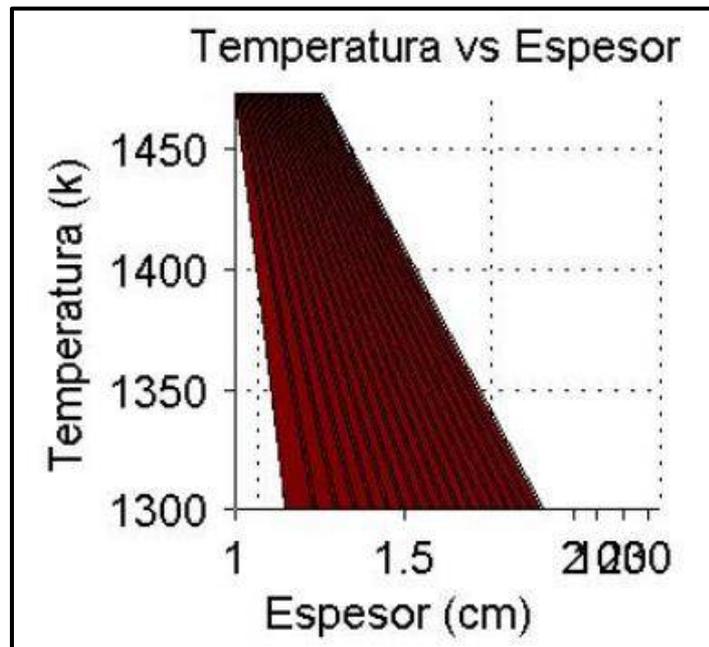


Figura 3.5 Variación de la temperatura al método de Schmidt

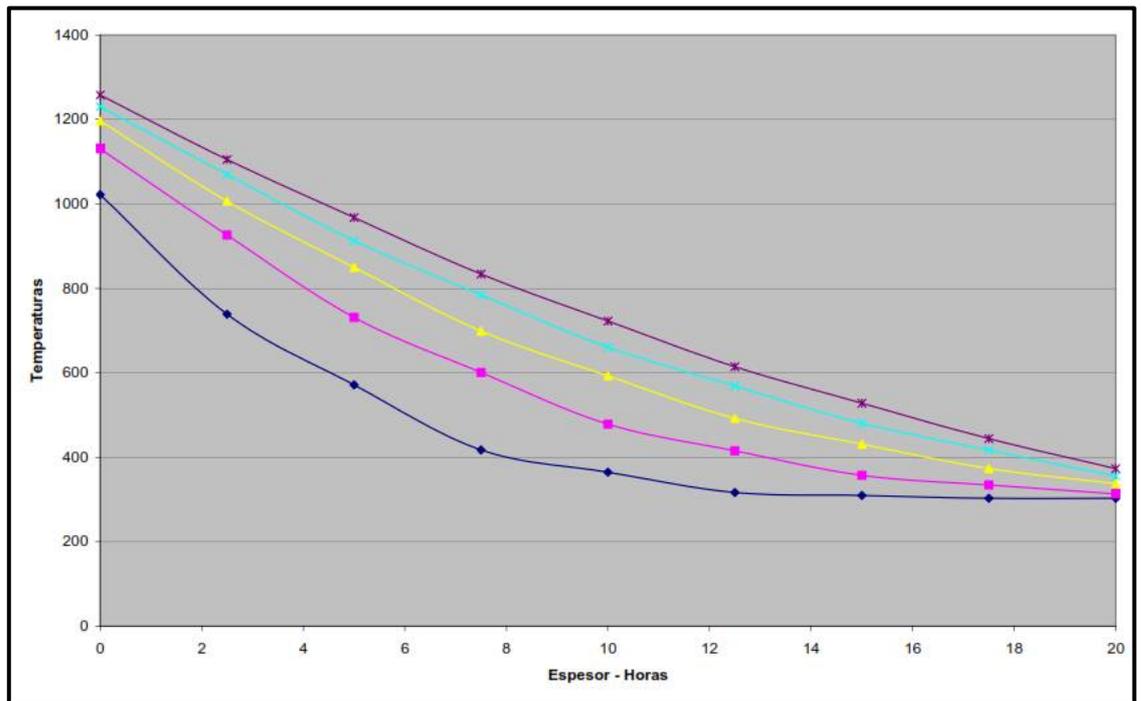


Figura 3.6 Variación de la temperatura durante las cinco primeras horas.

En la Figura 3.3 podemos apreciar diferentes curvas de distribución de temperatura con respecto al espesor del refractario y ésta a su vez varía con respecto al tiempo de una manera ascendente debido al tiempo necesario para la transferencia de calor en la cámara de combustión del horno.

A continuación se muestra los resultados de las temperaturas obtenidas en el refractario tanto en la parte interna (cara interior del refractario), el promedio del refractario (temperatura promedio de todo el refractario) y en su parte externa (cara exterior del refractario) considerando que el horno experimental trabaje durante cinco horas.

Tiempo (Horas)	Temp. Interna °C	Temp. Externa °C	Temp. Prom °C
----------------	------------------	------------------	---------------

1	748,8	30	187,46
2	857,4	40,27	297,63
3	923,5	64,57	378,54
4	957	82,42	437,77
5	984,8	100,1	480,83

Tabla 3.5 Variación de temperaturas durante las primeras 5 horas de operación del incinerador.

3.2.3 Cálculo de la Cámara de Combustión

Realizar el dimensionamiento de las cámaras de combustión se procederá a realizar un balance de energía, teniendo a consideración que a medida que varía el tiempo habrá un calentamiento longitudinal a través de las cámaras, el cual dependen del exceso de aire, los residuos cargados al incinerador (Volumen de producción, composición, humedad, y poder calorífico), tipo de combustible, volumen de la cámara, calor específico de los gases de combustión, temperatura de los gases de entrada y salida.

La temperatura de entrada en la cámara de combustión del incinerador se la ha tomado de 800°C debido a que es la energía recuperada a través de los intercambiadores de calor en el sistema térmico antes de que los gases de combustión vayan a la chimenea. La temperatura de salida previa a los intercambiadores de calor sería de 1200°C con la finalidad de que la velocidad de reacciones químicas de destrucción tenga tiempo suficiente para que se destruyan totalmente la formación de contaminantes.

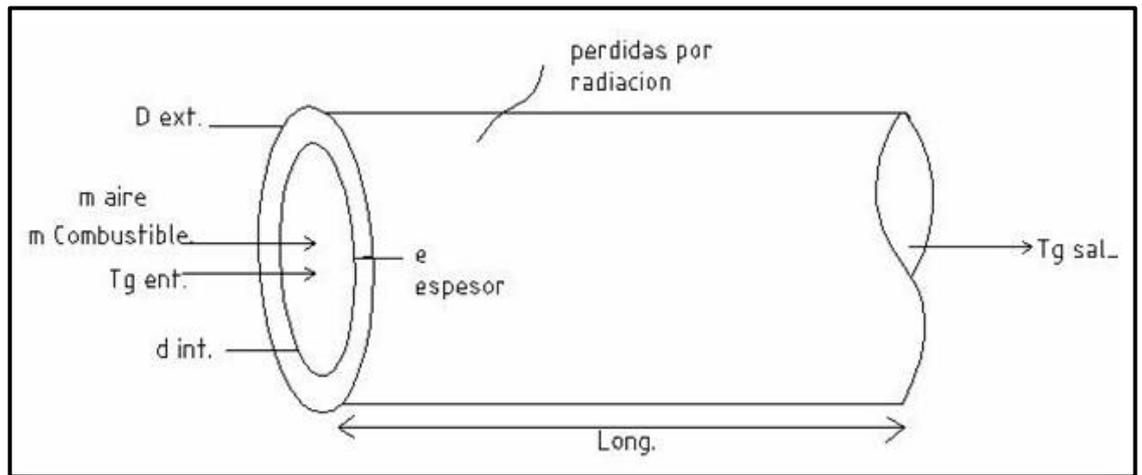


Figura 3.7 Flujos de entradas y salidas en el proceso

De la figura 3.5 se puede establecer el balance global de energía de la siguiente forma:

$E_{Fuel} + E_{Biomasa} = E_{AP} + E_{GC} + E_{GB}$	ecuación 3.18
---	----------------------

$m_{Fuel}Hv_{Fuel} + f_1m_{Biomasa}Hv_{Biomasa} = m_{paredes}CP_{paredes}\Delta T_{paredes} + 20m_{Fuel}CP_{Gases}\Delta T_{Gases} + f_1f_2m_{Biomasa}CP_{Gases}\Delta T_{Gases}$

Donde:

E_{AP}: Energía almacenada en las paredes.

E_{GC}: Energía de gases de combustión.

E_{GB}: Energía de gases de biomasa.

El factor f_1 de la ecuación anterior es el porcentaje del sólido útil que es utilizado para la incineración del desecho. El factor f_2 es el porcentaje de relación aire/biomasa utilizado.

Considerando que se utiliza mayor consumo de combustible cuando no se incinera ningún desperdicio en el horno, debido que el término $f_1m_{Biomasa}Hv_{Biomasa}$ es mucho mayor que el término $f_1f_2m_{Biomasa}Cp_{Gases}\Delta T_{Gases}$ en magnitud, por consiguiente la ecuación queda:

$m_{fuel}Hv_{fuel} = m_{paredes}CP_{paredes}\Delta T_{paredes} + 20m_{fuel}CP_{gases}\Delta T_{gases}$	ecuación 3.19
--	----------------------

$E_{fuel} = E_{total\ almacenada} + E_{gases\ de\ combustión}$	ecuación 3.20
--	----------------------

Energía Total de Almacenamiento:

Para determinar la cantidad de energía almacenada que se necesita para dimensionar correctamente la cámara de combustión es necesario considerar; las energías acumuladas en la pared, la cantidad de desechos orgánicos que se quemaran en la cámara primaria, que estos a su vez contienen una cantidad de agua que producirá pérdidas de energía.

Donde:

E_{pared}: Es la energía almacenada en la pared, y esta depende de la densidad promedio, calor específico de los materiales refractarios, Volumen total de las cámaras y la diferencia de temperatura promedio.

$E_{pared} = \rho_{pared} * V_{pared} * CP * \Delta T$	ecuación 3.21
--	----------------------

$$\rho = 1512.5 \text{ Kg/m}^3$$

$$CP = 980 \text{ J/ Kg K}$$

$V_{pared} = \frac{\pi(D_{ex}^2 - d_{in}^2) * L}{4}$	ecuación 3.22
--	----------------------

Donde:

D_{ex}: diámetro externo 1m.

d_{in}: diámetro interno 0.6m.

L: La longitud es una de las variables, que se ira probando hasta obtener el tiempo de residencia adecuado establecido por la norma específica.

E_{basura} : Es la energía producto de la quema de los desechos a incinerar este depende de la cantidad de residuos, calor latente y del poder calorífico del residuo.

$E_{basura} = m_b * f_L * P_{CFbasura}$	ecuación 3.23
---	---------------

f_L : Calor latente de la basura está considerado entre los 1000 Cal/Kg.

El dimensionamiento de las cámaras de combustión dependerá que la cantidad de residuos que se incineren, en este caso se combustionarán 20 Kg de residuo durante un determinado tiempo.

Residuos	Peso % (distribución)	Contenido másico Humedad %	Peso Húmedo Kg.	Peso Seco Kg.
Plásticos	20	2	4	3.92
Tejidos	30	10	6	5.4
Papel	10	6	2	1.88
Vidrio	10	2.8	2	1.944
Fluidos	3	40	0.6	0.36
Órganos	20	78.24	4	0.86
Inertes	5.5	5	1.1	1.045
Metal	1	3	0.2	0.194
Madera	0.5	20	0.1	0.08
TOTAL	100 %		20 Kg.	15.69 Kg

Tabla 3.6 Distribución y cálculo del peso seco para los diferentes residuos

Para obtener la cantidad de peso húmedo se utiliza la siguiente relación:

$PesoH = \frac{\%peso * Masa(Kg)}{100}$	ecuación 3.24
---	---------------

Para obtener la cantidad en (Kg) de peso seco se utiliza la

siguiente ecuación:

$PesoS = PesoH - PesoH * \%humedad$	ecuación 3.25
-------------------------------------	---------------

Residuos	Poder Calorífico (Kcal/Kg)
Plásticos	9000
Tejidos	4000
Papel	4000
Vidrio	0
Fluidos	4000
Órganos	4000
Inertes	4000
Metal	0
Madera	4000

Tabla 3.7 Poder calorífico de los residuos

El método establecido por el CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) para estimar el poder calorífico de la basura se da de la siguiente forma:

Residuos		Humedad %
a. Papel	6	$\left. \begin{array}{l} a \\ b \\ c \\ d \end{array} \right\} \frac{a+b+c+d}{100} \times 4000$
b. Trapos	5	
c. Madera	20	
d. Alimentos	78.24	
e. Plásticos	2	$\left. \begin{array}{l} e \\ f \end{array} \right\} \frac{e}{100} \times 9000$
f. Metales	3	
g. Vidrios	2.8	$\left. \begin{array}{l} f \\ g \end{array} \right\} \frac{f+g}{100} \times 0$

Por lo tanto el poder calorífico de la basura está dado de la siguiente ecuación:

$P_{CF} \left(\frac{kcal}{Kg} \right) = 40 * (a + b + c + d) + 90 * e$	ecuación 3.26
---	---------------

$$P_{CF} = 4550.8 \text{ Kcal/Kg}$$

E_{agua}: Es la cantidad de agua que pierde los residuos al ser incinerados, está dado por la cantidad de agua del desecho,

el calor latente, el calor específico del agua y la diferencia de temperatura entre la temperatura inicial y la temperatura final que el residuo se va a incinerar.

