

# **OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL  
GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS E INGENIERÍA  
AMBIENTAL

PRESENTA:

ING. GRISELDA GONZÁLEZ CARDOSO

ASESOR:

MTRO. ALFONSO ESPITIA CABRERA

MÉXICO D.F.

ENERO DEL 2003

Al Mtro. Alfonso Espitia por sus conocimientos y su asesoría, ya que sin su apoyo este trabajo de tesis no hubiera sido posible

A la Lic. Antonieta Ortega, por sus consejos y su ayuda incondicional a lo largo de este camino

A la Mtra Yolanda Falcón, la Dra. Violeta Mujica y al Dr. Alfonso García por sus acertados comentarios y observaciones en la revisión de esta tesis

A Víctor López, Víctor Ortiz y Miguel por el trabajo realizado en la fase experimental de esta tesis

Al Ing. Octavio Marín por el aporte realizado a este trabajo.

Al grupo de proyectos ambientales por la comprensión recibida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por la beca otorgada

---

En esta tesis se presenta a la incineración como un tratamiento para los residuos sólidos generados en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, por lo que el objetivo de este trabajo fue establecer las condiciones óptimas del proceso de incineración así como determinar los mecanismos de participación de las variables que participan en el mismo.

Se realizó la caracterización fisicoquímica de los residuos de la UAM-A basándose en la normatividad mexicana, la cual contempla: % de subproductos, peso volumétrico, cenizas, humedad, pH, así como la determinación del CHONPS, a su vez se determinó el poder calorífico para así poder relacionarlo con un indicador de incinerabilidad para los diferentes tipos de residuos utilizados en las pruebas.

Las pruebas de incinerabilidad se hicieron con residuos que tenían un indicador de incinerabilidad de 123, precalentando el incinerador y sin precalentarlo, variando la capacidad de entrada de aire suministrado al sistema en un 25% 50% y 75%, midiendo las temperaturas en las cámaras primaria y secundaria y midiendo las emisiones generadas (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) en la chimenea con una celda electroquímica por cada prueba.

El valor máximo de la temperatura precalentado y no precalentando el incinerador se obtuvo cuando se introdujo un ingreso de aire del 25 %, sin embargo en ninguno de los dos casos: se alcanzó una temperatura arriba de los 800 °C, concluyéndose que el poder calorífico de los residuos no pudo mantener o elevar la temperatura.

En cuanto a emisiones también se observa que a 25% de ingreso de aire se tiene mayor producción de CO y NO por lo que el ingreso óptimo fue a 50% de capacidad de suministro de aire.

---

---

Las emisiones de SO<sub>2</sub> fueron mínimas en todas las pruebas de incinerabilidad, ya que el contenido de azufre en los residuos fue del orden de 0.06 %

Otra prueba de incinerabilidad realizada fue alimentando al residuo en forma triturada, esto es 50% del volumen de los residuos fue triturado, obteniéndose que no existe variación en cuanto a las temperaturas pero si en la emisión de CO lo cual se debe a que hay mayor espacio para la circulación de aire en la cámara primaria lo que no sucedía cuando se alimentaban los residuos sin triturar.

Para observar la incidencia que tiene el indicador de incinerabilidad se realizaron pruebas con diferentes indicadores I=112, I=123, I=130, I=132, observándose que la temperatura máxima alcanzada se da con residuos que presentan el menor indicador de incinerabilidad (I=112).

En este trabajo se concluye que las emisiones se pueden reducir o incluso controlar si se establecen las condiciones óptimas de operación en residuos susceptibles de incinerarse, es decir, de aquellos que tienen un poder calorífico y pueden mantener una temperatura de combustión adecuada, propiedad que se puede describir por el indicador de incinerabilidad de un residuo, variable que es necesaria evaluar y considerar para optimizar el proceso.

---

Inside this thesis, the incineration is presented as a treatment for the solid waste generated at the Universidad Autonoma Metropolitana campus Azcapotzalco, this is why the target for this research is to settle the best condition for the incineration process, as well as establishing the role that each variable plays into this process.

We achieved the burning testing employing a waste with an incinerability index of 123, (pre-heating the incinerator and without pre-heating), varying the supply capability of incoming air to the system on percentages of 25, 50 and 75%, measuring the temperature inside the primary and secondary chambers. Measuring at the same time the emissions ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) at the stack using an electrochemical cell per probe.

The maximum temperature value, pre-heating and non pre-heating the incinerator was obtained when we supplied an amount of air equivalent to the 25% of the total capacity. However none of the cases reached a temperature over the 800 °C, concluding that the heating value from the waste could not maintain or raise the temperature.

Talking about the emissions, we also observed that when the 25% of the incoming air is supplied, the most CO and NO production was obtained, therefore the best amount of the incoming air is at the 50% of the supplying air capacity.

The  $\text{SO}_2$  emissions were minimum at all the burning testing, this is because the sulfur content of the waste was 0.06%.

We achieved another burning testing, it consists on feeding the smashed waste (the 50% of the total volume of waste was smashed), resulting on the conclusion that there is no temperature variation in this testing. However there is a variation on the CO

---

emissions ,due the bigger space which allows a better airflow inside the primary chamber, this results never been found with the non-smashed waste.

In order to observe the influence that the incinerability index has, a set of tests was achieved using different indicators I=112,I=123,I=130,I=132. Obtaining that the maximum temperature was reached employing waste with the lesser incinerability index (I=112).

In this research we have concluded that the waste burning emissions might be reduced or even controlled, if we settle down the best operation conditions for burning susceptible waste, it means all those with a heating value able to maintain the combustion temperature, this property can be described by the incinerability index for a given waste, is necessary to evaluate and consider this variable in order to optimise this process.

---

---

---

**INDICE GENERAL**

I. Introducción.....	1
I.1. Antecedentes.....	1
I.2. Justificación .....	8
II. Objetivos .....	10
II.1. Objetivos Generales.....	10
II.2. Objetivos Específicos.....	10
II.3. Hipótesis.....	10
III. Revisión del estado del arte .....	11
III. 1. Incineración.....	11
III.1.1 Combustión de sólidos .....	12
III.2. Proceso de la incineración de los residuos .....	20
III.2.1. Eficiencia de destrucción térmica .....	22
III.2.2. Temperatura y tiempo de residencia .....	23
III.2.3. Turbulencia.....	24
III.2.4. Exceso de aire.....	25
III.2.4.1. Combustible auxiliar.....	26
III.3. Consideraciones de termoquímica y termodinámica en el proceso de incineración.....	27
III.3.1 Estequiometría.....	27
III.3.2. Termoquímica.....	31
III.3.2.1. Temperatura de la flama adiabática.....	36
III.4. Características de los residuos a incinerar .....	38
III.5. Proceso para la formación de emisiones en la combustión .....	41
III.5.1. Emisiones de partículas .....	42
III.5.2. Emisiones de óxidos de nitrógeno.....	43
III.5.2.1. Factores importantes que afectan los NOx.....	47
III.5.3. Emisiones de gas ácidos .....	49
III.5.4. Monóxido de carbono y emisiones orgánicas.....	50

---

---

---

III.6. Marco Normativo.....	51
IV. Metodología .....	54
IV.1. Descripción e Instrumentación del incinerador .....	56
IV.1.1. Cámaras .....	56
IV.1.2. Parrillas .....	56
IV.1.3. Recolección de cenizas .....	58
IV.1.4. Chimenea.....	58
IV.1.5. Quemadores .....	59
IV.1.6. Controles instalados.....	60
IV.2. Caracterización fisicoquímica de residuos de la UAM.....	62
IV.2.1. Caracterización física.....	63
IV.2.2. Caracterización química.....	64
IV.2.3. Poder calorífico .....	67
IV.3. Pruebas de incinerabilidad .....	71
IV.3.1. Fases de experimentación .....	75
V. Resultados y discusión.....	79
V.1. Determinación del tiempo del quemado de los residuos; <b>Error! Marcador no definido.</b>	
V.2. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador sin precalentamiento .....	79
V.2.1. Variación de la temperatura a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado de aire .....	81
V.2.2. Variación de las emisiones a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador.....	84
V.2.2.1. Oxígeno.....	84
V.2.2.2. Monóxido de carbono .....	86
V.2.2.3. Dióxido de carbono.....	89
V.2.2.4. Dióxido de azufre.....	91
V.2.2.5. Óxidos de nitrógeno .....	92
V.3. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador con precalentamiento .....	96

---

---

V.3.1. Variación de la temperatura a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado de aire .....	98
V.3.2. Variación de las emisiones a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador y con precalentamiento del mismo .....	102
V.3.2.1. Oxígeno .....	102
V.3.2.2. Monóxido de carbono .....	103
V.3.2.3. Dióxido de carbono.....	105
V.3.2.4. Óxido de nitrógeno .....	107
V.4. Determinación de la influencia de los residuos en la incineración, reduciendo el área superficial de los mismos .....	110
V.4.1. Variación de la temperatura con 50 % de residuos molidos y 100 % de residuos enteros .....	111
V.4.2. Variación de las emisiones con 50 % de residuos molidos y 100 % de residuos enteros .....	112
V.4.2.1. Oxígeno .....	112
V.4.2.2. Monóxido de carbono .....	113
V.4.2.3. Dióxido de carbono.....	114
V.4.2.4. Oxidos de nitrógeno .....	115
V.5. Variación del Poder calorífico .....	116
V.5.1. Variación de la temperatura a diferentes indicadores de incinerabilidad .	118
V.5.2. Variación de la emisiones a diferentes indicadores de incinerabilidad.....	119
V.5.2.1. Oxígeno .....	119
V.5.2.2. Monóxido de carbono .....	120
V.5.2.3. Dióxido de carbono.....	121
V.5.2.4. Óxido de nitrógeno .....	122
VI. Conclusiones y recomendaciones.....	124
VI.1. Conclusiones generales .....	124
VI.2. Conclusiones específicas .....	125
VI.3. Recomendaciones.....	128
Referencias.....	130