$E_{agua} = m_{agua} * C_L * CP * \Delta T$	ecuación 3.27
---	---------------

Donde:

m_{agua}: La masa de agua se obtiene de la resta de la cantidad de residuo a incinerar menos el peso en estado seco del mismo 4.3Kg.

C_L: 540 cal/Kg

C_P: 1Kcal/Kg = 4.18 KJ/Kg

A través de este procedimiento tenemos la siguiente tabla de valores para las diferentes temperaturas promedio obtenidas durante un lapso de cinco horas. La energía almacenada a partir de la segunda hora es la energía adicional necesaria para mantener la temperatura que se desea tener en la cámara de combustión.

Horas	Temp. Promedio	Energía Almacenada
(h)	(°C)	(KJ/h)
1	187.46	1981370.23
2	297.63	1854527.92
3	378.54	1776046.08
4	437.77	1717895.49
5	480.83	1674523.95

Tabla 3.8 Valores de la energía total almacenada

Consumo de Combustible:

A partir del despeje de la ecuación 3.19 podemos obtener la cantidad de combustible que se necesita para el

funcionamiento del equipo.

$m_{fuel} = \frac{E_{total\ almacenada}}{Hv - 20 * CP_{gases} * \Delta T_{gases}}$	ecuación 3.27
--	----------------------

Las propiedades de los gases de combustión se aproximarán al de las propiedades del aire, por tanto el calor específico del gas es 1.159 KJ/KgK, obtenido de la temperatura de recuperación de 800 °C.

El combustible a utilizar es el Fuel Oil N° 2, cuyas especificaciones técnicas están detalladas a continuación.

Densidad	855 Kg/m ³
Poder Calorífico	45925.66KJ/Kg
Punto de inflamabilidad	51 °C
Contenido H ₂ O	0.05 %
Cenizas	0.01 %
Calor específico	1700 J/KgK
Peso específico	0.855 – 0.876

Tabla 3.9 Propiedades de Fuel Oil N° 2

Por tanto reemplazando los datos en la ecuación 3.27 obtenemos los siguientes resultados:

Horas	Consumo de Fuel N° 2	Consumo de Fuel N° 2
--------------	-----------------------------	-----------------------------

(h)	(Kg/h)	(gal/h)
1	53.95	16.35
2	50.50	13.99
3	48.36	13.40
4	46.78	12.96
5	45.60	12.63

Tabla 3.10 Consumo de Combustible por hora

En la tabla 3.10 podemos apreciar que el consumo mayor de combustible se da en la primera hora de funcionamiento del equipo en donde tiene un consumo de 16.35 gal/hora, en cambio en la quinta hora hay que adicionar 13.82 gal para que se logre mantener la temperatura deseada en la cámara de combustión.

3.2.4 Tiempo de Residencia

Para el cálculo del tiempo de residencia de los gases de combustión se debe de entender que el tiempo de residencia es el tiempo necesario que debe tomar los gases de combustión en la cámara para que se eliminen los diferentes compuestos orgánicos que se pueden formar por la eliminación térmica de los diferentes desechos.

El tiempo de residencia esta expresada por la relación entre la longitud total del incinerador con respecto a la velocidad de los gases de salida de las cámaras de combustión.

$t_{residencia} = \frac{Longitud}{V_{gas}}$	ecuación 3.28
---	----------------------

Por lo tanto antes de calcular el tiempo de residencia necesitamos conocer la velocidad de los gases, y ella

depende del flujo de gas.

Para obtener la cantidad de flujo de gas que pasa por las cámaras de combustión partimos del consumo de combustible Fuel Oil N° 2 cuyos valores obtenidos se pueden apreciar en la tabla 3.10, estos valores se multiplican por el exceso de aire que se recomienda para producir una buena combustión (20 %).

$m_g = \dot{m}_f * 20$	ecuación 3.29
------------------------	---------------

Para el cálculo de la Velocidad de los gases se considera la correlación entre el flujo de gas, el área interna de la cámara y la densidad de los gases de las temperaturas promedios.

$V_{gas} = \frac{m_g}{\pi * D^2 * \rho_{gas} / 4}$	ecuación 3.30
--	---------------

En la siguiente tabla se muestra el flujo de gas, la velocidad del gas y el tiempo de residencia de los gases de combustión obtenidos.

Horas	Flujo de gas	Velocidad del gas	Tiempo de Residencia
h	Kg/h	m/s	S
1	1079.01	1.40	2.6
2	1009.94	1.63	2.2
3	967.20	1.78	2.0
4	935.53	1.88	1.9
5	911.91	1.94	1.9

Tabla 3.11 Tiempo de Residencia

Como se puede observar en la tabla 3.11 el tiempo de residencia en la segunda hora donde comienza la

recuperación de energía el tiempo de residencia es mayor a 2 segundo por consiguiente estamos cumpliendo las normas establecidas. A través de varias pruebas se estima la longitud total de las cámaras de incineración, el cual constara de una cámara primaria y dos cámaras secundarias de 1.2 m cada una.

Densidad de Pared	1512.5	Kg/m ³
C_p pared	0.98	KJ/KgK
D_{externo}	1	m
d_{interno}	0.6	m
Longitud Total	3.6	m
Masa refractario	2736.962	Kg
Volumen	1.809562	m ³

Tabla 3.12 Dimensionamiento de las cámaras

3.2.5 Selección de la Parrilla

Todos los incineradores tanto para desechos hospitalarios como industriales deben contar con dispositivos que permita depositar los residuos y recoger las cenizas, cabe indicar que la quema total de los residuos se da a través de un diseño correcto de la parrilla y el efecto de controlar el aire introducido en el equipo.

La parrilla deberá constar de una Plancha de acero al carbono AISI-1020 laminado en frío (límite elástico a la tensión 393 Mpa, Resistencia Máxima 469 Mpa, elongación en 2 in 15%, Dureza Brinell 131 HB), la misma deberá contara con pequeñas perforaciones con el objeto que se pueda escurrir los lixiviados.

En la cámara de post combustión (primera modular) el cual tendrá temperaturas más de 800 °C, se convendrá adaptar guías en las partes laterales del interior de la cámara, con la

finalidad de poner a movilizar la parrilla manualmente.

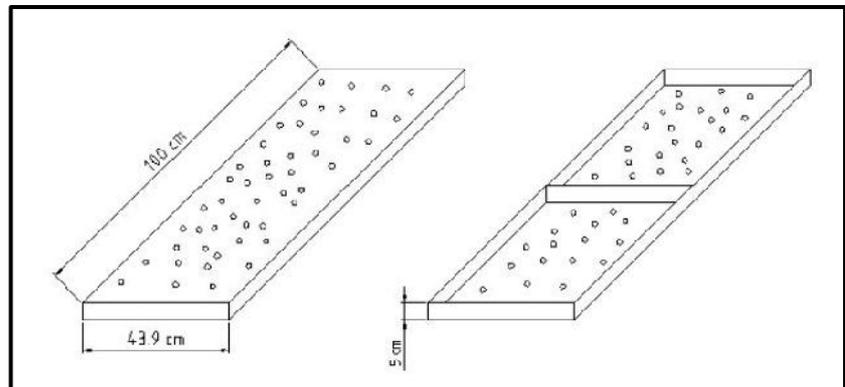
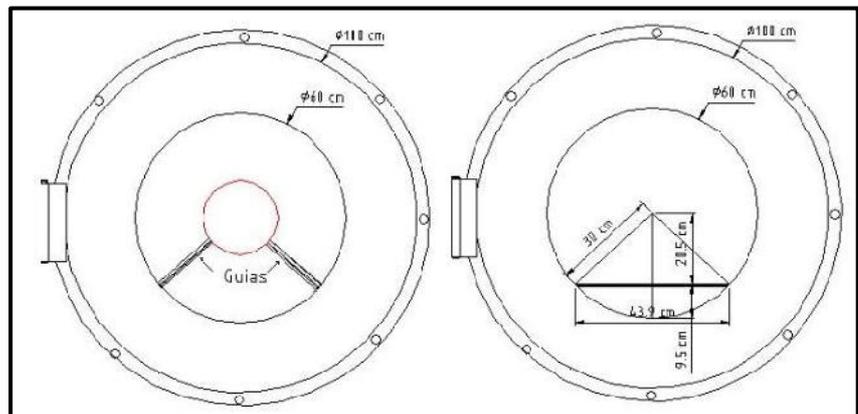


Figura 3.8 Esquema de la parrilla

Figura 3.9 Esquema de la localización de las guías y de la parrilla en el interior de la primera cámara

Colectores de Cenizas

La recolección de ceniza es un proceso importante dentro de la



incineración y constituye por lo tanto una parte esencial en un incinerador. Considerando que al tener un buen manejo en la quema de los desechos por altas temperaturas (mayores de 800 °C), es lógico que no posean ningún agente patógeno y por tanto no representan ningún riesgo para la persona que la manipula.

Uno de los requisitos para el buen funcionamiento del incinerador es que su ceniza no tenga agentes contaminantes peligrosos, de tal manera que se hace indispensable tomar muestras de las cenizas y realizar el análisis físico-químico correspondiente.

Para este tipo de incinerador se considera un sistema manual de recolección de cenizas. Este sistema necesita de un operador para su completo funcionamiento. Tiene puerta de fácil acceso para que el operador pueda remover toda la ceniza con una pala, alcanzando todos los puntos del incinerador, también se recomienda usar rociadores para una buena limpieza.

3.2.6 Selección del Quemador y Soplador

Selección de los Quemadores:

Muchos quemadores de hornos y calderas, a gas o a gasoil, producen llamas estabilizadas por rotación, como la tasa de transferencia de calor por radiación es muy superior a la convección, en particular a alta temperatura es conveniente que en la primera cámara el horno se debe trabajar con poco exceso de aire. El aire, que es forzado por un soplador, recibe un movimiento de rotación que sirve para estabilizar una zona de recirculación toroidal en el centro del vértice. El toroide de recirculación promueve la mezcla y reduce la velocidad del flujo, estabilizando la llama.

Los puntos de interés incluyen:

- Estabilidad de la llama
- Evaporación y quemado de gotas (gasoil y fuel oil)
- Mezclado de aire y combustible
- Largo de la llama
- Radiación
- Emisión de contaminantes, particularmente NO_x y humo/

hollín.

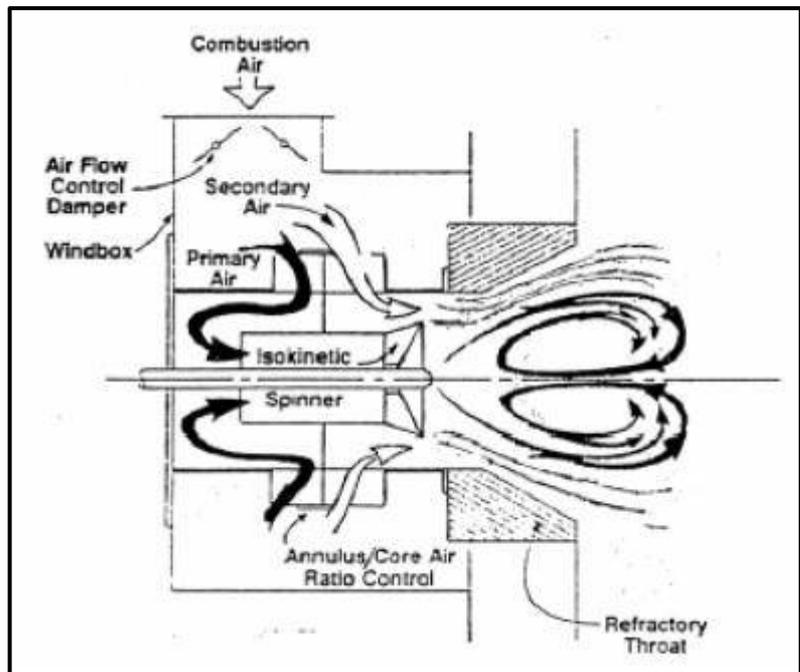


Figura 3.10 Quemador industrial con rotación y toroide de recirculación

Estos tipos de quemadores de alta velocidad tienen como principal funcionamiento de transmitir el calor de la combustión bajo la forma de chorro gaseoso de alta energía cinética. De esta forma se puede obtener un intercambio de calor por convección muy elevado y una agitación energética, de la atmósfera del recinto en donde se pretende calentar, de forma homogénea.

Realizado el balance energético de las cámaras y determinada la cantidad de combustible necesario, se seleccionan los quemadores más adecuados.

Los quemadores deberán ser colocados por encima del nivel máximo de ceniza que se acumule en la primera cámara del incinerador, así como del nivel máximo de carga que sea introducida en el mismo.

El quemador debe de contar con:

- Un dispositivo de mezcla del combustible y comburente

- Una cámara de combustión (tobera)
- Un orificio de salida de los productos de la combustión ya completada que produce el chorro (final de la tobera).

El quemador principal seleccionado para este tipo de equipo, tendrá una potencia máxima de 1981370.23 KJ/h (550.38 KW), consumo de combustible 12 - 17 GPH (44 - 54 KJ/h) ubicado en la primera cámara la primera, cuyas características técnicas esta especificadas a continuación:

Marca	OERTLI
Modelo	EM – 70 FOM
Consumo kg/h fuel oil	35 – 70
Combustible	Fuel Oil Nº 2
Potencia Kw	398 – 796
Presión de bomba (bar)	25 – 28
Pre calentador electrico (Kw)	7.4
Control	ON – OFF
Características eléctricas	115-120 V / 60Hz / 1PH
Motor	1/2 HP, 3450 r.p.m., protecciones y reset manual
Motor ventilador (Kw)	1.5
Viscosidad	20 °C a 50 °C
Ignición	10000V / 23 secundario, con transformador
Protección	Sensor electrónico de llama

Tabla 3.13 Características técnicas del quemador principal

En la cámara secundaria se necesitara un segundo quemador de menor capacidad con el objeto de aumentar la temperatura de 800 °C a 1200 °C, con esto se lograra eliminar en los gases de combustión los contaminantes que se generan por la quema de residuos hospitalarios.

Marca	WAYNE
Modelo	HS

Consumo gal/h fuel oil	0.5 – 3
Combustible	Fuel Oil Nº 2
Presión de bomba (bar)	25 – 28
Control	ON – OFF
Características eléctricas	115-120 V / 60Hz / 1PH
Motor	1/7 HP, 3450 r.p.m., protecciones y reset manual
Motor ventilador (Kw)	1.5
Viscosidad	20 °C a 50 °C
Ignición	10000V / 23 secundario, con transformador
Protección	Sensor electrónico de llama

Tabla 3.14 Características técnicas del quemador secundario

Todo quemador debe contar con los siguientes parámetros:

Control electrónico de velocidad

- Bajo nivel de ruido
- Bajo consumo energía eléctrica
- Caudal de aire óptimo

Sistema electrónico de regulación

- Puede ser programado manualmente o desde PC
- La configuración se puede salvar en un disco

Combustión con bajos niveles de contaminantes

- De acuerdo a la normativa suiza, una de las más restrictivas existentes en el mundo

Ventilador incorporado

- Quemador totalmente precableado
- Rápida puesta en marcha
- Fácil accesibilidad para mantenimiento

Carcasa de dos cuerpos

- Control de quemador incorporado mediante regulación electrónica.
- Bloque hidráulico para funcionamiento con gasóleo.

Selección de los Sopladores (Ventiladores):

Partiendo de la ecuación 3.30, donde se determinó la cantidad de flujo de gas que pasa por las cámaras de combustión este a su vez estaba relacionado con el consumo de combustible Fuel Oil Nº 2 que se necesitaría para el calentamiento y quema de los residuos (tabla 3.11).

$\dot{m}_{aire} = 1079.01 \text{ Kg/h}$

A partir de este dato se calcula el caudal de aire total:

$C_{total} = \frac{\dot{m}}{\rho_{aire}}$	ecuación 3.31
---	----------------------

Siendo la densidad del aire se toma en condiciones estándar 27 °C (300 K).

$\rho_{aire} = 1.1614 \text{ Kg/m}^3$
$C_{total} = 930.18 \text{ m}^3/h$
$C_{total} = 542.6 \text{ ft}^3/min$

Este caudal de aire debe suministrarse en la primera y segunda cámaras. En la primera cámara es necesario una condición de exceso de aire, se suministra en ésta 500 CFM y en la segunda 42 CFM. , donde los gases pasan a mayor velocidad, a fin de que exista una mejor mezcla del aire con los gases productos de la combustión de la primera cámara.

Sistema de alimentación y retorno de combustible secundario:

Antes de que los desperdicios sólidos sean introducidos en cualquier cámara del incinerador, es necesario que éstas alcancen la temperatura de operación. El calentamiento inicial se realiza utilizando un sistema de combustible secundario. Además, durante el proceso de incineración se debe mantener la temperatura de operación tanto en la primera como en la segunda cámara, para lo cual se requiere del sistema secundario de combustión.

Durante la operación del quemador se debe proveer de un tanque de uso diario de fuel Oil N°2. En el dimensionamiento de éste se debe tener en cuenta que el incinerador requerirá de un volumen para al menos dos días de funcionamiento.

$V_{td} = dias * (C_{1C} + C_{2C}) * h_{hdo} + precal_{hdo}$	ecuación 3.32
--	----------------------

Donde:

V_{td}: Volumen del tanque diario

C_{1C}: Consumo de la primera cámara

C_{2C}: Consumo de la segunda cámara

h_{hdo}: horas diarias de operación del equipo

precal_{hdo}: precalentamiento durante las horas de operación

$V_{td} = 2 * (16.35 + 3) * 5 + 74.29$
$V_{td} = 342.09 \text{ litros}$

Por cuanto la bomba de combustible de los quemadores gira a velocidad constante y el requerimiento de combustible no es constante, se debe contar con líneas de alimentación y de retorno del combustible. El sistema de alimentación y retorno de combustible se controla mediante válvulas ubicadas en la tubería de alimentación y retorno, las cuales se abrirán y cerrarán de acuerdo con las necesidades de los quemadores.

Estabilización de la Llama:

Cuando la velocidad de la mezcla fresca es mayor que la velocidad de quemado (laminar o turbulenta) la llama debe ser estabilizada, o sostenida, en algún punto corriente arriba del flujo, para obtener una llama estable. La llama puede estabilizarse en una capa límite, como ocurre en los bordes de un pico de quemador. Alternativamente la llama puede estabilizarse en una zona de recirculación, como ocurre detrás de un para llama formado por un objeto romo, o en un ensanchamiento súbito del conducto, como en el domo del tubo de llama de un combustor de turbina de gas, o en el centro de un vértice fuerte.

Para que la estabilización tenga lugar es necesario que la velocidad de quemado de la mezcla sea igual a la velocidad de la mezcla fresca en algún punto, y menor en el resto de la región. Si la velocidad de quemado excede la del flujo la llama se moverá corriente arriba, y si es menor, la llama se propagará como una llama oblicua.

La velocidad de quemado de la mezcla se reduce cuando la llama está muy cerca del borde del pico debido a la pérdida de calor y de radicales activos por la presencia de la superficie fría.

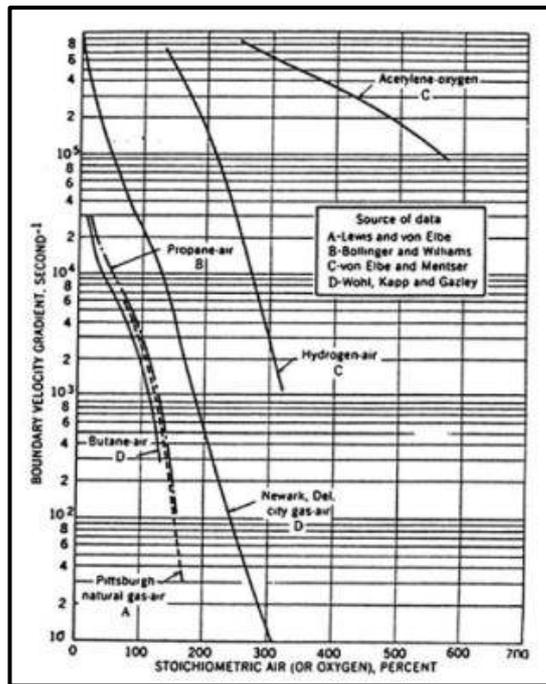


Figura 3.11 Estabilización de la llama, soplado por varios gases

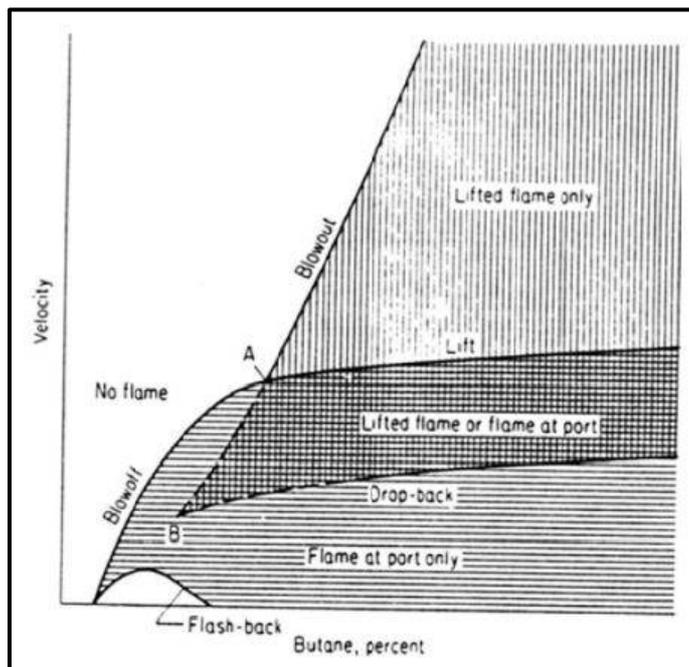


Figura 3.12 Soplado de quemadores

CAPITULO 4

4. COMBUSTIÓN Y CONTROL DE CONTAMINANTES

La combustión es la reacción de oxidación de un producto químico oxidable, liberando calor y emisiones lumínicas, la reacción se confina generalmente a una zona denominada llama donde se produce la mayor parte de las reacciones del proceso. El oxígeno molecular, generalmente se suministra como aire ambiental.

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia denominada combustible, con el oxígeno, esta mezcla de sustancia que contiene oxígeno se denomina comburente.

La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son CO_2 y H_2O , a los productos de una reacción de combustión se los denomina en forma genérica "humos".

Para la realización de los cálculos en el presente capítulo se asumió combustión completa es decir la sustancia combustible se quema al máximo grado posible de oxidación, en consecuencia no habrá CO en los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar solo N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 .

4.1 Análisis Químico del Combustible

La composición de un combustible es fundamental para poder determinar los parámetros estequiométricos característicos de la reacción de combustión. Además establece si el mismo es apto o no para el uso que se requiere, en función de la presencia de componentes que puedan ser nocivos o contaminantes.

La forma habitual de indicar la composición de un gas es como porcentaje en volumen de cada uno de sus componentes, en condiciones normales de temperatura y presión. Si se expresa este porcentaje relativo al 100% total, se obtiene la fracción molar, x_i .

Las propiedades más importantes que se caracterizan a los combustibles son:

- Composición
- Poder calorífico
- Viscosidad
- Densidad
- Limite de inflamabilidad
- Punto de inflamabilidad o temperatura de ignición
- Temperatura de combustión
- Contenido de azufre

Poder Calorífico	45926 KJ/Kg
Punto de Inflamación	51 °C
% Cenizas	0.001
% S	0.34
% H	13.3685
% C	86.2665
% H ₂ O	0.024
S.G	0.851
Densidad	855 Kg/m ³
Calor especifico	1700 J/KgK

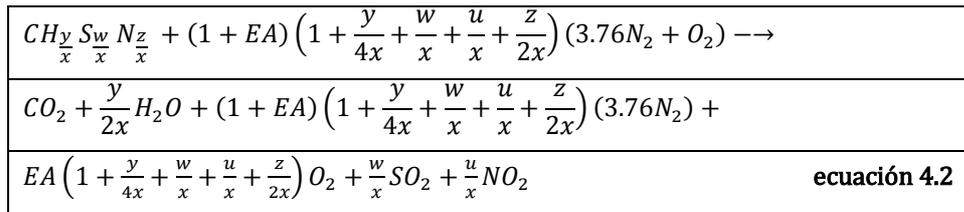
Tabla 4.1 Características técnicas de fuel Oil N° 2

Formula del Combustible:

$C\frac{H_y}{x} S\frac{w}{x} O\frac{z}{x} N\frac{u}{x}$	ecuación 4.1
---	--------------

Donde x, y, w, z, u se refiere a subíndices de número de átomos o porcentaje (ley de proporciones definidas) en la molécula. Por ejemplo CH_{y/x}, indica que se tiene y/x átomos de H por cada átomo de C.

Se procede a plantear la ecuación de combustión, de la siguiente forma:



Donde los subíndices se calculan a continuación, siendo **M** las masas de los elementos y **m** la cantidad en porcentaje que estos elementos se encuentran en el compuesto.

$\frac{y}{x} = \frac{M_{carb} * m_{Hid}}{M_{Hid} * m_{carb}}$	ecuación 4.3
---	---------------------

Reemplazando:

$\frac{y}{x} = \frac{12 * 13.39}{1 * 86.266} = 1.863$

$\frac{w}{x} = \frac{M_{carb} * m_{azuf}}{M_{azuf} * m_{carb}}$	ecuación 4.4
---	---------------------

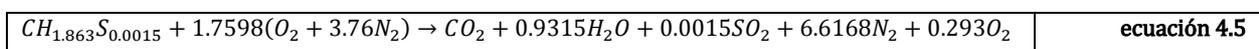
Reemplazando:

$\frac{w}{x} = \frac{12 * 0.38}{32 * 86.266} = 0.0015$
--

Siendo:

$\frac{z}{x}, \frac{u}{x} = 0$

Por motivo que el combustible (Fuel Oil N° 2) no presenta en su composición cantidad de oxígeno y nitrógeno. Considerando un exceso de aire (EA) de 20%, se obtiene la siguiente ecuación general de combustión para el Fuel Oil N° 2.