---

---



---

**INDICE FIGURAS**

Figura		Pagina
I.1.	Métodos de tratamiento y disposición de residuos municipales en países de Europa Occidental	3
I.2.	Número de incineradores operando en Europa	4
I.3.	Tratamiento de los RSM en América Latina	5
I.4.	Tratamientos utilizados para el manejo de residuos sólidos en México	6
I.5.	Evolución de la infraestructura de reuso, reciclado, tratamiento, incineración y confinamiento de residuos peligrosos en México 1988-2000	6
I.6.	Incineradores autorizados para el tratamiento de residuos peligrosos en México	7
I.7.	Minimización de residuos sólidos	8
III.1.	Combustión de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos	12
III.2.	Combustión del combustible sólido	14
III.3.	Secado y calentamiento de partículas	15
III.4.	Difusión del oxígeno en la partícula carbonizada	18
III.5.	Combustión de un combustible sólido	19
III.6.	Proceso de incineración de residuos	20
III.7.	Diagrama de Sankey que muestra la distribución de la energía en un sistema de combustión	34
III.8.	Rutas alternativas para la formación de óxidos de nitrógeno en la combustión de residuos sólidos	44
III.9.	Mecanismos de formación de NO del combustible	46
IV.1.	Cámara primaria del incinerador de la UAM-A	57
IV.2.	Cámara secundaria del incinerador de la UAM-A	57
IV.3.	Cámara de recolección de cenizas del incinerador de la UAM-A	58
IV.4.	Chimenea con sus puertos de muestreo	59
IV.5.	Quemadores de la cámara primaria y cámara secundaria	60
IV.6.	Instrumentación del incinerador de la UAM-A	62
IV.7.	Placas de control de ingreso de aire a las cámaras primaria y secundaria	73
IV.8.	Dispositivo de control de ingreso de aire en los quemadores	74
V.1.	Gráfica de variación de la temperatura en la primera cámara a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	83
V.2.	Gráfica de variación de la temperatura en la segunda cámara a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	84
V.3.	Gráfica de la emisión de O <sub>2</sub> a diferentes temperaturas en la segunda cámara y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	86

---



---

---

V.4.	Gráfica de la producción de CO a diferentes temperaturas en la segunda cámara y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	89
V.5.	Gráfica de la producción de CO <sub>2</sub> a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	91
V.6.	Gráfica de la producción de SO <sub>2</sub> a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	92
V.7.	Gráfica de la producción de NO a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	95
V.8.	Gráfica de variación de la temperatura en la primera cámara con precalentamiento a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	100
V.9.	Gráfica de variación de la temperatura en la segunda cámara con precalentamiento a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	101
V.10	Gráfica de la emisión de O <sub>2</sub> con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador	103
V.11	Gráfica de la producción de CO con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador.	105
V.12	Gráfica de la producción de CO <sub>2</sub> con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador.	107
V.13	Gráfica de la producción de NO con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador.	109
V.14.	Gráfica de la variación de la temperatura cuando se alimenta al incinerador con residuos 100 % enteros y 50% molidos –50 % enteros	111
V.15	Gráfica de la variación de la emisión de O <sub>2</sub> cuando se alimenta al incinerador con residuos 100% enteros y 50% molidos –50 % enteros	112
V.16	Gráfica de la variación de la producción de CO cuando se alimenta al incinerador con los residuos 100 % enteros y residuos 50% molidos –50 % enteros	113
V.17	Gráfica de la variación de la producción de CO <sub>2</sub> cuando se alimenta al incinerador los residuos enteros y residuos 50% molidos –50 % enteros	114
V.18.	Gráfica de la variación de la producción de NO cuando se alimenta al incinerador con los residuos enteros y residuos 50% molidos –50 % enteros	115

---

V.19.	Gráfica de la variación de la temperatura a diferentes indicadores de incinerabilidad	118
V.20.	Gráfica de la variación de la emisión de O <sub>2</sub> a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire y con precalentamiento del incinerador	119
V.21.	Gráfica de la variación de la producción de CO a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire, con precalentamiento del incinerador	120
V.22.	Gráfica de la variación de la producción de CO <sub>2</sub> a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire con precalentamiento del incinerador	121
V.23.	Gráfica de la variación de la producción de NO a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire con precalentamiento del incinerador	122

## INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
III.1. Indicadores de incinerabilidad	41
III.2. Límites máximos permisibles de emisiones provenientes de la incineración	51
III.3. Límites máximos permisibles en Europa	53
IV.1. Subproductos de los residuos de la UAM-A	63
IV.2. Normatividad empleada para la caracterización química de los residuos	64
IV.3. Resultados obtenidos de la caracterización de los residuos de la UAM-A	64
IV.4. Incinerabilidad de subproductos obtenidos de la UAM-A	68
IV.5. Poder calorífico de la mezcla de los residuos de la UAM-A	66
IV.6. Indicador de incinerabilidad de diferentes mezclas de subproductos	70
IV.7. Indicador de Incinerabilidad	72
IV.8. Pruebas de incinerabilidad para determinar la condición óptima de entrada de aire al incinerador y sin precalentamiento	76
IV.9. Pruebas de incinerabilidad para determinar la condición óptima de entrada de aire al incinerador y con precalentamiento	77
IV.10. Pruebas de incinerabilidad para determinar la influencia en la incineración del indicador de incinerabilidad de los residuos	78
V.1. Tiempo de quemado de los residuos de la UAM-A	79
V.2. Resultados de la prueba de incinerabilidad a 75 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador	80
V.3. Resultados de la prueba de incinerabilidad a 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador	80
V.4. Resultados de la prueba de incinerabilidad a 25 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador	81
V.5. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación de los datos de temperatura de la cámara primaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	82
V.6. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación de los datos de temperatura de la cámara secundaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	82
V.7. Ecuaciones de ajuste y coeficientes a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la emisión de oxígeno	85
V.8. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la producción de monóxido de carbono	87
V.9. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la producción del dióxido de carbono	90

---

V.10.	Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la producción de óxido de nitrógeno	93
V.11.	Resultados de la prueba de incinerabilidad con precalentamiento del incinerador a 75 % de la capacidad de entrada de aire suministrado	96
V.12.	Resultados de la prueba de incinerabilidad con precalentamiento del incinerador a 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado	97
V.13.	Resultados de la prueba de incinerabilidad con precalentamiento del incinerador a 25 % de la capacidad de entrada de aire suministrado	97
V.14.	Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación de las temperaturas obtenida en la cámara primaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	98
V.15.	Ecuaciones de ajuste y coeficientes de las temperaturas de la cámara secundaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	99
V.16.	Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la emisión de oxígeno con precalentamiento a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	102
V.17.	Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la producción de monóxido de carbono con precalentamiento a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	104
V.18.	Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la producción del dióxido de carbono con precalentamiento a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	106
V.19.	Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la producción de óxido de nitrógeno con precalentamiento del incinerador a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador	108
V.20.	Resultados de prueba de incinerabilidad a 50 % de capacidad de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador con 50% de residuos molidos y 50% de residuos enteros	110
V.21.	Indicadores de incinerabilidad de los residuos	116
V.22.	Resultados de prueba de incinerabilidad con I = 132, a 50 % de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador	116
V.23.	Resultados de prueba de incinerabilidad con I = 130, a 50 % de capacidad de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador	117
V.24.	Resultados de prueba de incinerabilidad con I = 112 a 50 % de capacidad de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador	117

I. Introducción .....	1
I.1. Antecedentes .....	1
I.2. Justificación .....	8

## **I. Introducción**

### **I.1. Antecedentes**

Los residuos sólidos municipales (RSM) son aquellos que provienen de casas habitación, sitios de servicios privados y públicos, demoliciones, construcciones, y establecimientos comerciales (SEDESOL,1994). En México, se estima que en el año de 1995 donde se generaron 30.51 millones de toneladas. (INE, 1999)

Adicionalmente se reporta un incremento cada vez mayor en la generación de estos residuos en México, más allá de la capacidad de asimilación de los ecosistemas y la capacidad instalada para su manejo, lo que ha propiciado la proliferación de tiraderos a cielo abierto, produciendo riesgos a la salud de la población, a los ecosistemas y a la calidad de vida.

El crecimiento de la actividad industrial también ha sido acompañado de un incremento en la generación de residuos peligrosos, que ante la falta de capacidad para un manejo apropiado, ha provocado graves riesgos a la salud de la población y de los ecosistemas, una estimación de la generación de los residuos peligrosos en México reportados en los manifiestos de generación de 27,280 empresas recibidos por el INE en los años de 1988 al 1999 arroja un total de 3,705,846.21 ton/año (INE, 1999)

Los residuos peligrosos son "todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente." (LGEEPA, 1988).