Establecidos estos valores se produce a calcular la concentración utilizando la ecuación 4.5 (moles de cada producto dividido para moles totales de los productos), en base húmeda de cada uno de los productos, y el mismo procedimiento se realiza para el cálculo de la base seca (en este caso no se considera la cantidad de agua generada en los productos).

Es decir para calcular la cantidad de humos en base humedad para el SO₂ se procede de la siguiente manera:

$$(SO_2)_{B.H} = \frac{0.0015}{1 + 0.9315 + 0.0015 + 6.6168} = 0.000167 = 0.0167\%$$

Para determinar el porcentaje de SO₂ en base seca se procede de la siguiente forma:

$$(SO_2)_{B.S} = \frac{0.0015}{1 + 0.0015 + 6.6168} = 0.000186 = 0.0186\%$$

En la siguiente tabla se muestran las concentraciones volumétricas calculadas a partir de la ecuación de combustión.

Productos	Base Seca %	Base Húmeda %
CO ₂	12.63	11.3
SO ₂	0.0186	0.0167
NO ₂	0	0
N ₂	83.639	74.83
O ₂	3.7074	3.31
H ₂ O	-	10.53

Tabla 4.2 Concentraciones en base húmeda y en base seca

Así mismo se puede determinar la masa de los productos en cada uno de los compuestos a partir de la ecuación general de Combustión (4.5), sabiendo de anterioridad los pesos establecido en la tabla periódica de cada uno de los elementos que intervienen en esta ecuación (C = 12 uma, O = 16 uma, H = 1 uma, N = 14 uma, S = 32 uma).

Productos	N _{cont}	PM _{cont} (g)	Masa del compuesto (g)
CO ₂	1	44	44
SO ₂	0.0015	64	0.096
NO ₂	0	46	0
N ₂	6.6168	28	185.27
O ₂	0.293	32	9.376
H ₂ O	0.9315	18	16.767

Tabla 4.3 Masa de los productos generados por el combustible

Donde:

N_{cont} : Número de moles del contaminante en la ecuación

PM_{cont} : Peso molecular del contaminante

Relación Aire-Combustible

Es la relación en masa entre el aire y el combustible en la mezcla; se denomina (m_a/m_f). Esta relación depende tanto de la estequiometría (la cual a su vez depende del combustible, o sea de y/x) como el exceso de aire EA. La masa de cada componente es igual al producto del número de moles por su masa molecular (gr).

Para obtener la relación aire/ combustible teórico que se genera en la ecuación de combustión partimos de la siguiente ecuación:

$(m_a)_{teorico} = \frac{m_{aire}}{m_{fuel}}$	ecuación 4.6
---	--------------

Donde **m_{aire}** es el peso molecular del aire y **m_{fuel}** será el peso molecular del combustible que se obtiene de los reactivos de la ecuación estequiométrica 4.5.

$m_{fuel} = CH_{1.863}S_{0.0015} = (12 + 1 * 1.863 + 32 * 0.0015) = 13.91 \text{ g}$
--

$m_{aire} = 1.7598(O_2 + 3.76N_2) = 1.7598(16 * 2 + 3.76 * 14 * 2) = 241.58 \text{ g}$
--

Reemplazando estos valores se obtiene $(m_{a/f})_{teórico} = 17.37$, partiendo de este resultado se puede obtener la relación aire/combustible real que se requiere para obtener una buena combustión, con un exceso de aire de 20 %.

$(m_{\bar{a}})_{real} = \left(m_{\bar{a}}\right)_{teorico} (1 + EA)$	ecuación 4.7
--	--------------

Reemplazando:

$(m_{\bar{a}})_{real} = 17.37(1 + 0.2) = 20.8$
--

En la práctica se tomara una relación de 21: 1

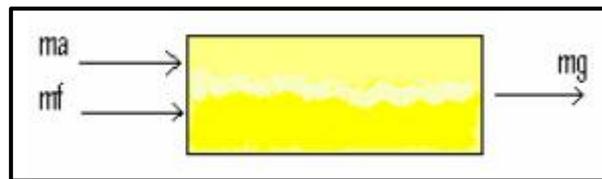


Figura 4.1 Balance de flujo masico en el sistema

Para determinar cuál es la relación de gas/ combustible generado en la salida del equipo se obtiene a través de:

$(m_{\frac{gas}{fuel}})_{real EA} = (m_{\bar{a}})_{real} + 1 = 22: 1$	ecuación 4.8
---	--------------

4.2 Emisiones de Contaminantes Productos de la Incineración

Se define como emisión a la descarga de sustancias a la atmósfera provenientes de actividades humanas.

Los parámetros utilizados para el control de emisiones a la atmósfera de instalaciones de incineración de residuos peligrosos son: metales pesados, dioxinas y furanos, monóxido de carbono, cenizas, carbono orgánico total, ácido clorhídrico, dioxina de azufre y óxidos de nitrógenos.

En la siguiente tabla se presentan a modo de guía los valores límites de emisión para incineradores de residuos peligrosos establecidos por la unión Europea.

Parámetros	Concentración	Observación
Partículas totales	10 mg /m ³	Valor medio diario
Sustancias orgánicas en estado gaseosa y vapor expresada en carbono orgánico total	10 mg /m ³	Valor medio diario
CO	50 mg/m ³	Valor medio diario
HCL	10 mg/m ³	Valor medio diario
HF	1 mg/m ³	Valor medio diario
SO ₂	50 mg/m ³	Valor medio diario
NO _x (instalaciones nuevas capacidad superior 6 ton/h)	200 mg/m ³	Valor medio diario
NO _x (instalaciones nuevas capacidad menor 6 ton/h)	400 mg/m ³	Valor medio diario
Cadmio + Talio	0.05 mg/m ³	Todos los valores medidos en un periodo de muestreo de entre 30 min y 8 horas
Mercurio	0.05 mg/m ³	Todos los valores medidos en un periodo de muestreo de entre 30 min y 8 horas
Antimonio + Arsénico + plomo + cromo + cobalto + cobre + Manganeso + Niquel + Vanadio	0.05 mg/m ³	Todos los valores medidos en un periodo de muestreo de entre 30 min y 8 horas
Dioxinas y furanos	0.1 mg/m ³	Todos los valores medidos 6 – 8 horas

Tabla 4.4 Límites de Emisiones establecido por la Unión Europea

Los resultados de las mediciones se deben referir a las siguientes condiciones: temperatura 273 K, presión 101.3 Kpa, 11% de oxígeno y gas seco.

Según la norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión, establece los límites máximos permisibles, tanto de concentraciones de contaminantes comunes, a nivel del suelo, en el aire ambiente, como de contaminantes emitidos desde fuentes fijas de combustión. Estableciendo los siguientes parámetros:

Contaminante Emitido	Combustible Utilizado	Valor	Unidades
Partículas Totales	Sólido	150	mg/Nm ³
	Líquido	150	mg/Nm ³
	Gaseoso	No aplicable	No aplicable
Oxidos de Nitrógeno	Sólido	850	mg/Nm ³
	Líquido	550	mg/Nm ³
	Gaseoso	400	mg/Nm ³
Dióxido de Azufre	Sólido	1650	mg/Nm ³
	Líquido	1650	mg/Nm ³
	Gaseoso	No aplicable	No aplicable

Tabla 4.5 Límites máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión

Se debe tener en cuenta que las emisiones pueden aparecer compuestos más tóxicos que el producto originalmente incinerado, tal es el caso de las dibenzoixinas policlorados y dibenzofuranos policlorados (dioxinas y furanos). Estos contaminantes se han transformado en el elemento más controversial para la instalación de incineradores, sin embargo es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las dioxinas y furanos son formadas en cualquier proceso de combustión, siendo más crítico si el proceso de combustión no es controlado.
- El desarrollo de la incineración y por ende la incorporación de tecnología más moderna ha incluido un sistema de enfriamiento

rápido de los gases de combustión a efectos de prevenir la generación de estos contaminantes.

- La emisión de dioxinas y furanos estar condicionada básicamente por el tipo de residuos a incinerar, el diseño del incinerador, los parámetros operativos del proceso y el sistema de tratamiento de emisiones atmosféricas con que cuente la instalación.

La disposición incorrecta de cenizas y lodos generados en el tratamiento de las emisiones gaseosas también pueden ser otra fuente de contaminación.

4.2.1 Análisis Estequiométrico de los Desechos más Combustible

Para dimensionar la cámara de combustión dependerá de la cantidad de residuos que se incineren y estos a su vez generan una cantidad de contaminantes que serán emitidos a la atmósfera.

Residuos	Peso %(distribución)	Contenido Másico Humedad%	Peso Húmedo Kg	Peso Seco Kg
Plásticos	20	2	4	3.92
Tejidos	30	10	6	5.4
Papel	10	6	2	1.88
Vidrio	10	2.8	2	1.944
Fluidos	3	40	0.6	0.36
Órganos	20	78.24	4	0.86
Inertes	5.5	5	1.1	1.045
Metal	1	3	0.2	0.194
Madera	0.5	20	0.1	0.08
Total	100%		20 Kg	15.69 Kg

Tabla 4.6 Cantidad de Masa Seca y húmeda de los residuos

Primeramente para establecer la ecuación general de combustión se dará por la mezcla entre la quema de los residuos con el combustible, por lo que es necesario obtener el porcentaje de componentes que se encuentran en cada uno de los desechos que podrán ser quemados en el incinerador. En la tabla 4.7 se podrá apreciar el porcentaje de C, H, O, CL, S, N y cenizas que están compuestos los residuos.

Partiendo del peso seco establecido en la tabla 4.6 se calcula la cantidad en Kg de los componentes de los residuos, multiplicando el peso por el porcentaje que se encuentra el componente.

Es decir:

$C \text{ del plástico} = \text{Peso seco (kg)} * \% C$

$C \text{ (kg)} = 3.92 * (70.2/100) = 2.75 \text{ Kg}$

De ahí se puede determinar los valores establecidos en la tabla 4.8 de la composición de los desechos hospitalarios en bases seca más el combustible.

De la mismo forma para determinar la cantidad de contaminantes en estado húmedo que se generan en la mezcla de los desechos y el combustible, se multiplica el porcentaje de cada elemento por el peso húmedo del residuo que se va a depositar en el incinerador, de esta forma se podrá saber la cantidad de contaminantes que se generan por la incineración de 20 Kg.

En la tabla 4.9 se podrá observar la cantidad de componentes que se generan en la mezcla general de los comburentes.

En la tabla 4.10 se apreciar la cantidad total de elementos tanto en Kg como en porcentajes que se encuentra

compuesta la mezcla (desechos hospitalarios + combustibles), obtenidos estos valores se establece la formula general de combustión y se determina la cantidad en g/s de contaminantes que serán emanados por la chimenea.

Componentes	Peso Humedo Kg	Peso Seco Kg	Componentes						
			C	H	O	CL	S	N	Cenizas
Plástico	4	3.92	70.200424	8.62593949	5.80073232	11.9502794	0.07515899	1.59953748	1.74985546
Tejido	6	5.4	48	6.3988604	40	0	0.1994302	2.1994302	3.2022792
Papel	2	1.88	43.4011718	5.80018501	44.2984891	0	0.2004317	0.29910577	6.00061671
Vidrio	2	1.944	0.50092764	0.09894867	0.40197897	0	0	0.09894867	98.899196
Fluido	0.6	0.36	66.9009826	9.59939531	5.20030234	0	0	2.00302343	16.2962963
Orgánicos	4	0.8684	48	6.40740741	37.5925926	0	0.40740741	2.59259259	5
Inertes	1.1	1.045	26.3636364	3.09090909	2	0	0.18181818	0.54545455	68.1818182
Metal	0.2	0.194	4.50171821	0.58419244	4.29553265	0	0	0.10309278	90.5154639
Madera	0.1	0.08	49.4444444	6.11111111	42.7777778	0	0	0.27777778	1.38888889

Tabla 4.7 Composición de los desechos hospitalarios (Porcentaje)

Componentes	Peso seco Kg	Componentes						
		C	H	O	CL	S	N	Cenizas
Plástico	3.92	2.75185662	0.33813683	0.22738871	0.46845095	0.00294623	0.06270187	0.06859433
Tejido	5.4	2.592	0.34553846	2.16	0	0.01076923	0.11876923	0.17292308
Papel	1.88	0.81594203	0.10904348	0.83281159	0	0.00376812	0.00562319	0.11281159
Vidrio	1.944	0.00973803	0.00192356	0.00781447	0	0	0.00192356	1.92260037
Fluido	0.36	0.24084354	0.03455782	0.01872109	0	0	0.00721088	0.05866667
Orgánicos	0.8684	0.416832	0.05564193	0.32645407	0	0.00353793	0.02251407	0.04342
Inertes	1.045	0.2755	0.0323	0.0209	0	0.0019	0.0057	0.7125
Metal	0.194	0.00873333	0.00113333	0.00833333	0	0	0.0002	0.00111111
Madera	0.08	0.03955556	0.00488889	0.03422222	0	0	0.00022222	0.00111111
Total desechos	15.6914	7.15100111	0.9231643	3.63664549	0.46845095	0.02292151	0.22486503	3.26822715
Fuel Oil	53	45.7212	7.098	0	0	0.1802	0	0.00053
Mez. Total	68.6914	52.8722011	8.0211643	3.63664549	0.46845095	0.20312151	0.22486503	3.26875715