Un gran volumen de residuos peligrosos se disponen clandestinamente, de los cuales el 90% de los residuos son líquidos, acuosos o semilíquidos que se mezclan con aguas

residuales, contaminando las aguas superficiales o filtrándose en el suelo, alcanzando los mantos freáticos. (SEMARNAP,1996)

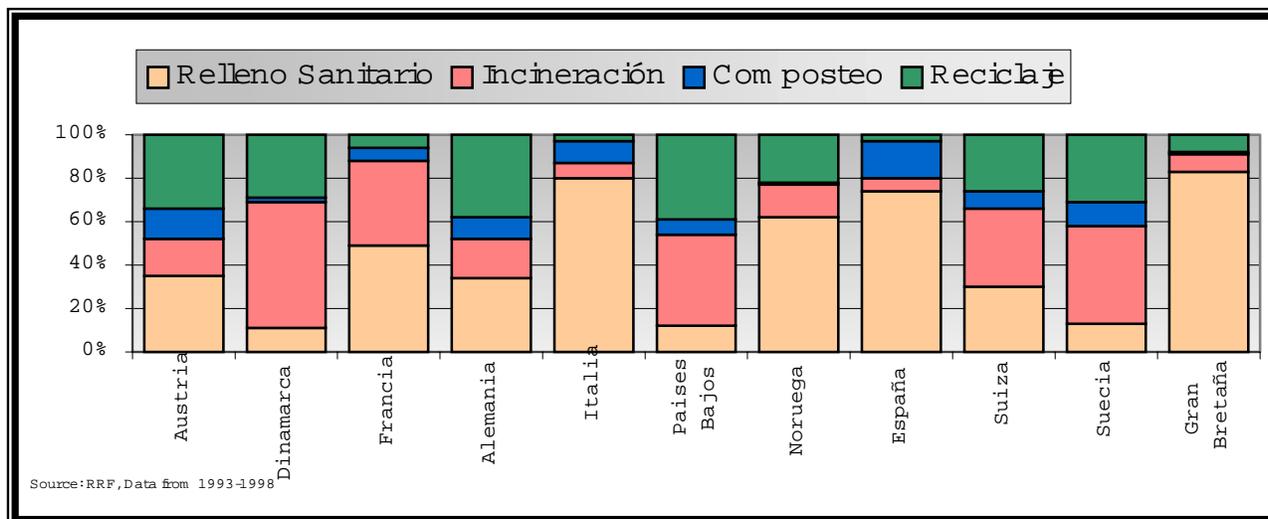
Del total generado una pequeña proporción es transportado, reciclado, destruido o confinado en condiciones técnicas y ambientales satisfactorias. Las razones para este panorama son diversas, pero la mayor parte de ellas tienen que ver con ciertas condiciones institucionales que han impedido el desarrollo de sistemas de manejo, mercados, esquemas de concertación, información y regulación.

De ahí que se requiere encontrar alternativas de disposición, en donde la incineración puede ser una opción segura para el manejo de los residuos municipales y de los residuos peligrosos.(DEFRA, 2002)

La incineración se define como la destrucción de residuos sólidos, líquidos o gaseosos a través de la aplicación de calor dentro de un sistema de combustión controlado. Cuyos propósitos son la reducción de volumen de los residuos y la peligrosidad del residuo. (Ares *et al.*,2002 )

El mejor método para lograr un manejo adecuado de residuos es la prevención de los mismos seguido por el reciclaje, métodos de tratamiento para reducir su peligrosidad, (es donde entra la incineración) y por último el confinamiento. En particular en Europa sigue dominando la disposición de residuos en rellenos sanitarios, el cual en muchos casos es el método más barato, no obstante el uso de la incineración es un método que se ha incrementado. (Beard *et al.*, 1980)

En la figura I.1. se muestra el uso de la incineración en Europa comparado con otros métodos de tratamiento, los datos son de 1996 a excepción de Alemania (1993), Finlandia y Suecia (1994) , Francia e Inglaterra (1995) y Gran Bretaña (2000). (Eurostat, 2000)

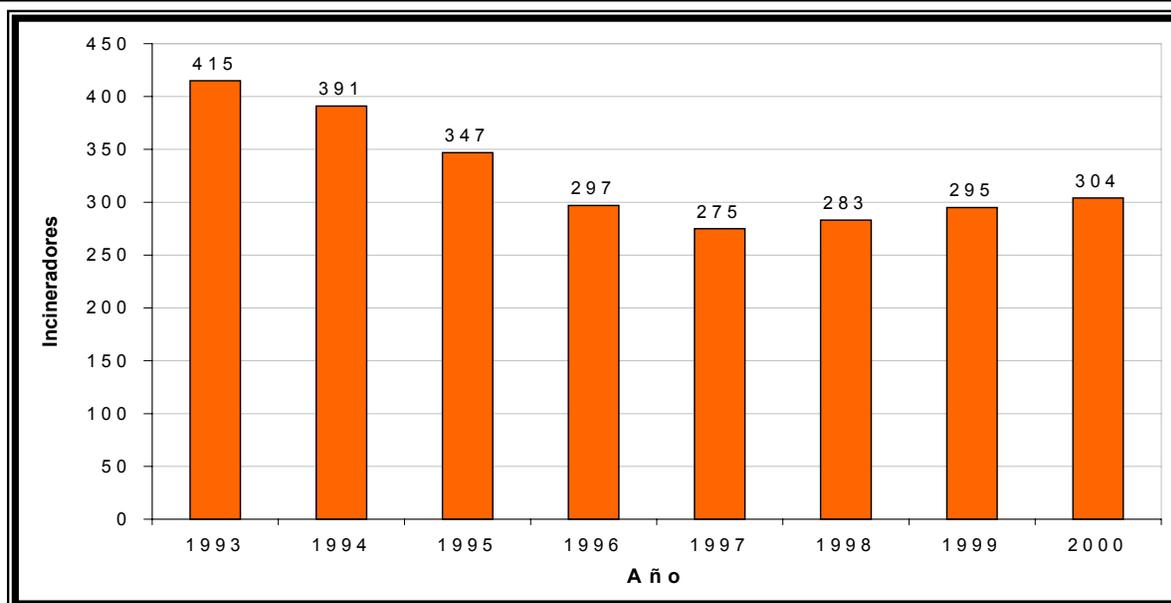


Fuente: Waste Generated in Europe 1985-1997, Eurostat (2002)

Figura I.1. Métodos de tratamiento y disposición de residuos municipales en países de Europa Occidental

La ASSURE (Association for the Sustainable Use and Recovery of Resources in Europe) cuenta con una base de datos sobre la tendencia del manejo de los residuos en los países Europeos donde se observa un incremento significativo del reciclaje y la incineración. Lo anterior se debe a que la disponibilidad de sitios para rellenos sanitarios se ha reducido considerablemente, por lo que la incineración de residuos con recuperación de energía está siendo una opción importante comparada con los rellenos sanitarios en Europa.

La ASSURE tiene contabilizados el número de incineradores por país tal y como se muestra en la figura I.2, siendo un total de 304 instalaciones de incineración en 18 países con 50.2 millones de toneladas de capacidad de tratamiento por año con 49.6 TWH de energía recuperada. Observándose un descenso en el año de 1996, lo cual se debió al cambio de instalaciones de incineradores de pequeñas a grandes instalaciones. (ASSURE, 2000)



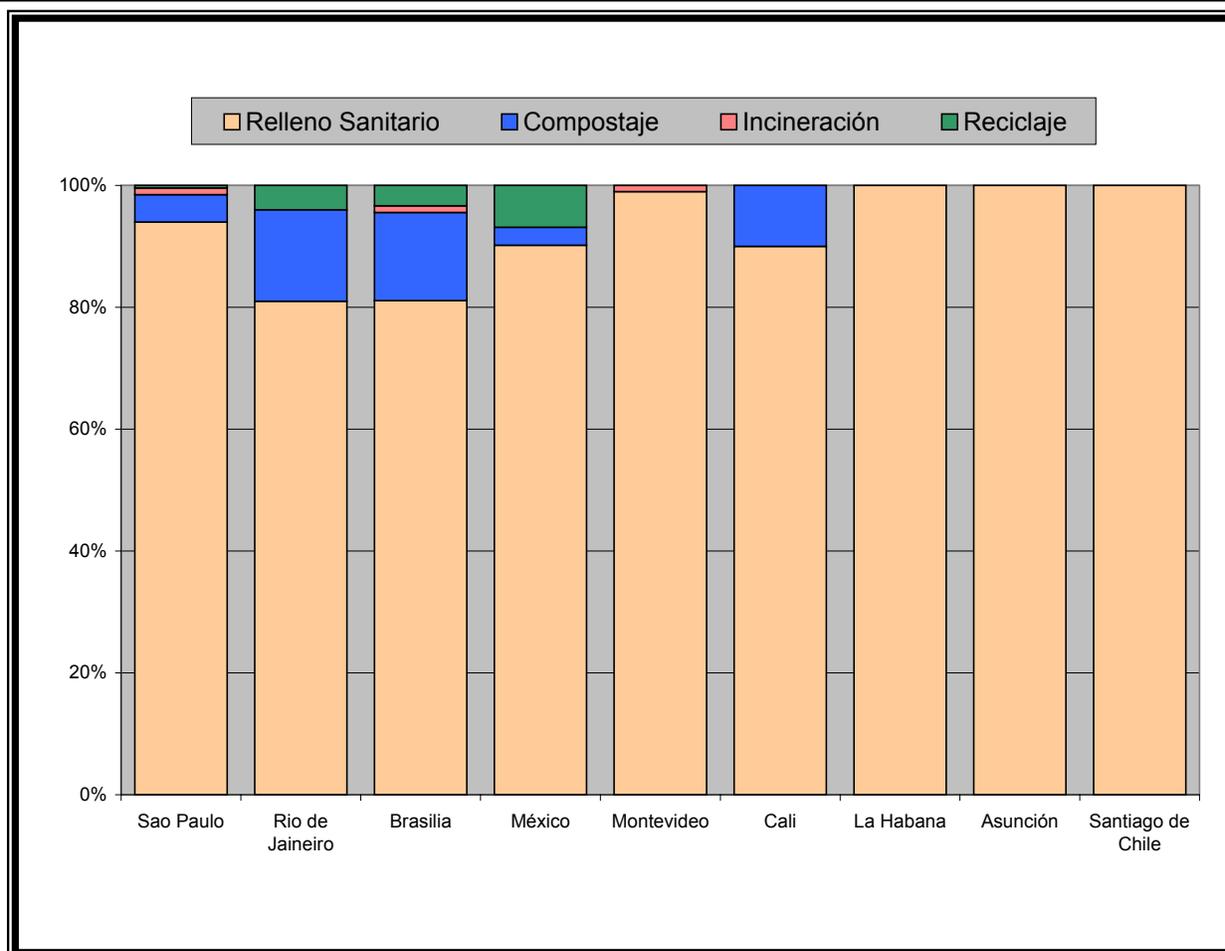
Fuente: Waste Generated in Europe 1985-1997, Eurostat (2002)

Figura I.2. Número de incineradores operando en Europa

La incineración en América Latina se circunscribe a pequeños incineradores para residuos especiales, principalmente en los hospitales, puertos, aeropuertos y en la industria. (Acurio *et al.*, 1997)

América Latina, no cuenta con incineradores de residuos sólidos, siendo la principal razón que no existe inversión para estas instalaciones y que no se cuenta con una legislación de control de emisiones para evitar el riesgo que representa la emisión potencial de dioxinas y furanos, entre otros contaminantes por parte de la combustión de los residuos. (Acurio *et al.*, 1997)

En la figura I.3. se observa la tendencia del manejo de residuo sólidos municipales (RSM) en algunas ciudades de América Latina.

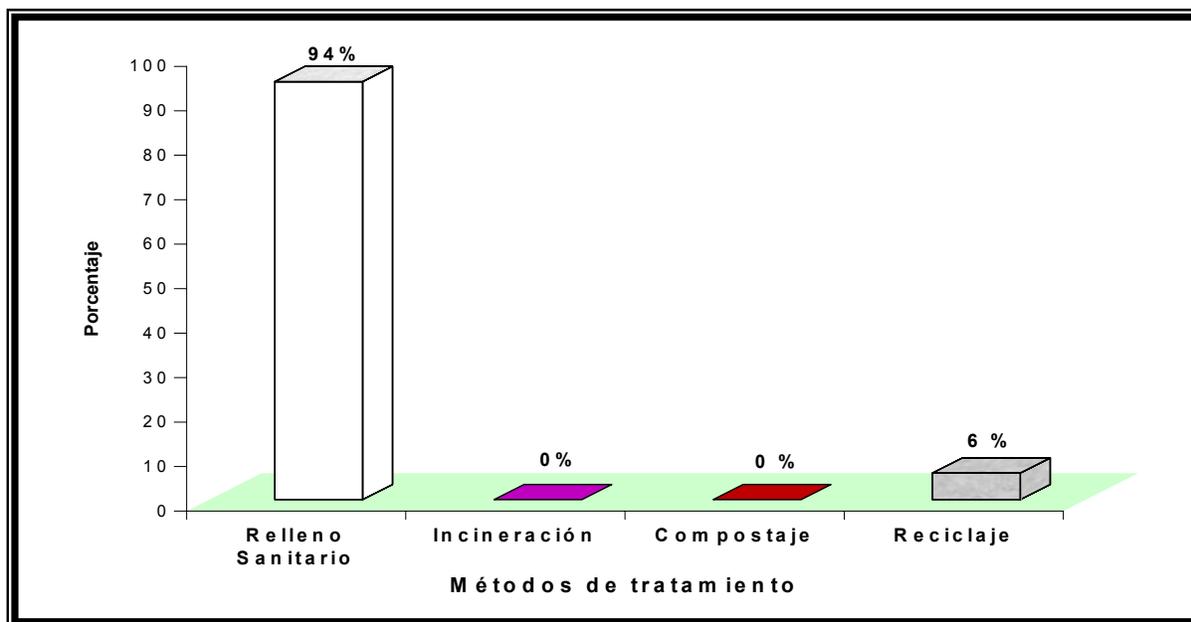


Fuente: OPS. El manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. 1995. Serie Ambiental No 15. OPS. Sistema de Monitoreo de Residuos Urbanos, SIMRU. 1996.

Figura I.3. Tratamiento de los RSM en América Latina

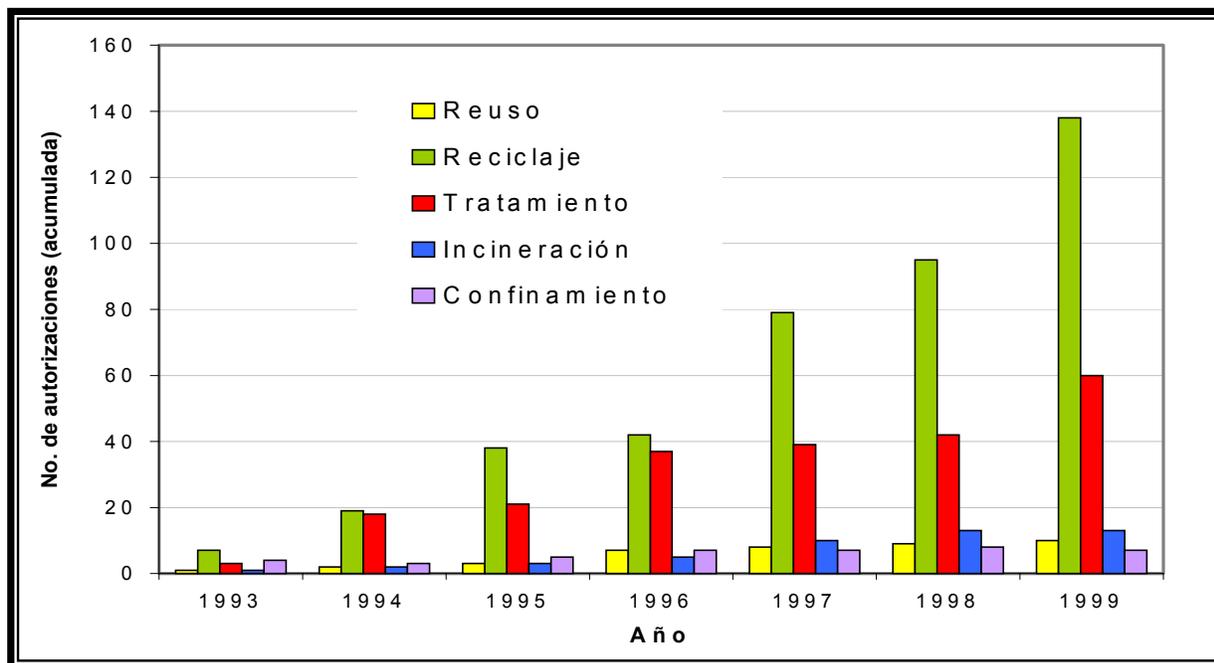
En México al igual que en América Latina la incineración se lleva a cabo sólo para los residuos generados en hospitales e industrias. En cambio para los residuos municipales se ha optado por el proceso de compostaje que presenta aspectos críticos por falta de estudios de factibilidad, incluidos el de mercadeo y comercialización (Acurio *et al.*, 1997) tal como se muestra en la figura I.4.

En México se tienen autorizados por el INE 65 incineradores para el manejo de residuos peligrosos como se puede observar en la figura I.5 y en la figura I.6.



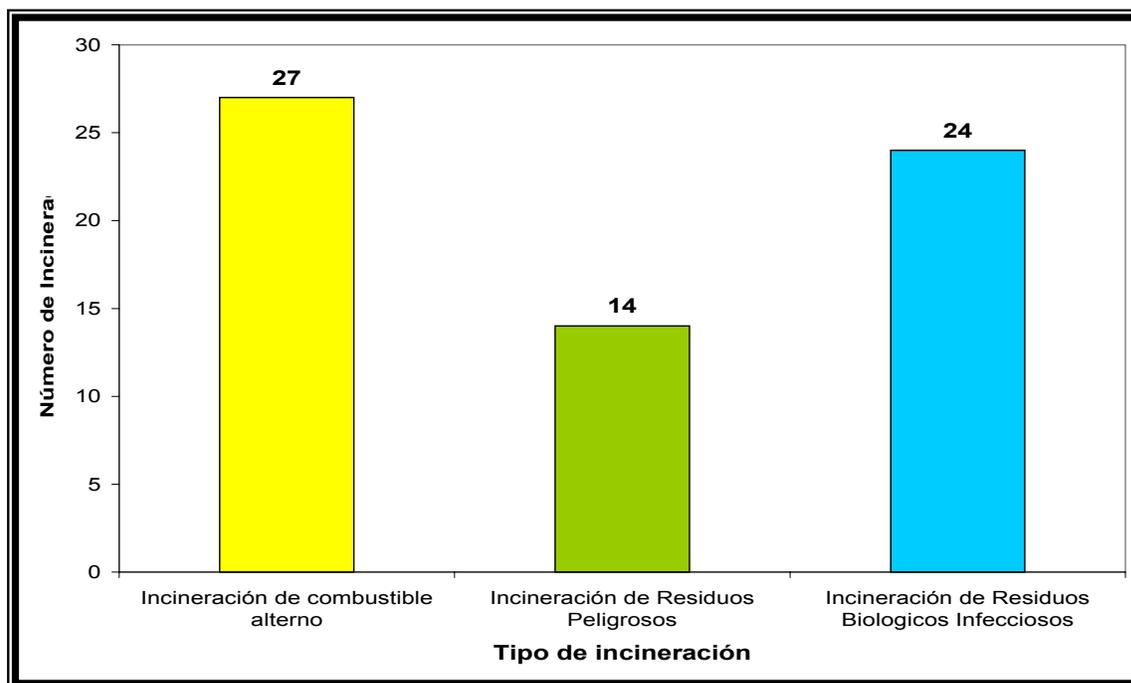
Fuente: Fundación ICA 2002

Figura I.4. Tratamientos utilizados para el manejo de residuos sólidos en México



Fuente: Instituto Nacional de Ecología, 2000.