Tabla 4.8 Composición de los desechos hospitalarios más combustible (Peso seco)

Componentes	Peso Humedo Kg	Componentes						
		C	H	O	CL	S	N	Cenizas
Plástico	4	2.80801696	0.34503758	0.23202929	0.47801118	0.00300636	0.0639815	0.06999422
Tejido	6	2.88	0.38393162	2.4	0	0.01196581	0.13196581	0.19213675
Papel	2	0.86802344	0.1160037	0.88596978	0	0.00400863	0.00598212	0.12001233
Vidrio	2	0.01001855	0.00197897	0.00803958	0	0	0.00197897	1.97798392
Fluido	0.6	0.4014059	0.05759637	0.03120181	0	0	0.01201814	0.09777778
Orgánicos	4	1.92	0.2562963	1.5037037	0	0.0162963	0.1037037	0.2
Inertes	1.1	0.29	0.034	0.022	0	0.002	0.006	0.75
Metal	0.2	0.00900344	0.00116838	0.00859107	0	0	0.00020619	0.18103093
Madera	0.1	0.04944444	0.00611111	0.04277778	0	0	0.00027778	0.00138889
Total desechos	20	9.23591272	1.20212404	5.13431301	0.47801118	0.0372771	0.32611421	3.59032482
Fuel Oil	53	45.7212	7.098	0	0	0.1802	0	0.00053
Mez. Total	73	54.9571127	8.30012404	5.13431301	0.47801118	0.2174771	0.32611421	3.59085482

Tabla 4.9 Composición de los desechos hospitalarios más combustible (Peso húmedo)

Componentes	Peso Húmedo		Peso Seco	
	Kg	%	Kg	%
Carbono	54.9571127	75.284	52.872	76.97
Hidrogeno	8.3	11.37	8.0211	11.677
Oxigeno	5.1343	7.033	3.6366	5.294
Cloro	0.478	0.6548	0.484	0.6819
Azufre	0.2147	0.2979	0.2031	0.2957
Nitrógeno	0.32611	0.4467	0.22486	0.32735
Cenizas	3.59	4.918	3.2687	4.7586

Tabla 4.10 Cantidad total de elementos generados en la mezcla de residuos más combustible

Partiendo de la tabla 4.9, donde se establece el total en la composición de los desechos hospitalarios en base húmeda. Se establece la fórmula de combustión para los residuos.

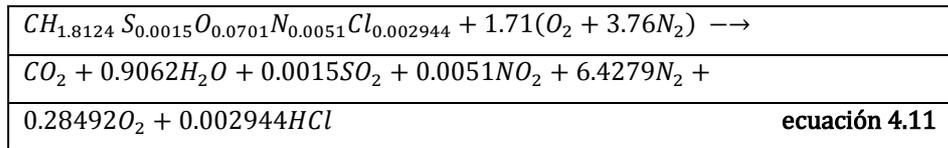
$C\frac{H_y}{x} S\frac{w}{x} O\frac{z}{x} N\frac{u}{x} Cl\frac{v}{x}$	ecuación 4.9
---	--------------

Donde x, y, w, z, u, v se refiere a subíndices de número de átomos o porcentaje (ley de proporciones definidas) en la molécula. Se procede a plantear la ecuación de combustión general, de la siguiente forma:

$C\frac{H_y}{x} S\frac{w}{x} N\frac{z}{x} Cl\frac{v}{x} + (1 + EA) \left(1 + \frac{y}{4x} + \frac{w}{x} + \frac{u}{x} + \frac{v}{x} + \frac{z}{2x} \right) (3.76N_2 + O_2) \rightarrow$	
$CO_2 + \frac{y}{2x} H_2O + (1 + EA) \left(1 + \frac{y}{4x} + \frac{w}{x} + \frac{u}{x} + \frac{v}{x} + \frac{z}{2x} \right) (3.76N_2) +$	
$EA \left(1 + \frac{y}{4x} + \frac{w}{x} + \frac{u}{x} + \frac{z}{2x} \right) O_2 + \frac{w}{x} SO_2 + \frac{u}{x} NO_2 + \frac{v}{x} HCl$	ecuación 4.10

Donde los subíndices se calculan del mismo método utilizado en la ecuación 4.3.

Considerando un exceso de aire (EA) de 20%, obtenemos la siguiente ecuación general.



A continuación se procede a calcular la concentración utilizando la ecuación 4.11. (Moles de cada producto dividido para moles totales de los productos), en base húmeda de cada uno de los productos, y el mismo procedimiento se realiza para el cálculo de la base seca. (En este caso no se considera la cantidad de agua generada en los productos)

En la siguiente tabla se muestran las concentraciones volumétricas calculadas a partir de la ecuación de combustión.

Productos	Base Seca %	Base Húmeda %
CO2	12.95	11.59
SO2	0.02	0.02
NO2	0.07	0.06
N2	83.27	74.52
O2	3.69	3.30
H2O	-	10.51

Tabla 4.11 Concentraciones en base humedad y en base seca

Así mismo modo se puede determinar la masa de los productos en cada uno de los compuestos a partir de la ecuación general de Combustión (4.11), siendo los pesos de cada elementos (C= 12 uma, O=16 uma, H=1 uma, N=14 uma, S=32 uma, Cl = 35.45).

Productos	N _{cont}	PM _{cont}	Masa del Compuesto (g)
CO2	1	44	44
SO2	0.0015	64	0.096
NO2	0.0051	46	0.2346
N2	6.4279951	28	179.956
O2	0.284928861	32	9.112
H2O	0.906216791	18	16.3116
HCL	0.002944	36.45	0.1064

Tabla 4.12 Concentraciones en base húmeda y en base seca

Donde:

- N_{cont} : Numero de moles del contaminante en la ecuación
- PM_{cont} : Peso molecular del contaminante

4.2.2 Requerimiento de Aire en Exceso:

La buena combustión requiere un poco más de aire que el estequiométrico. Esto implica que la forma útil deberá modificarse ligeramente para incluir este exceso de aire. En calculo estequiométrico se prefiere el factor de exceso de aire implica la fracción adicional de aire en relación al estequiometrico. Se denomina EA.

En la presente sección se analiza la variación del exceso de aire y como está influye en la generación de contaminantes del dióxido de carbono y oxígeno gaseoso, cabe indicar que estos valores se obtuvieron usando la ecuación 4.10 de combustión general, despejando obtenemos la cantidad de moles generadas de CO_2 y O_2 (moles del producto dividido para moles totales de los productos).

Exceso de Aire VS O_2 VS CO_2		
Exceso %	O_2	CO_2
0	0	15.7152826
10	2.02325065	14.2017951
11	2.20434637	14.0663269
12	2.38201987	13.9334187
13	2.55636723	13.8029986
14	2.727481	13.6749974

15	2.8954503	13.5493484
16	3.06036102	13.4259873
17	3.22229595	13.3048523
18	3.38133492	13.1858836
19	3.53755492	13.0690236
20	3.69103024	12.9542168
21	3.84183259	12.8414095
22	3.99003119	12.7305499
23	4.13569291	12.621588
24	4.27888232	12.5144756
25	4.41966185	12.4091658
26	4.55809181	12.3056136
27	4.69423055	12.2037754
28	4.82813449	12.1036089
29	4.9598582	12.0050733
30	5.0894545	11.9081291
31	5.21697451	11.8127381
32	5.34246775	11.7188632
33	5.46598214	11.6264686
34	5.58756412	11.5355195
35	5.7072587	11.4459823
36	5.82510948	11.3578243
37	5.94115874	11.2710139
38	6.05544748	11.1855205
39	6.16801546	11.1013143
40	6.27890124	11.0183665

41	6.38814226	10.9366491
42	6.49577484	10.8561348
43	6.60183425	10.7767973
44	6.70635472	10.698611
45	6.80936951	10.6215511
46	6.91091093	10.5455933
47	7.01101035	10.4707142
48	7.10969828	10.3968909
49	7.20700436	10.3241013
50	7.30295742	10.2523239
51	7.39758548	10.1815376
52	7.4909158	10.1117221
53	7.58297489	10.0428575
54	7.67378855	9.97492462
55	7.76338188	9.90790455
56	7.85177932	9.84177908
57	7.93900465	9.77653039
58	8.02508103	9.71214117
59	8.11003101	9.64859456
60	8.19387657	9.58587411
61	8.27663909	9.52396381
62	8.35833943	9.46284808
63	8.4389979	9.40251172
64	8.51863431	9.3429399
65	8.59726797	9.2841182
66	8.67491769	9.22603252

67	8.75160183	9.16866915
68	8.82733828	9.11201469
69	8.90214451	9.05605608
70	8.97603755	9.00078058
71	9.04903402	8.94617575
72	9.12115013	8.89222948
73	9.19240173	8.8389299
74	9.26280426	8.78626547
75	9.33237281	8.73422489
76	9.40112211	8.68279715
77	9.46906655	8.63197149
78	9.53622017	8.58173739
79	9.60259671	8.53208459
80	9.66820958	8.48300305
81	9.73307188	8.43448297
82	9.79719642	8.38651478
83	9.73307188	8.43448297
84	9.92328198	8.29219679
85	9.9852672	8.2458289
86	10.0465631	8.19997669
87	10.107181	8.15463159
88	10.1671322	8.10978524
89	10.2264276	8.06542946
90	10.285078	8.02155623
91	10.3430937	7.97815774
92	10.400485	7.93522631

93	10.4572619	7.89275445
94	10.5134344	7.85073481
95	10.5690118	7.80916022
96	10.6240038	7.76802363
97	10.6784194	7.72731816

Tabla 4.13 Porcentaje de exceso de aire con variación de O₂ y CO₂

Se observa en la tabla 4.13 que a medida que se aumenta el exceso de aire la cantidad de oxígeno gaseoso aumenta mientras que la cantidad de dióxido de carbono disminuye, en la figura 4.2 se establecen las curvas de funcionamiento del equipo, por norma es recomendable tener un exceso de aire entre 18-22 % (combustión completa) para estos tipos de hornos incineradores.

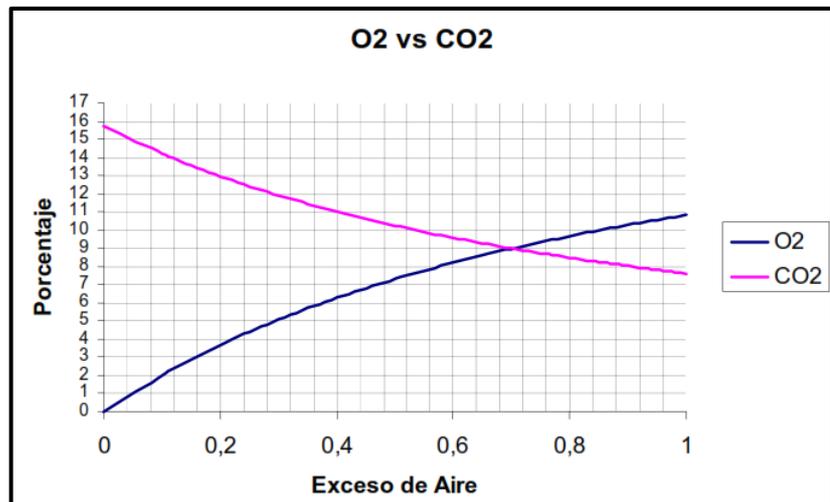


Figura 4.2 Diagrama de Ostwald

4.2.3 Tasa de Emisiones:

Según la ecuación 4.11, para establecer los valores del caudal emitido **Q** por cada uno de los contaminantes desde la

chimenea, utilizamos las relaciones estequiométricas de la ecuación de combustión a partir del consumo de combustible. Este valor puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$Q_{cont} = Q_{comb}(N_{cont})\left(\frac{PM_{cont}}{PM_{comb}}\right)$	ecuación 4.12
---	----------------------

Donde:

- N_{cont} = número de moles del contaminante en la ecuación
- PM_{cont} = peso molecular del contaminante
- PM_{comb} = peso molecular del combustible

El peso molecular del combustible se obtiene de los reactivos establecidos en la ecuación 4.11.

$PM_{comb} = CH_{1.863}S_{0.0015} = (12 + 1 * 1.863 + 32 * 0.0015) = 13.91g$
--

Q_{comb} se refiere al Consumo de combustible por hora que se requiere para que el equipo proceda a funcionar (ver Tabla 3.10), en la primera hora habrá más consumo de combustible (53 Kg/h).

Utilizando el factor de la multiplicación de $N_{cont} * PM_{cont}$ establecido en la tabla 4.10, se obtiene los siguientes valores:

Componentes	Kg/h	g/s
CO2	146.0655632	40.5737676
H2O	54.15016333	15.041712
SO2	0.315280634	0.08757795
NO2	0.822514558	0.22847627
N2	632.7465384	175.762927
O2	32.0540293	8.90389703

Tabla 4.14 Contaminantes productos de la combustión

Para determinar si la cantidad de emisiones generadas

hacia la atmósfera cumplan las normativas ambientales, se avaluara solo la cantidad de CO₂ (40.57 g/s) y SO₂ (0.087 g/s) cuya resolución se determinará en la sección 4.3.

4.3 Dimensionamiento de la Chimenea

Una chimenea es el Conducto que facilita el transporte hacia la atmósfera de los productos de combustión generados en la fuente fija.