Figura I.5. Evolución de la infraestructura de reuso, reciclado, tratamiento, incineración y confinamiento de residuos peligrosos en México 1988-2000



Fuente: SEMARNAT, Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes 2002

Figura I.6. Incineradores autorizados para el tratamiento de residuos peligrosos en México

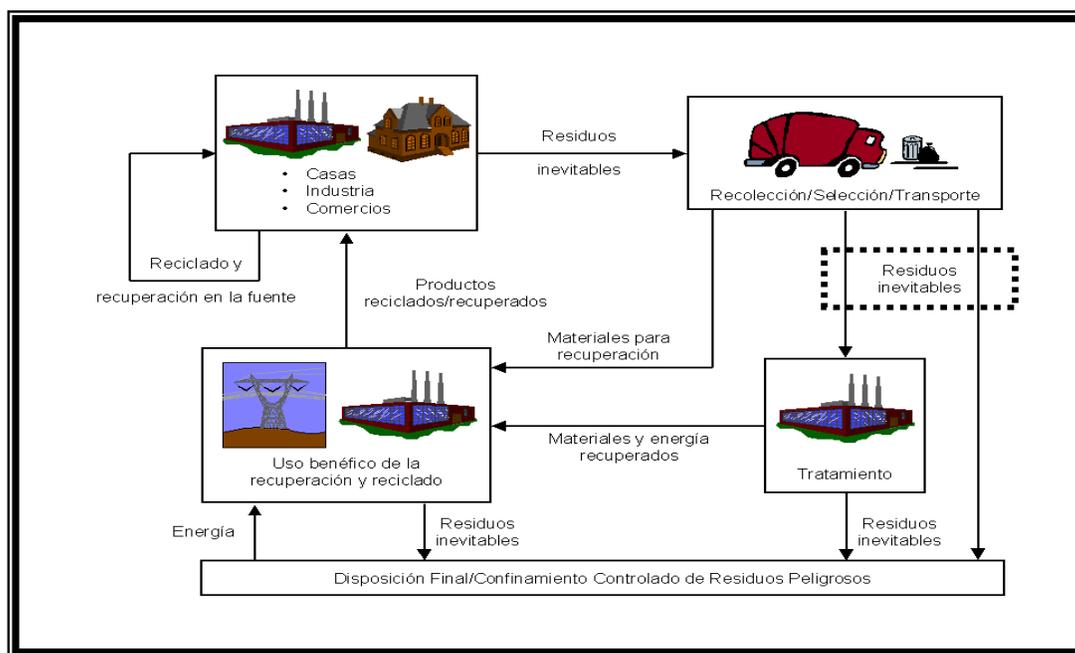
La incineración en México de residuos peligrosos no ha crecido en cuanto a infraestructura debido a los siguientes problemas: (Gutiérrez, 2000)

- Se autorizó la incineración sin contar con un marco regulatorio
- Se autorizaron incineradores sin un criterio homogéneo
- No se realizaron estudios de mercado, lo que provocó que se concentrarán principalmente en la parte central del país
- Personal poco preparado
- Falta de instrumentación
- Operación deficiente de los incineradores e instalaciones inadecuadas
- Áreas de almacenamiento inadecuadas
- Chimeneas y plataformas de muestreo mal diseñadas
- Equipo inadecuado de control de emisiones

## I.2. Justificación

El tema de minimización y control de los residuos peligrosos y no peligrosos, es algo creciente e importante a la luz de las necesidades concurrentes de protección ambiental y competitividad, de hecho, es un tema interfase entre política industrial y medio ambiente. Abordar la problemática de los residuos peligrosos y no peligrosos significa en el fondo examinar procesos, productos, tecnologías, insumos, diseño y administración de calidad en las empresas. (SEMARNAP, 1996)

Dentro de la filosofía de la minimización se contempla el tratamiento de residuos peligrosos cuya reutilización, reducción y reuso no es posible, a fin de nulificar su potencial nocivo sobre el medio ambiente a través de métodos físicos, químicos, biológicos o combinación de todas ellas (Garza, 1997). En la figura I.7 se presenta el ciclo ideal que los residuos deberían de seguir el cual es una representación gráfica del concepto de minimización. (INE, 1999)



Fuente: INE, Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos, 1999

Figura I.7. Minimización de residuos sólidos

La incineración de los residuos juega un papel importante, ya que se inserta dentro de la política nacional como uno de los tratamientos alternativos para los residuos peligrosos y no peligrosos (siempre y cuando se realice de manera ambientalmente adecuada) ayudando a reducir su peligrosidad y volumen, una vez que no han podido ser reusados o reciclados. (SEMARNAP 1999)

Por lo anterior, la incineración como método de tratamiento tiende a ser una solución para la problemática de los residuos (Acurio *et al.*, 1997).

Debido a la falta de terrenos, su alto costo o por la cada vez más exigente legislación para la preservación del ambiente, muchos países desarrollados adoptaron la incineración como método de tratamiento con aprovechamiento de energía, esta tecnología está siendo implementada por varios países de América Latina como México para el tratamiento de residuos peligrosos; sin embargo los primeros resultados han sido desalentadores, debido a que faltaron los análisis técnicos, institucionales y económicos para establecer la justificación y factibilidad de las inversiones. (Acurio *et al.*, 1997).

Actualmente, sólo en algunos países de América Latina y en circunstancias muy especiales se justifica la tecnología de incineración, el cual es un tratamiento que según informes de la OPS tiene costos hasta 20 veces más altos que el de los rellenos sanitarios. (Acurio *et al.*, 1997).

Este trabajo busca encontrar la optimización del proceso de incineración de residuos municipales para que este método de tratamiento sea técnica y económicamente factible para el manejo de residuos en México, garantizando en la operación de los incineradores un adecuado control de las variables que gobiernan el proceso.

II. Objetivos.....	10
II.1. Objetivos Generales.....	10
II.2. Objetivos Específicos.....	10
II.3. Hipótesis.....	10

## **II. Objetivos**

### **II.1. Objetivos Generales**

- Determinar los mecanismos de participación de las variables que dominan el proceso de destrucción térmica de residuos sólidos provenientes de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco (UAM-A).
- Establecer las condiciones óptimas del proceso para la destrucción térmica de los residuos sólidos provenientes de la UAM-A.

### **II.2. Objetivos Específicos**

- Instrumentar y adecuar el funcionamiento del incinerador existente en la UAM-A para llevar a cabo pruebas de incinerabilidad.
- Caracterizar los residuos generados en la UAM-A para conocer sus propiedades físicas, químicas y obtener el indicador de incinerabilidad.
- Realizar pruebas de incinerabilidad a diferentes condiciones de operación del incinerador para determinar la eficiencia de destrucción térmica de los mismos.
- Medir las emisiones generadas en las pruebas de incinerabilidad.

### **II.3. Hipótesis**

En un proceso de incineración de residuos, el manejo de los parámetros de combustión, tales como: temperatura, exceso de aire y poder calorífico de los residuos influyen en los mecanismos de formación de emisiones contaminantes por lo que se puede alcanzar la máxima eficiencia en la destrucción térmica de los residuos y la mínima generación de emisiones a la atmósfera fijando las condiciones óptimas de operación.

III. Revisión del estado del arte .....	11
III. 1. Incineración.....	11
III.1.1 Combustión de sólidos .....	12
III.2. Proceso de la incineración de los residuos .....	20
III.2.1. Eficiencia de destrucción térmica .....	22
III.2.2. Temperatura y tiempo de residencia .....	23
III.2.3. Turbulencia.....	24
III.2.4. Exceso de aire.....	25
III.2.4.1. Combustible auxiliar.....	27
III.3. Consideraciones de termoquímica y termodinámica en el proceso de incineración.....	27
III.3.1 Estequiometría.....	28
III.3.2. Termoquímica.....	31
III.3.2.1. Temperatura de la flama adiabática.....	36
III.4. Características de los residuos a incinerar .....	38
III.5. Proceso para la formación de emisiones en la combustión de residuos sólidos	41
III.5.1. Emisiones de partículas .....	42
III.5.2. Emisiones de óxidos de nitrógeno.....	43
III.5.2.1. Factores importantes que afectan los NOx.....	48
III.5.3. Emisiones de gas ácidos.....	50
III.5.4. Monóxido de carbono y emisiones orgánicas.....	51
III.6. Marco Normativo.....	52

---

### III. Revisión del estado del arte

#### III. 1. Incineración

La incineración es una reacción de combustión, cuya reacción es una oxidación exotérmica, homogénea en fase gas y de superficie (Gardiner, 1999) que se lleva a cabo en solamente una fracción de segundo. (Baukal, 2001)

La combustión puede ser de sólidos, líquidos y gases, y como se menciona anteriormente la combustión es una reacción en fase gas, por lo que en toda combustión sucede en primer instancia una reacción de superficie, tal como se muestra en la figura III.1. (Yeager, 1973)

En los combustibles líquidos, estos deben de estar en forma de pequeñas gotas para que puedan ser convertidas rápidamente al estado de vapor (Yeager, 1973) y ser oxidadas en forma gaseosa, por lo tanto, el nivel de reacción de combustión es limitado por el nivel de evaporación (o destilación). (Beard, *et al.*, 1980).

En la combustión de sólidos suceden dos fenómenos: la fracción volátil del sólido es destilada y oxidada como un gas y la fracción de carbón remanente se quema como un sólido, controlándose la combustión por la difusión del oxígeno a la superficie. (Beard, *et al.*, 1980).

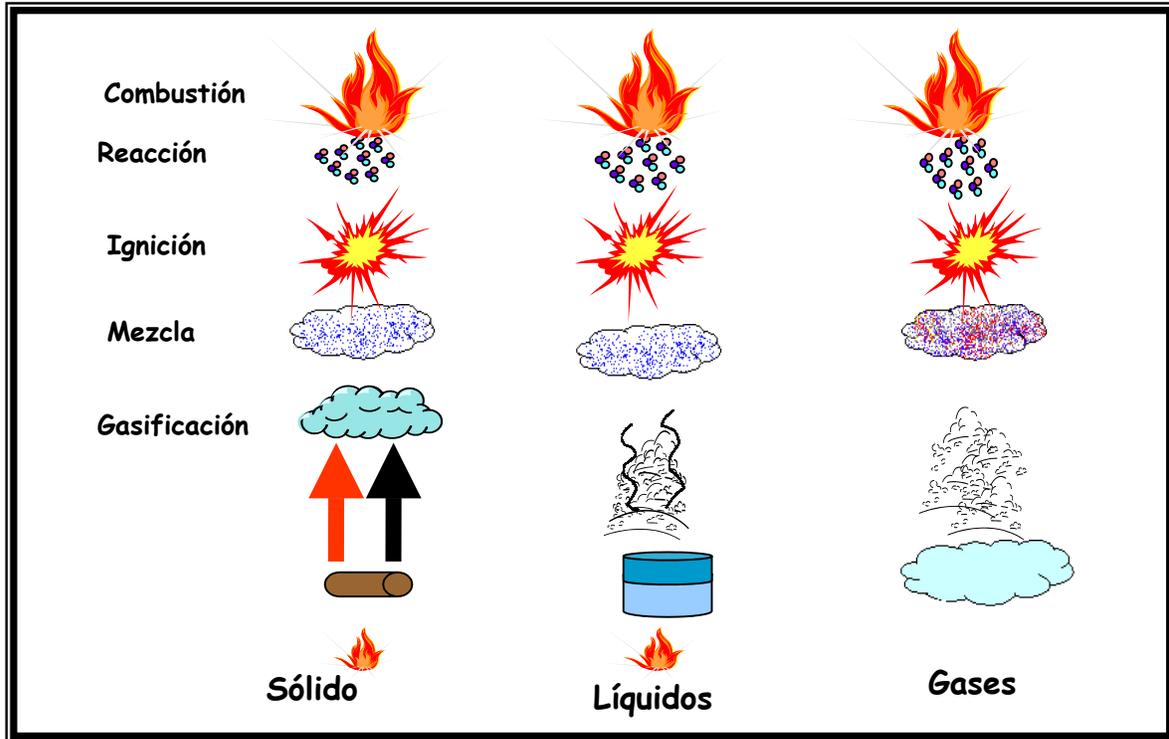


Figura III.1. Combustión de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos

### III.1.1 Combustión de sólidos

En la combustión de sólidos, la fracción volátil se desprende del sólido como consecuencia de una reacción química, y no por un cambio de fases, la liberación de los gases es realizada en forma exotérmica antes que endotérmica como en el caso de la vaporización de un combustible líquido. La velocidad de liberación aumenta al aumentar la temperatura hasta que se observa en el interior el desprendimiento de sustancias volátiles. La materia carbonizada permanece después de que la fracción volátil se ha liberado. (Spalding, 1983)

Debido a que la materia carbonizada no es volátil, sólo es necesario considerar la difusión de unos de los reactantes, básicamente el oxígeno. La velocidad de difusión del oxígeno hacia la superficie de la materia carbonizada establecerá el límite de la velocidad de combustión, la cuál se puede calcular con la ley de Fick.

Cuando el oxígeno alcanza la superficie, puede ser que no reaccione con ella químicamente, no lo hará si la temperatura de la superficie es demasiado baja, ya que se ha observado que la velocidad de reacción depende tanto de la temperatura como de la concentración local del oxígeno según la ley de Arrhenius donde se parte en primer instancia de una reacción de primer orden como:

$$\frac{dC}{d\theta} = -kC \dots\dots\dots(III.1)$$

En donde C es la concentración de del material, K es la tasa de reacción y  $\theta$  es el tiempo. Si la concentración inicial es  $C_0$ , la solución de la ecuación diferencial anterior es:

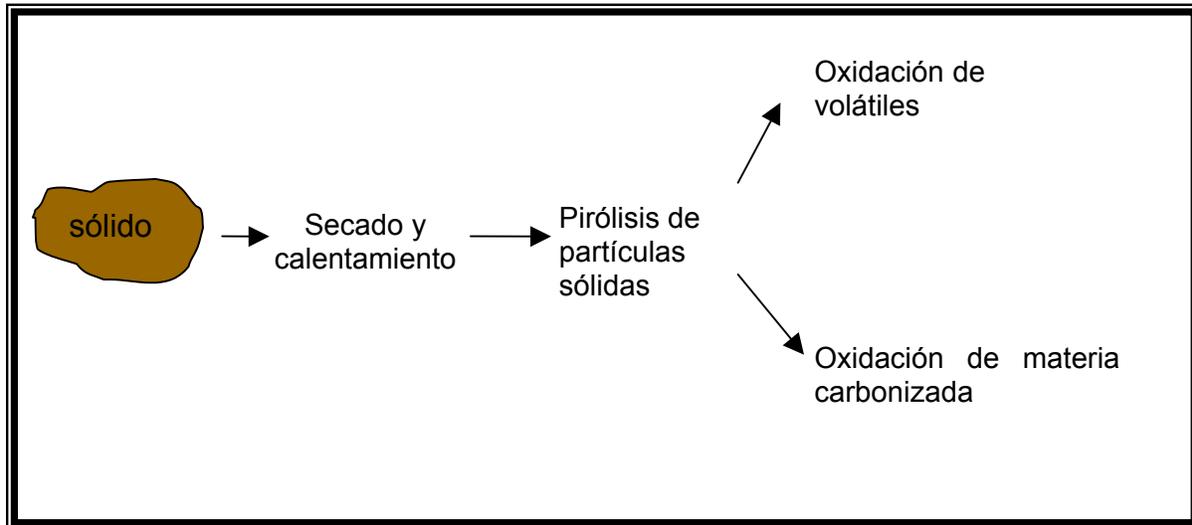
$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -k\theta \dots\dots\dots(III.2)$$

la temperatura depende de k y esta dada también por la ecuación de Arrhenius:

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \dots\dots\dots(III.3)$$

En donde A es la constante de Arrhenius y depende de la sustancia en estado puro que participa en la reacción, como ejemplo se recomienda utilizar en el caso de residuos que son mezclas el valor de  $3.3 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ , E es la energía de activación; R es la constante universal de los gases (35,900 cal/g mol); y T es la temperatura absoluta. (Spalding, 1983)

Como se observo anteriormente, la combustión de sólidos es más compleja que la combustión de líquidos y gases. Los pasos que suceden en la combustión de sólidos se muestran en la Figura III.2. (Tillman, 1991)



Fuente: The Combustion of solid fuels and waste, 1991

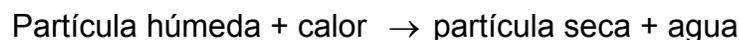
Figura III.2. Combustión del combustible sólido

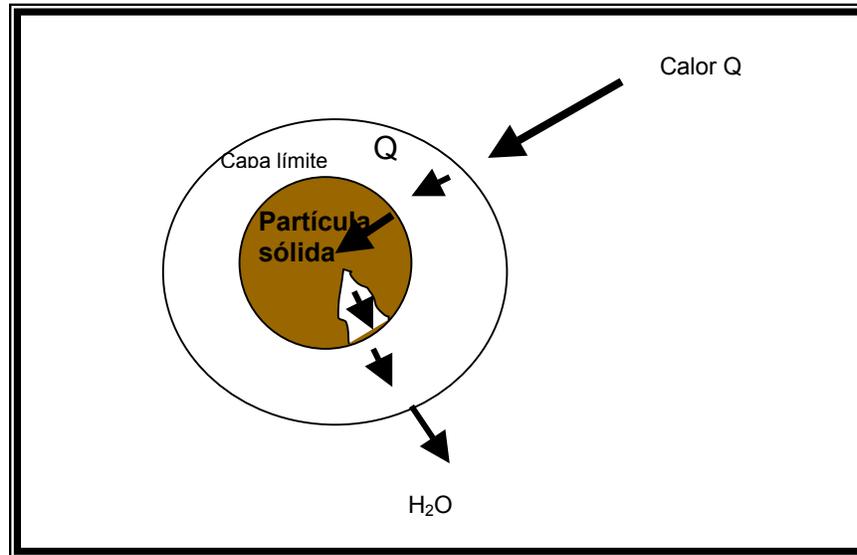
La figura anterior muestra los pasos en la combustión de sólidos los cuales son:

- 1) Secado y calentamiento de partículas para alcanzar la temperatura de reacción.
- 2) Pirólisis de la partícula sólida: Cuando la superficie de la partícula sólida alcanza la temperatura de reacción la pirólisis comienza. La pirólisis de la partícula sólida produce compuestos volátiles condensables y no condensables los cuales escapan de la partícula del combustible.
- 3) Oxidación del material carbonizado.

Los pasos anteriores se describen detalladamente a continuación:

- 1) Secado y calentamiento de partículas: Típicamente los sólidos quemados contienen algo de humedad dentro de su estructura porosa. Cuando se inicia la reacción de calentamiento, el calor es conducido dentro de la partícula. La humedad contenida en los poros de la partícula es evaporada y el vapor escapa de la partícula como se muestra en la figura III.3: (Tillman, 1991)





Fuente: The Combustion of solid fuels and waste, 1991

Figura III.3. Secado y calentamiento de partículas

El secado y el calentamiento inician con una serie de cambios físicos dentro de la partícula, esto dependerá en gran medida del contenido de humedad y tipo de partícula.

El secado puede producir fisuras dentro de la partícula e iniciar un quiebre de la misma, estos procesos son endotérmicos, donde existe una transferencia de calor controlada y donde la cantidad de energía requerida depende y está en función del contenido de humedad, del contenido de cenizas, de las dimensiones, del diámetro, de la capacidad calorífica, de la difusión y de la conductividad térmica.