La altura de la chimenea depende normalmente de requisitos de contaminación atmosférica por dilución de humos.

Las chimeneas se construyen de sección circular y de forma que se logre una buena difusión de los gases y que no sobrepasen en el entorno del foco emisor los niveles de calidad del aire admisibles, tendrán en cuenta, asimismo, la función de la chimenea como elemento auxiliar de la combustión, los posibles problemas de corrosión y medios para prevenirlos, así como los aspecto de tipo constructivo.

Condiciones:

- Asumiendo un diámetro de 50 cm. en la entrada de la chimenea.
- Velocidad de viento de 3 m/s.
- Temperatura de entrada en la chimenea 250 ° C.
- Temperatura ambiente 30 °C.

Se obtiene la velocidad de salida de los gases en la chimenea V_s .

Para ello se utilizará la ecuación 3.30 de la siguiente manera:

$\dot{m} = \frac{\rho * V_s * \pi * D^2}{4}$
$V_s = \frac{0.665 * (0.5)^2 * \pi}{0.2805 * 4} = 2.148 \text{ m/s}$

Para verificar el diámetro de la chimenea asumido anteriormente, debido

a que la mayoría de las chimeneas tiene secciones transversales circulares, el diámetro de la chimenea D_s puede ser calculado vía la fórmula del diámetro del conducto.

$D_s = 1.128 \left(\frac{Q_c}{u_c} \right)^{1/2}$	ecuación 4.13
--	---------------

Donde:

u_c : velocidad de salida de la chimenea

Q_c : razón de flujo volumétrico de salida

$Q_c = \frac{\dot{m}}{\rho_{250^\circ\text{C}}}$	ecuación 4.14
--	---------------

Reemplazando:

$Q_c = \frac{0.2805 \text{ Kg/s}}{0.66 \text{ Kg/m}^3} = 0.422 \text{ m}^3/\text{s}$
--

Por lo tanto:

$D_s = 1.128 \left(\frac{0.422 \text{ m}^3/\text{s}}{2.148 \text{ m/s}} \right) = 0.51 \text{ m}$
--

Por lo tanto el diámetro seleccionado es correcto.

Altura de la Chimenea:

El valor H_0 de la chimenea se hallara mediante la fórmula siguiente la cual ha sido adoptados por la legislación de diferentes países, en caso de la legislación española, las instrucciones para el cálculo de la altura de chimeneas de instalación en industrial pequeñas y medianas se

encuentra recogidas en la orden de 18 de Octubre de 1976.

$H_0 = \sqrt{A * Q * F * \frac{\sqrt[3]{\frac{n}{V * \Delta T}}}{C_{max}}}$	ecuación 4.15
---	---------------

Donde:

A: parámetros que reflejan las condiciones climatológicas del lugar, es función de la estabilidad térmica vertical media o distribución media de la temperatura.

$A = 70 * \left(\frac{(T_{max} - T_{min}) + 2 * (T_{30^{\circ}\text{C}} - T_{25^{\circ}\text{C}})}{T_{30^{\circ}\text{C}}} + \frac{80}{H_{hr}} \right)$	ecuación 4.16
--	---------------

Reemplazando:

$A = 70 * 35.79 = 2505.97$

Q: Caudal máximo de sustancias contaminantes, expresada en Kg/h (ver tabla 4.14) 146 Kg/h de CO₂.

F: Coeficientes sin dimensionamiento relacionado con la velocidad de sedimentación de las impurezas a la atmósfera. Para SO₂ y otros contaminantes gaseosos de igual tipo, cuya velocidad es prácticamente nula, se tomará **F = 1**. En caso de partículas sólidas o impurezas pesadas, se tomara **F = 2**.

n: Número de chimeneas, incluida la que es objeto de cálculo (n=1).

V: Caudal de gases emitidos, expresado en m³/h.

$\dot{m} = 0.28 \text{ m}^3/\text{s} = 1519.2 \text{ m}^3/\text{h}$

ΔT : Temperatura de los gases a la salida de la chimenea y la temperatura media anual del aire ambiental en el lugar considerado, expresado en $^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{entrada}}=250^{\circ}\text{C}$, temperatura ambiente 30°C).

C_{max} : Concentración máxima de contaminantes a nivel del suelo expresado en $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$. Se determinará como el valor de referencia de la norma de protección del ambiente atmosférico establecido por cada país (para fuente fija SO_2 $1650 \text{ mg}/\text{N m}^3$).

Si el foco emite varios contaminantes, la altura de la chimenea se calculará para cada uno de ellos, adoptándose el valor que resulte mayor.

Reemplazando los valores en la fórmula 4.15 se obtiene:

$H_0 = 5.8 \text{ m} \approx 6\text{m}$

Altura Efectiva de la Chimenea:

Los cálculos consisten básicamente en determinar la sobre elevación Δh del penacho de humos sobre la chimenea, de altura H_0 (altura real de la chimenea), al objeto de determinar la altura efectiva de la emisión sobre terreno plano:

$H = H_0 + \Delta h$	ecuación 4.17
----------------------	---------------

Para calcular la altura de la pluma Δh , se utilizará la ecuación de Briggs, donde primeramente se calcula la fuerza ascensional del flujo, F_b (Parámetro de Boyantes m^4/s^2), que viene expresado por la ecuación:

$F_b = g * V_s * D_s^2 * \left(\frac{T_s - T_a}{T_s}\right)$	ecuación 4.18
--	---------------

Donde:

Vs: Velocidad de salida de los gases (m/s)

Ds: Diámetro de la chimenea (m)

T_s: Temperatura de salida de los gases (°K)

T_a: Temperatura atmosférica (°K)

Reemplazando:

$$F_b = 9.8 \text{ m/s}^2 * 2.148 \text{ m/s} * (0.5\text{m})^2 * \left(\frac{523 - 303}{523}\right) = 2.2137$$

Conocido el grado de boyantes, se considera una **estabilidad C** para zonas rurales, en atmósfera inestable.

Si $F_b < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$ la ecuación a utilizar es:

$$\Delta h = 21.4 * \left(\frac{F_b^{3/4}}{u}\right)$$

ecuación 4.19

Donde:

U: velocidad del viento a la altura de la salida de chimenea (3m/s)

Entonces:

$$\Delta h = 12.712 \text{ m}$$

Por lo tanto la altura efectiva de la chimenea (ecuación 4.17) es:

$$H = 6 + 12.712$$

$$H = 18.712 \text{ m}$$

CAPITULO 5

5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y COSTOS

5.1 Algoritmo de Control

Fundamentos de lenguaje de programación

Para la programación del sistema de control del proceso de incineración pirolítico, se ha utilizado el software Twido Suite de Schneider Electric. Este usa el lenguaje de programación Ladder, que es un lenguaje basado en botones y bobinas.

Antes de explicar el algoritmo de control implementado se explicarán a modo de introducción las funciones y los comandos más importantes.

En primer lugar las direcciones que se usan pueden ser de 3 tipos: entradas (inputs), salidas (outputs), y memorias (memories).

Las variables de entrada son representadas de la siguiente forma: %Ia.b, donde "a" será un número entero que simboliza el equipo donde se realizara el proceso ya que puede asignarse más de un PLC al mismo programa. El "b" simboliza el número de entrada del PLC.

Un ejemplo de variable de entrada puede ser: %I0.5 en este caso lo que se está creando es una entrada en el PLC asignado con la variable 0 y dentro de ese PLC se está comprobando el estado de la entrada 5.

Cada entrada representa una variable binaria, el cual puede estar abierto (0) o cerrado (1), y son representadas con botones, los cuales pueden ser de dos tipos normalmente abierto (NO, Su valor normal es 0 y es activo en alto. Figura 5.1) y botones normalmente cerrados (NC, Su valor normal es 1 es activo en bajo. Figura 5.2)

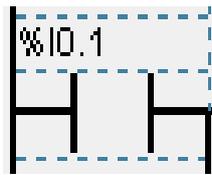


Figura 5.1. Entrada NO

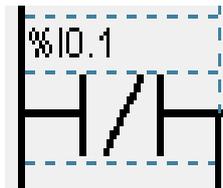


Figura 5.2. Entrada NC

En caso de utilizarse un módulo de expansión analógica se pueden tener entradas que son “palabras” de 16 bits, por ejemplo en este caso se necesitara recolectar y almacenar temperaturas y para estas se hará uso de las variables de entrada analógica en este caso al carácter se le denominara de una forma parecida que a las digitales, se denominaran %IWa.b donde “a” y “b” representan los mismos valores que en las variables de entrada digitales, solo que en este caso “b” representa la entrada usada pero de la extensión analógica.

Las variables de salida analógicas son representadas por %Qa.b donde “a” y “b” representan el equipo (PLC) donde se realiza el proceso, y la salida de la expansión asignada a dicho proceso.

Un ejemplo de variable de salida es %Q1.7 en este caso se está creando una variable de salida para el PLC asignado como 1 y la salida del PLC que será asignada es la 7.

Las salidas del PLC son binarias y son representadas por bobinas, las cuales pueden ser de 4 tipos. Si la condición anterior es verdaderas entonces:

- Las normalmente abiertas se activan cuando se activa la entrada (figura 5.3).

- Las salidas normalmente cerradas se apaga cuando se activa la entrada (figura 5.4).
- Salidas set se activan y permanecen activadas (figura 5.5).
- Salidas reset se desactivan y permanecen desactivada (figura 5.6).

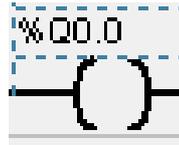


Figura 5.3 Salida NO

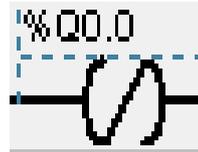


Figura 5.4 Salida NC

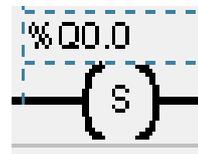


Figura 5.5 Salida SET

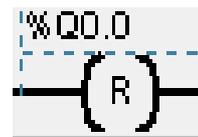


Figura 5.6 Salida RESET

Las memorias se pueden comparar a variables internas en otros lenguajes de programación y pueden ser binarias o palabras.

La nomenclatura de las primeras es de la forma: %Ma donde “a” representa el número de memoria asignado que va desde 0 hasta un número que depende del modelo del PLC.

Las palabras son de 16 bits y se utiliza la sintaxis %MWa donde “a” representa el mismo valor que en las memorias de tipo lógico.

Al ser una variable intermedia entre las variables de entrada y las de salida puede ser de cualquiera de los tipos de variables explicados anteriormente, es decir, normalmente abierto, normalmente cerrado, set y reset, según se necesita.

El lenguaje Ladder es secuencial y basado en líneas o rungs. Cada línea necesitara dos elementos principales una variable de entrada y otra de salida. Si las condiciones que dan las variables de entrada son ciertas entonces se ejecuta la salida, de otra manera no se ejecuta.

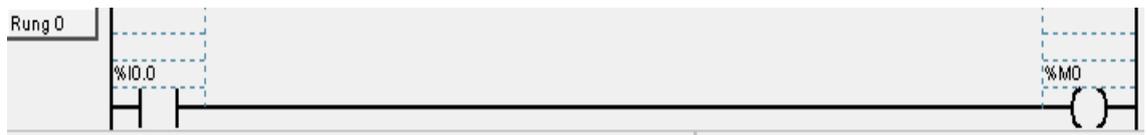


Figura 5.7 Línea de programación el Ladder

En este ejemplo, lo que se realiza es leer el estado una entrada denominada %I0.0 normalmente abierta, está activa una salida %M0 que es una memoria de tipo normalmente abierta, si se realiza una simulación a esta línea de programación, lo que se mostrara es que cuando presione el botón se activará la memoria, la cual puede ser usada posteriormente para otras funciones.

Otro elemento importante de la programación en Ladder son los Timers que tienen la función de crear intervalos de tiempo entre la activación de la entrada y la activación de la salida por ejemplo si se desea que la salida se active 5 segundos después de activar la entrada será necesario colocar un Timer en la línea de programación. Se representan por %TM seguido de un número y a estos se les puede configurar su duración y unidad de tiempo.

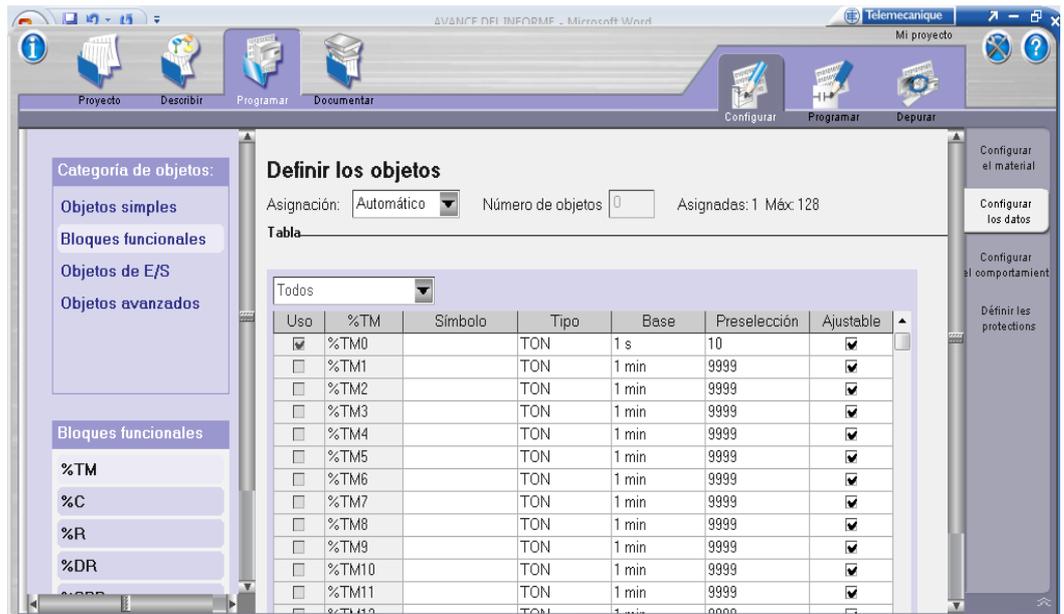


Figura 5.8: Configuración de los Timers

Los Timers son importantes en este proyecto porque muchos de los procesos de calentamiento de incineración etc. necesitan manejo de variables de tiempo.