El secado se limita a procesos de transferencia de calor y ocurre cuando la temperatura excede los 105 °C donde la humedad es convertida a fase vapor y se mueve a través de la estructura porosa de la superficie de la partícula y a través de la capa límite cuyo mecanismo de transferencia de calor es la conductividad. Consecuentemente la ecuación general de conducción es la que domina: (Tillman, 1991)

$$q = kA[(T_1 - T_2)/x] \dots \dots \dots (III.4)$$

Donde q es el flujo de calor, k es la conductividad térmica del combustible, A es el área de superficie de la partícula combustible, T<sub>1</sub> es la temperatura en la superficie de la partícula y T<sub>2</sub> es la temperatura en el centro de la partícula, x es el radio de la partícula.

Suficiente calor puede ser transmitido al centro de la partícula al elevar la temperatura a 250 °F y evaporar la humedad de los poros. La cantidad de calor necesario para llevar a cabo el secado está en función de la capacidad calorífica de la partícula combustible.

2) Proceso de pirólisis de partículas sólidas: La pirólisis incluye una descomposición térmica y una degasificación (Warnatz *et al.*, 1999)

La pirólisis es el calentamiento de cualquier partícula de combustible en ausencia de oxígeno y esto puede ser representado por la siguiente ecuación general:



Las tres clases de productos de la pirólisis son: volátiles, brea y materia carbonizada, los volátiles producidos por la pirólisis de los combustibles sólidos incluyen gases condensables y no condensables, los condensables incluyen pesos moleculares ligeros, las breas producidas por la pirólisis son moléculas de cadenas largas. El material carbonizado es generalmente un carbón sólido el cual contiene fracciones mínimas de hidrógeno y oxígeno. La pirólisis inicia aproximadamente a la temperatura de 450 y 500 °C, este proceso involucra cambios físicos y químicos, los cambios físicos incluyen un potencial de reducción de las partículas además los cambios por la pirólisis involucran cambios en las propiedades termodinámica. (Tillman, 1991)

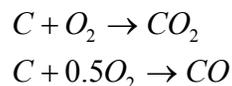
Los volátiles son oxidados en reacciones homogéneas fase gas mientras que el carbón es subsecuentemente oxidado en reacciones heterogéneas gas - sólido. En la pirolisis

el calor es llevado a través de la capa límite y dentro de la partícula sólida por radiación y conducción. Cuando el calor llevado dentro de las partículas es suficientemente elevado a la temperatura de reacción cerca de los 450-500°C, los volátiles son conducidos fuera de la partícula a través de la estructura porosa del combustible y cuando la presión interna es suficiente provoca la ruptura de la estructura interna de la partícula. El calor es también llevado fuera de la partícula en los volátiles, enfriando la capa del carbón que existe entre la reacción y la superficie de la partícula. (Warnatz *et al.*, 1999)

Los compuestos volátiles son combustibles y ellos consumen todo el oxígeno transportado hacia la superficie de la partícula combustible. Lo anterior mantiene la presión parcial del oxígeno a la superficie del carbón a un valor cerca del cero absoluto, consecuentemente la flama asociada a la partícula ocurre hasta el final de la secuencia de la pirólisis y la oxidación del carbón no procede hasta que la volatilización sea completa. (Tillman, 1991)

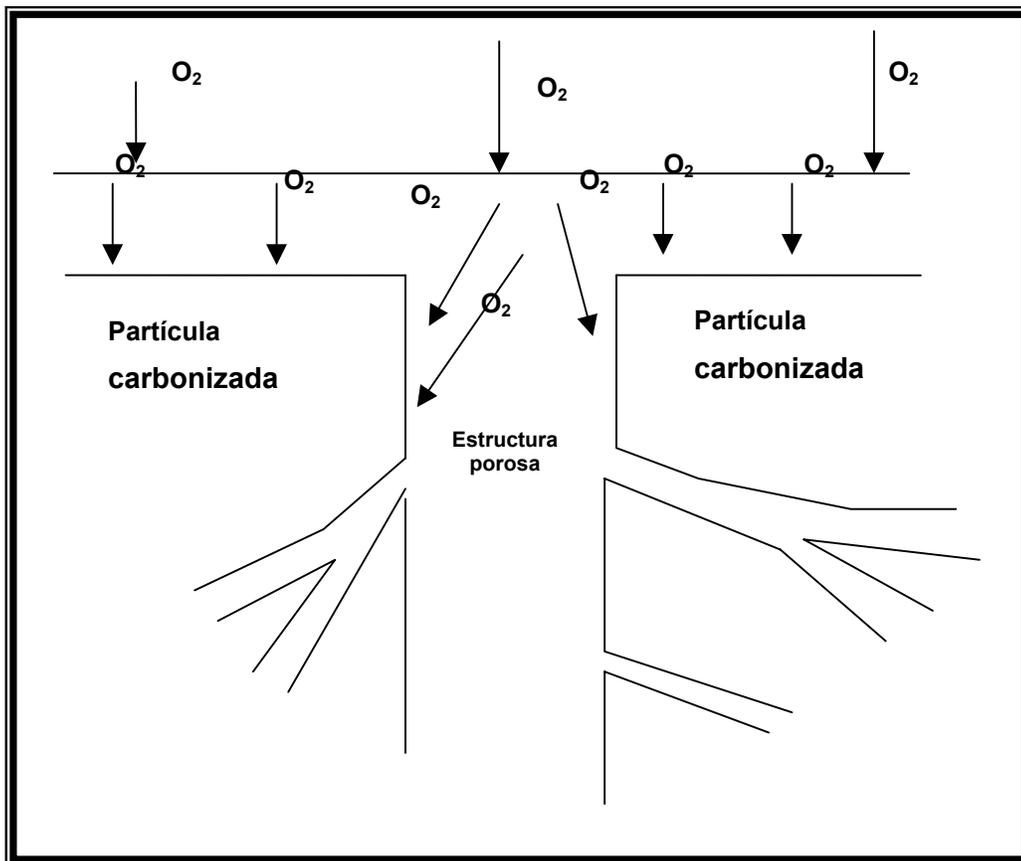
### 3) Oxidación del material carbonizado

El proceso de oxidación del material carbonizado es la difusión controlada a altas temperaturas cerca de los 2200 °F, la difusión del oxígeno aparece para estar solamente en la superficie del material carbonizado. Existen influencias en los procesos de oxidación de material carbonizado las cuales incluyen el diámetro de la partícula, la disponibilidad de oxígeno y la temperatura. La secuencia general de la reacción de oxidación del material carbonizado es la siguiente: (Tillman, 1991)



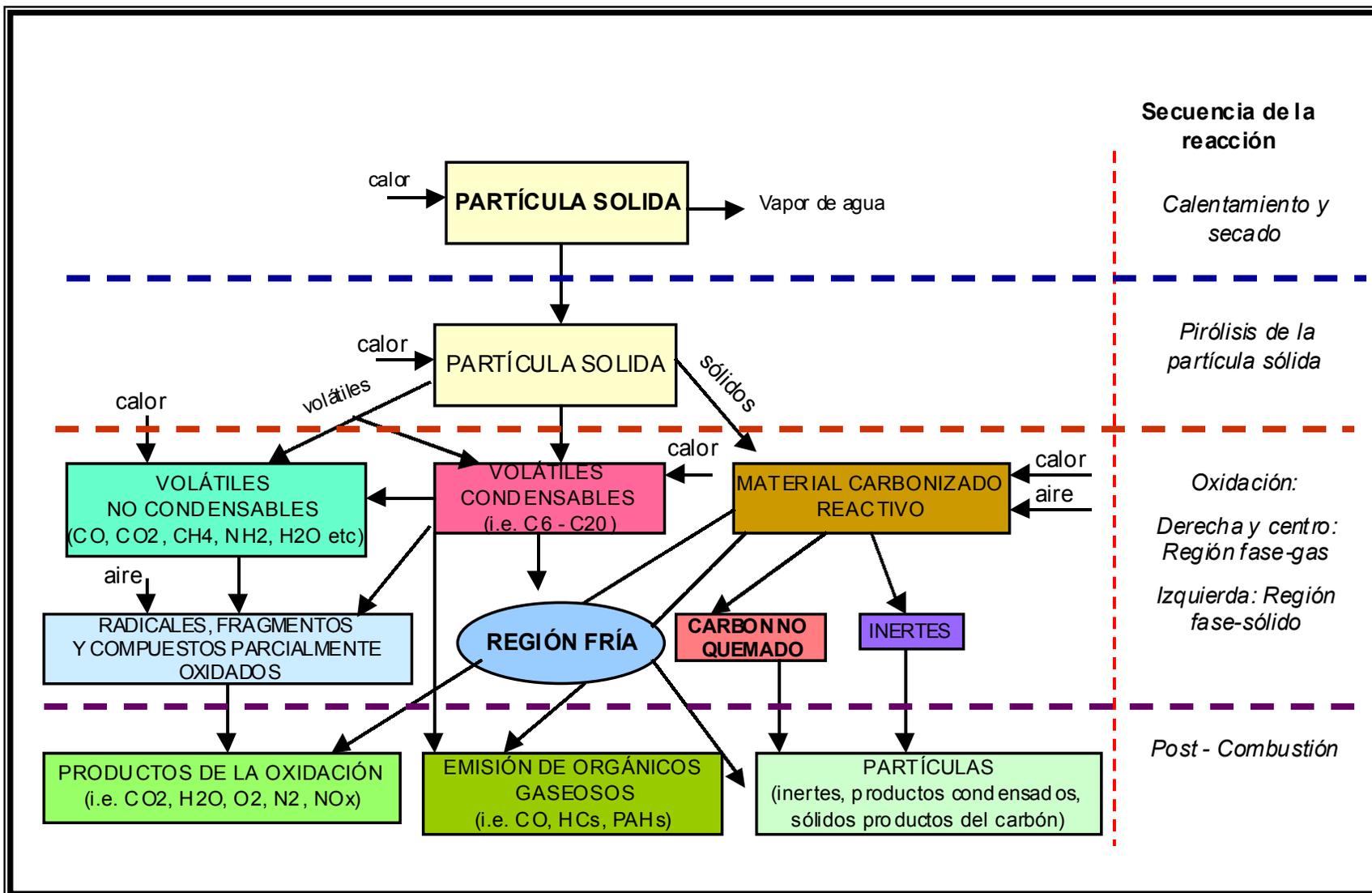
Estas reacciones son una oxidación en fase gas, y son generadas a muy altas temperaturas en la superficie del material carbonizado. Las reacciones de gasificación también contribuyen a la oxidación del material carbonizado. Estas reacciones son

endotérmicas y termodinámicamente favorables solamente a temperaturas cerca de los 700 °C. Los niveles de oxidación del carbón son gobernados por la difusión del oxígeno a la superficie del material carbonizado tal como se muestra en la siguiente figura. A su vez en la figura III.5 se presentan las reacciones que ocurren en la combustión de un combustible sólido (Tillman, 1991)