También adicionarse salidas en paralelo (todas las activan una misma condición), entradas en paralelo (si cualquier condición se cumple entonces la salida se activa) o en entradas en serie (si todas las condiciones se cumplen entonces la salida se desactiva)

A continuación se muestra un ejemplo de una conexión la cual realiza la función de activar la regadera y finalizar la incineración cuando la variable fin de incineración se active.

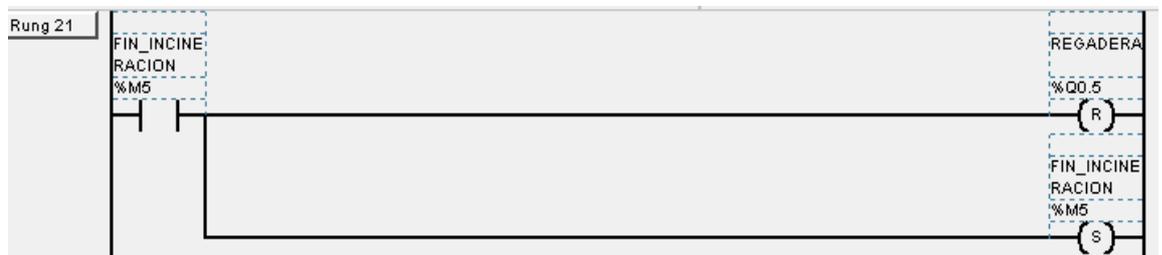


Figura 5.9 Ejemplo de salida en paralelo

Es también posible en este tipo de programación realizar saltos de línea. Para crear los saltos de línea es necesario especificar a qué

línea se dirigirá y para esto debo crear un nombre a la línea a la que se realizara el salto los nombres son del tipo: %La donde “a” representa el número de línea que se le asigna, a continuación se presenta un ejemplo de saltos de línea:

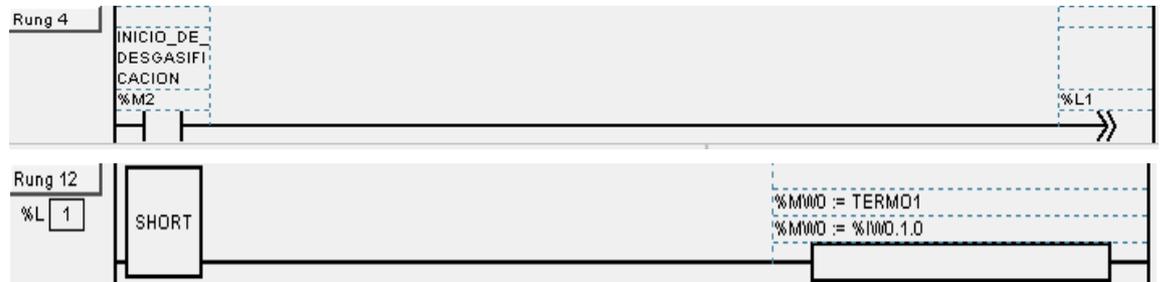


Figura 5.10 Ejemplo de salto de línea

Lo que se está realizando en el programa es hacer un salto a la línea a %L cuando el botón %M2 que realiza el inicio de desgasificación este activado, y la línea a la que se realiza el salto a la vez se encarga de recoger una variable analógica que en este caso pertenece a las temperaturas.

Para las operaciones con variables analógicas se utilizan bloques de asignación y operación.



Figura 5.11 Ejemplo de asignación

Con estas variables también se puede crear condiciones para las salidas que están programadas, por ejemplo mayores que, menores que, como por ejemplo la siguiente línea de programación.

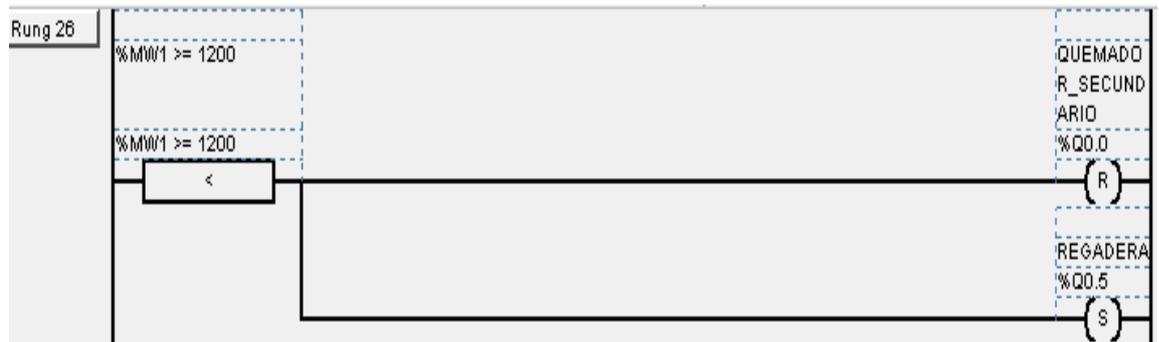


Figura 5.12 Ejemplo de condición analógica

Algoritmo de control

Se utilizarán para el sistema de control el PLC twido TWDLCAA 24DRF (14 entradas y 12 salidas) y la expansión analógica TWDALM3LT (dos entradas y una salida).

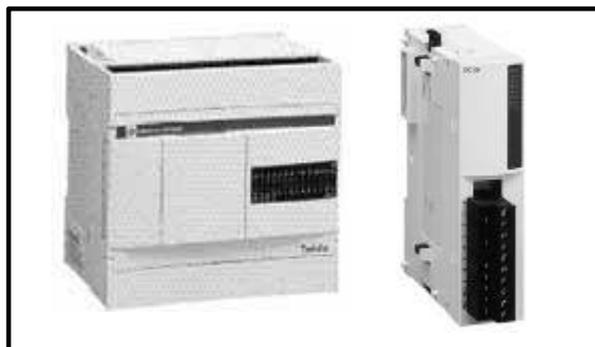


Figura 5.13 PLC y expansión analógica usados

El programa se basa en el algoritmo del proceso mostrado anteriormente. Un resumen de sus direcciones es el siguiente:

ENTRADAS:

- %I0.0 Botón de encendido.
- %I0.1 Botón de emergencia/reinicio.
- %I0.2 Botón de carga de desechos.
- %IW1.0 Lectura de la termocupla de la cámara primaria.
- %IW1.1 Lectura de la termocupla de la cámara secundaria.

Similar procedimiento se realiza con el proceso de incineración que continúa a la gasificación.

Una vez terminado ambos procesos, se enciende el ventilador (%Q0.2) y se apagan los quemadores. El proceso finaliza cuando se disminuye a temperaturas prudentes en ambas cámaras.

5.2 Visualización de Datos

La Visualización de los datos se realizó mediante una pantalla Magelis XBT-RT500. Para tales propósitos se estableció una red de comunicación de 19200 baudios y sin paridad entre esta y el PLC, mediante el protocolo MODBUS.

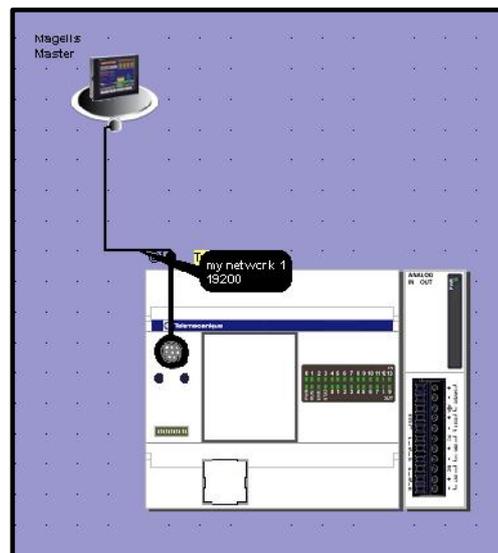


Figura 5.15 Red Twido – Magelis

El Magelis lee las variables internas (memorias) del PLC. Para el diseño presente el Magelis mostrará:

- Una pantalla de presentación.
- Información sobre la temperatura de la cámara primaria con un diagrama de tendencias.
- Información sobre la temperatura de la cámara secundaria con un diagrama de tendencias.

- Información sobre el avance del proceso incluyendo los tiempos de gasificado e incinerado restantes.
- El movimiento entre las distintas pantallas se realizará de manera táctil.



Figura 5.16 Pantalla del Magelis con información sobre la cámara primaria



Figura 5.17 Pantalla del Magelis con información sobre el proceso

5.3 Controlador PID

Cuando se enciende y apaga frecuentemente un dispositivo (especialmente aquellos que trabajan a altas temperaturas) este puede sufrir daños. Para ello en lugar de actuadores que trabajan a dos estados en este caso el modelo final de control tendrá

quemadores a gas que pueden ser controlados por una función analógica.

Un control PID busca controlar la temperatura progresivamente hasta alcanzar un punto de consigna o “set point”.

El esquema general consiste en leer la variable de proceso a ser controlada (en este caso la temperatura) compararla con el “set point”. De estos, se obtiene el error que requiere una acción sobre la variable de control (el voltaje que controla la salida del quemador).

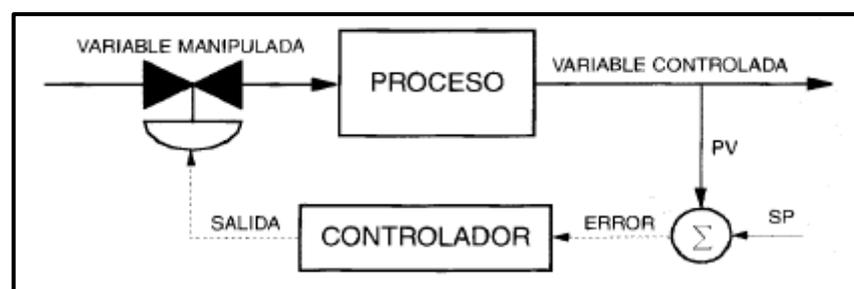


Figura 5.18: Esquema de un Proceso a lazo cerrado

El control PID es el método de control más utilizado y su nombre proviene de tres subprocesos que lo conforman: proporcional – integrativo – derivativo. Cada subproceso se comenta a continuación:

- **Proporcional:** La salida del controlador es proporcional al error.
- **Integrativo:** La salida del controlador es proporcional a la integral del error. Esto corrige la desviación siempre presente en el controlador proporcional.
- **Derivativo:** La salida del controlador es proporcional a la derivada (ritmo de cambio) del error y se anticipa a cambios futuros. Es especialmente necesario en procesos donde la variación de la variable de proceso es lenta (Por ejemplo para temperaturas).

Matemáticamente, si V es la variable de control y E es el Error:

$V = K_p \left(E + \frac{1}{t_i} \int_0^t E dt + T_d \frac{dE}{dt} \right) + M$	ecuación 5.1
--	--------------

Donde:

K_p : Es la constante de proporcionalidad

t_i : Parámetro llamado tiempo integral

t_d : Parámetro llamado tiempo diferencial

M: valor de V cuando el error es cero

Los valores de estos parámetros se ajustan de acuerdo al proceso conforme se realizan pruebas experimentales pero se sugiere (José Acedo – “Control Avanzado de Procesos”) los siguientes valores para procesos de control de temperatura:

$$K_p = 1$$

$$t_i = 8 \text{ minutos}$$

$$t_d = 24 \text{ segundos}$$

Sin embargo, el programa Twido Suite provee la opción de un auto ajuste (Auto - Tuning) del controlador PID, la cual va calculando durante el proceso los parámetros óptimos. Esta opción se recomienda especialmente para procesos que trabajen con temperaturas. Para comenzar, solo es necesario asignar un bloque de operación PID:

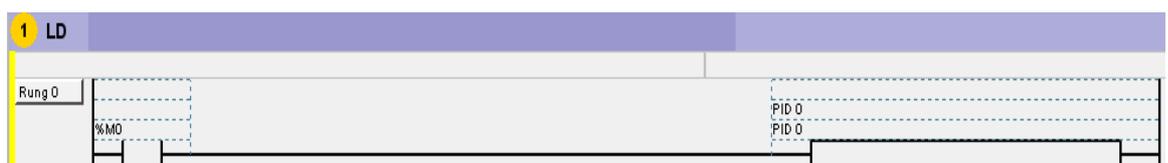


Figura 5.19 Bloque PID en Twido Suite

Luego se hace doble clic en el bloque del PID y se pasa a sus opciones de configuración: set point, límite, parámetros (en el caso de Auto-Tuning solo se colocan variable analógicas internas), entradas, salidas, etc.

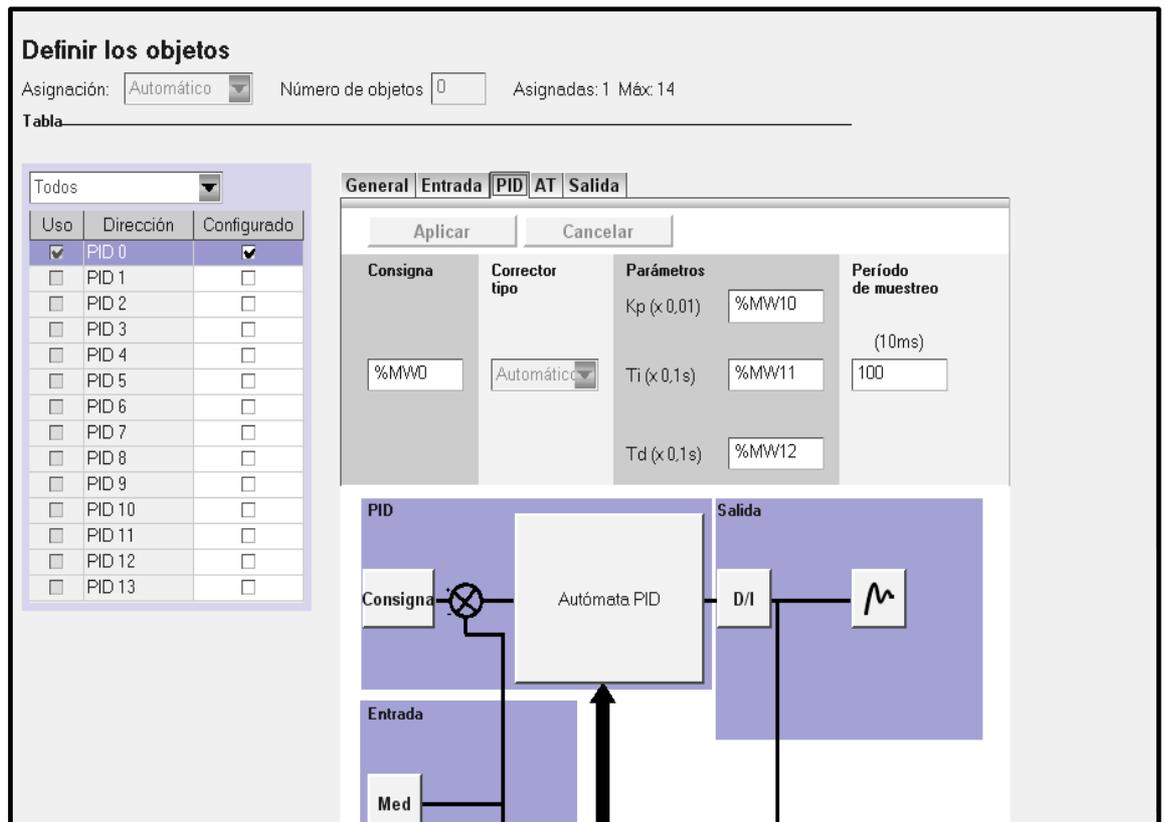


Figura 5.20 Configuración del PID

Para realizar el proceso de incineración pirolítico se tendrá que realizar una serie de pasos conjuntamente con el sistema de control a través del siguiente diagrama de flujo:

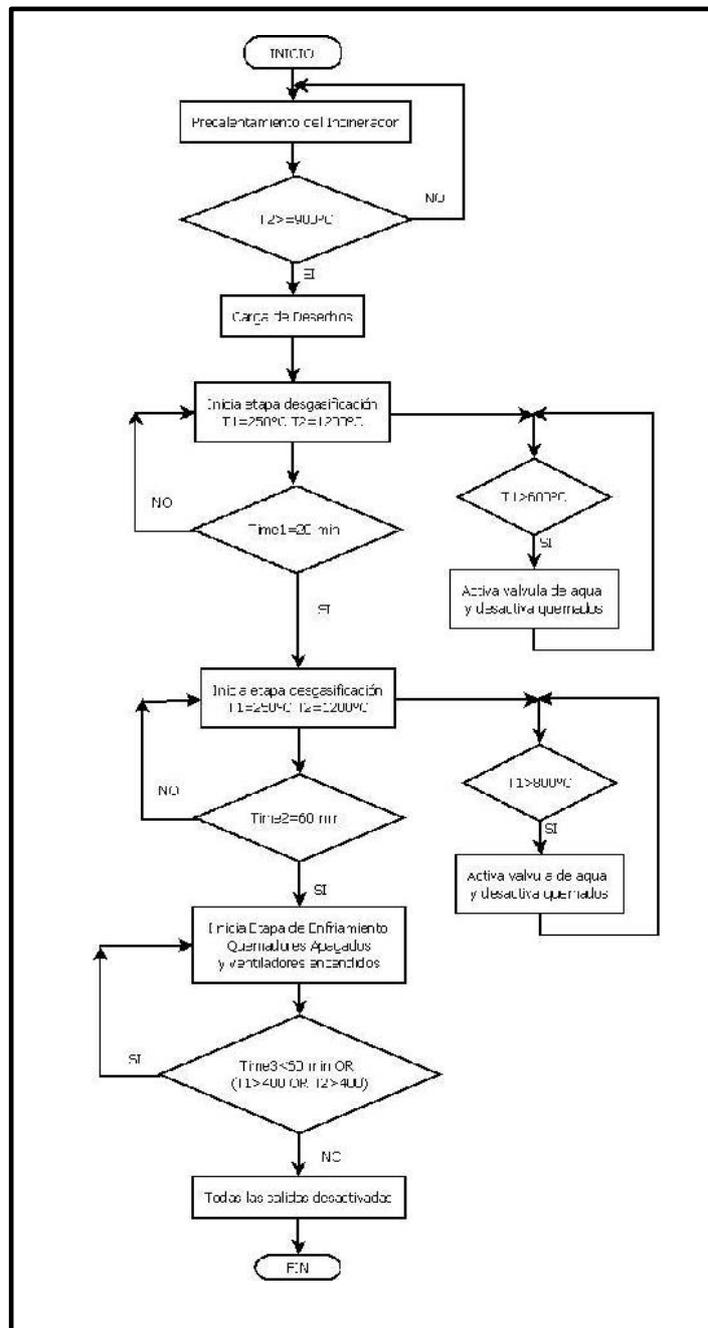


Figura 5.21 Diagrama de Flujo del proceso de combustión

5.4 Costos

5.4.1 Costos de Construcción

Costos Directos:

Son aquellos costos que pueden identificarse fácilmente en el producto terminado y representa el principal costo en la elaboración del producto.

Nº	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Quemador OESTLI EM-7, F, 35-70Fg/h	1	1290	1290
2	Quemador Wayne HS 0,5-3 gal/h	1	600	600
3	Ventilador 500 CFM	1	380	380
4	Piedra pómez (TON)	1	15	15
5	Ladrillos refractarios	1000	2	2000
6	Arena sílice (volqueta)	1	50	50
7	Cemento refractario	40	20	800
8	Plancha de acero laminado en frío 1x0,5m	1	5	5
9	Vigas UPN (1 m)	2	1,6	3,2
10	Varilla 1 " hierro	1	2,33	2,33
11	Plancha ASTM Ass 36, 5 mm (Kg.)	464,64	0,9	418,176
12	Plancha ASTM Ass 36, 8 mm (plancha)	4	180	720
13	Tubos de acero galvanizado 1" (6 m)	416	10,45	4347,2
14	Ladrillo pómez	100	0,85	85
15	Saco de cement	5	5,32	26,6
16	Plancha negra (1,2 *2,44m)	3	43,66	130,98
17	Aislante - lana de vidrio (m)	3	0,7	2,1
18	Electrodos 6011 kilogramos	60	2,34	140,4
19	electrodos7000 kilogramos	60	2,36	141,6
20	Tubería de cobre 1/2 m	33	2,04	67,32
21	Accesorios de tubería	100	0,34	34
22	PLC	1	960	960
23	Controlador Temperatura	1	900	900
24	Controlador de presión	1	740	740
25	Sistema hidráulico	1	750	750
26	Tablero de control	1	40,82	40,82
27	Pernos ½	100	0,82	82
	TOTAL (dolares)		\$	14731,726

Tabla 5.1 Materiales y Equipos Directos

DESCRIPCION	MENSUAL
Ing. Mecánico	362,4
Soldador	246,4
Ayudante del soldador	239,36
Ayudante de albañil	239,36
Albañil	242,88
Electricista	242,88
TOTAL (dolares)	1573,28
Durante 3 meses (dolares)	4719,84

Tabla 5.2 Mano de Obra

Costos Indirectos:

Son aquellos utilizados en la elaboración de un producto, pero no son fácilmente identificables y son incluidos como parte de los costos indirectos de fabricación.

DESCRIPCION	COSTOS
Transporte	700
Gastos administrativos	500
Maquinarias a utilizar	2000
Misceláneos	500
TOTAL (dolares)	3700

Tabla 5.3 Costos Indirectos

El costo total de implementación del incinerador pirolíticos de desechos médicos para su implementación en 3 meses seria:

<i>Costo Total = Costo Directo + Costo Indirecto</i> <i>+ Mano de Obra</i>
<i>Costo Total = 14731.726 + 3700 + 4719.84</i>
<i>Costo Total = 23151.566 dolares</i>

5.4.2 Costos de Operación

La incineración, tiene unos costos de operación que bordean un dólar (1\$) por kilo de desecho incinerado, valor por demás bajo considerando que no existe mantenimiento, sistemas de depuración de gases, gestión técnica de las escorias, ni monitoreo periódico de las emisiones.

Cabe indicar que se utilizaría para su operación en la primera hora 16 gal, y durante la destrucción de los residuos 65 galones (50 dólares).

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En el diseño del incinerador de desechos hospitalarios para el centro médico San Martín, se debe tomar en cuenta, el tiempo mínimo de residencia de los gases (2 segundos), pérdida mínima de calor hacia el exterior y la posibilidad de recuperación de calor.
- El diseño de la cámara de combustión de tipo cilíndrica permite lograr el efecto de pórtico auto soportante en las paredes del horno que tienen un espesor de 20cm, además de un tiempo relativamente corto de construcción.
- Para el desarrollo de mezcla de materiales refractarios, se recomienda el uso combinado de ladrillo refractario, arena sílice, piedra pómez y aislante térmico; esto permite mantener la temperatura externa del horno inferior a los 100°C después de la quinta hora, teniendo constante la temperatura interior alrededor de 1200° C.
- El dimensionamiento de la cámara de combustión está en función directa de la masa de desecho, combustible, de las paredes aislante del horno y masa de gases producidos, es importante resaltar que durante dimensionamiento se tomó en cuenta la recuperación de gases de combustión que reingresaban a la primera cámara con una temperatura aproximada 800° C después de la primera hora, este procedimiento permite disminuir el consumo de combustible por el precalentamiento de los gases.
- La utilización de diesel como combustible permite tener bajos

valores de emisión de SO₂ hacia la atmósfera por tener muy poco azufre en su composición.

- El dimensionamiento de una chimenea de 6m de altura con un diámetro interior de 0.50m permite cumplir los valores de emisión establecidos en las normativas para fuentes fijas; así mismo el desarrollo del modelo de dispersión de Gauss utilizando parámetros comunes en áreas rurales nos permite estimar que el área afectada por los gases de combustión es mínima para el de SO₂, siendo la distancia donde ocurre la mayor concentración a 180m de la fuente

6.2 Recomendaciones

- Las normativas peruanas nos establecen parámetros de control y monitoreo de incineradores por lo cual se hace necesario crear normativas para los control de los mismos, en la actualidad se utilizada como parámetros de control lo estipulado en el TULAS para fuentes de emisión fija.

BIBLIOGRAFIA

1. INCROPERA FRANK, Fundamentos de Transferencia de calor, Cuarta Edición, Editorial Prentice Hall, México, 1999, pág. 377-383,583-617.
2. MARTINEZ JAVIER MS.c; Guía para la gestión Integral de residuos Peligrosos Ficha Temática, Primera Edición , Uruguay 2005, Pag.111-119.
3. EUGENE A. AVALLONE, TEODORO BAUMUSTER LLL. Manual del ingeniero Mecánico. Ed (Mc. Graw- Hill, México ,1999). Combustibles y hornos, pp. 7.59-7.66.
4. BARRIGA (2003). Resumen de visitas técnicas a incineradores. Guayaquil-Ecuador
5. BARRIGA, A, y colectivo de autores, “Proyecto Semilla sobre Incineradores”, CICYT- ESPOL, 2005.
6. BARRIGA, A “Tecnología de la Combustión”, Notas de Curso, ESPOL. 2004.
7. GUÍA SECTORIAL DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA: Hospitales, Clínicas y Centros de Salud, CNPMLTA de Colombia, www.cnpml.org
8. VERA JUAN PABLO, “Metodología de estimación de dispersión de contaminantes y olores al aire desde chimenea industriales”, Revista FIMCP, Enero 2006, pag.5-13.
9. PERALTA JUAN, Aplicación metodología para el modelaje de la

dispersión de contaminantes a través de la ecuación de combustión.
Revista FIMCP, Enero 2006, pag.44-51.