Fuente: The Combustion of solid fuels and waste, 1991

Figura III.4. Difusión del oxígeno en la partícula carbonizada

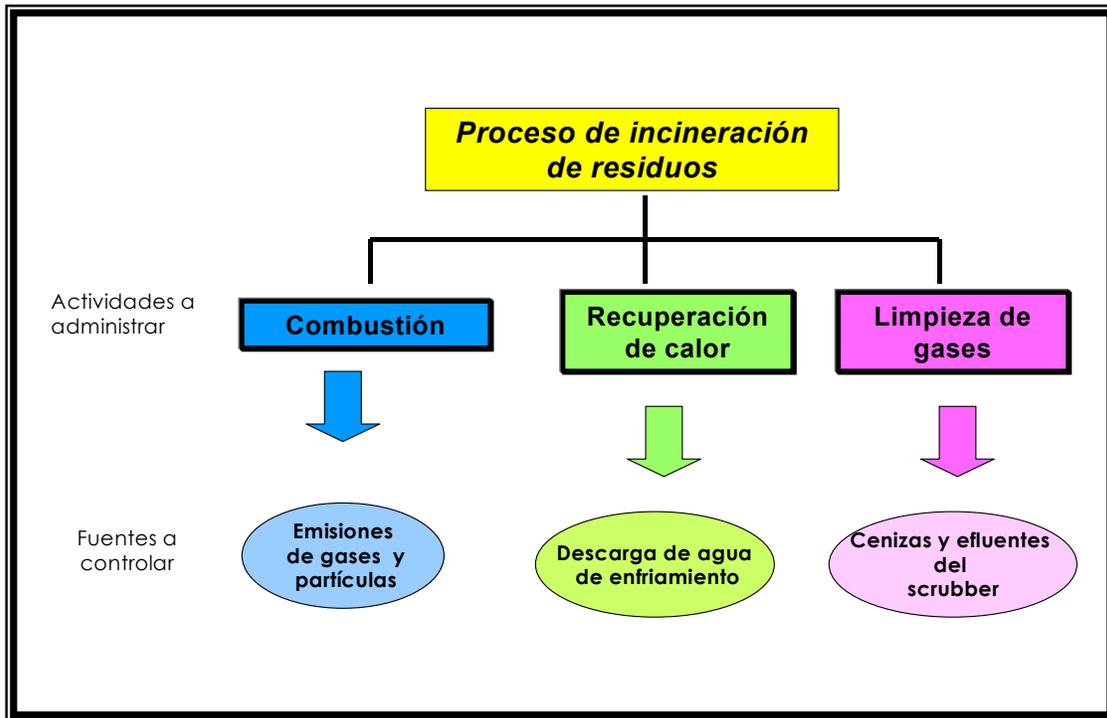


Fuente: The Combustion of solid fuels and waste, 1991

Figura III.5 Combustión de un combustible sólido

### III.2. Proceso de la incineración de los residuos

La incineración de residuos produce emisiones que pueden provocar la contaminación del ambiente y con ello dañar a los ecosistemas o la salud humana; lo cual demanda la adopción de acciones preventivas para promover condiciones de operación adecuadas y valores límite de emisión aceptables. Las acciones preventivas, de conformidad con la política ambiental, requieren de un enfoque multimedia, lo cual implica considerar de manera integral el control de las emisiones al aire, las descargas al agua y el manejo de las cenizas (NOM-ECOL-098-2000). En la siguiente figura se muestra el proceso de incineración, indicando los aspectos relacionados con sus actividades y parámetros de control del proceso. (INE, 1999)



Fuente: INE, Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos, 1999

Figura III.6. Proceso de incineración de residuos

En esta tesis de las tres actividades sólo se analizará la combustión cuyos parámetros a controlar son la temperatura, el aire en exceso para así reducir las emisiones de gases y partículas.

El proceso involucra además el tipo de residuo a incinerar, la composición y la humedad contenida en los mismos. Los residuos vienen en todas las formas físicas, líquidas, sólidas, gaseosas y algunas veces combinados.

La incineración es un proceso químico simple, donde los componentes contienen carbón, hidrógeno, oxígeno, metales, halógenos y nitrógeno. Los porcentajes de materia junto con el contenido de humedad son datos que se deben conocer con precisión para determinar los requerimientos estequiométricos del aire de combustión y también para predecir el flujo y la composición del gas de combustión. Las condiciones de incineración generalmente requieren un exceso de oxígeno para maximizar la formación de productos de combustión completa y minimizar la formación de emisiones derivadas de la combustión incompleta.

Los productos de la combustión completa serían vapor de agua y dióxido de carbono, mientras que en la combustión incompleta se encuentran el monóxido de carbono, diversos hidrocarburos, aldehídos, cetonas, aminas, ácidos orgánicos y materia orgánica policíclica, en un incinerador bien diseñado estos productos se presentan en cantidades insignificantes. Sin embargo, en un incinerador que opera deficientemente o con sobrecarga, los productos de la combustión incompleta representan un grave problema ambiental. (Voguel, 1993) La incineración tiene muchas ventajas, tales como: (Brunner, 1993)

- ❖ Alta eficiencia de destrucción de tóxicos orgánicos
- ❖ Reducción inmediata del 80 al 90% del volumen de los residuos
- ❖ La posible recuperación de energía
- ❖ Las emisiones de gases pueden ser controladas para reducir impactos ambientales
- ❖ Requiere poco espacio, pudiendo localizarse dentro de una zona urbana
- ❖ Las condiciones climatológicas y meteorológicas no afectan el proceso

Pero también el proceso de incineración presenta desventajas como:

- ❖ Altos costos de capital, operación y mantenimiento
- ❖ Se requiere personal especializado
- ❖ Se destruyen materiales potencialmente reciclables
- ❖ Se requiere equipo para control de emisiones a la atmósfera
- ❖ Se requiere de la disposición final de las cenizas y escorias
- ❖ Para residuos con bajo poder calorífico, es necesario utilizar combustible adicional

Las emisiones de la combustión de los residuos sólidos están asociadas con la formación y control del proceso global de la combustión y los mecanismos asociados con la oxidación térmica de residuos y pueden ser manipulados por tecnologías de control de parámetros de combustión tales como: (Theodore *et al.*, 1991)

1. Adecuado exceso de oxígeno en la zona de combustión.
2. Turbulencia y la constante mezcla de residuos y oxígeno en la zona de combustión.
3. Mantener la temperatura de combustión para que se garanticen las reacciones exotérmicas.
4. Tiempo transcurrido de exposición de los residuos a la temperatura de combustión para garantizar que incluso la más lenta reacción de combustión haya sido completada.

### **III.2.1. Eficiencia de destrucción térmica**

La eficacia de transformación de la materia orgánica combustible en productos finales de oxidación es de carácter importante para un proceso de incineración. Las reglamentaciones existentes en algunos países, en materia de incineración fijan los niveles de destrucción mínimos que han de alcanzarse para diversos compuestos seleccionados por su peligrosidad. La eficiencia de destrucción, para un compuesto dado, se define como:

$$\eta = 100 \left( \frac{W_o - W_e}{W_o} \right) \dots\dots\dots(III.5)$$

Donde  $W_o$  y  $W_e$  representan la masa del residuo alimentado al incinerador y la emisión de gases, respectivamente, tomadas ambas para el mismo intervalo de tiempo. (Rodríguez *et al.*, 1998)

### III.2.2. Temperatura y tiempo de residencia

La temperatura constituye una variable particularmente crítica por la necesidad de conseguir la destrucción completa de los residuos. Los niveles operativos dependen de la composición del residuo, su estado, la forma física y las características del sistema de combustión empleado. El estado y la forma física del residuo condicionan en gran medida la calidad del contacto entre la materia combustible y el  $O_2$ , por tanto, resultan determinantes a la hora de establecer la combinación de temperatura y tiempo de residencia necesarios para alcanzar los niveles de eficacia exigidos para la destrucción de contaminantes.

La combustión se realiza a presiones cercanas de la atmosférica por lo que el parámetro más utilizado es la temperatura de inflamación. (Dávila, 2000)

La incineración de residuos sólidos, suele requerir la incorporación de una cámara de combustión secundaria a continuación de la cámara principal para el control de emisiones. (Rodríguez *et al.*, 1998) La temperatura óptima para la cámara secundaria esta en el rango de 850 °C a 1200°C (EPA, 2000).

La normatividad mexicana maneja por lo menos 850°C, alcanzados en o cerca de la pared interna de la cámara de combustión final, durante un tiempo mínimo de por lo menos dos segundos, referido a un 7 por ciento mínimo de oxígeno. (NOM-ECOL-098-2000).

El control de la temperatura es de importancia crítica en un sistema de combustión por la gran variedad de razones que incluyen la manipulación de los mecanismos de combustión, el control de emisiones contaminantes y la optimización del sistema. Algunos sistemas de combustión gobiernan la temperatura por la manipulación de las siguientes variables (Tillman, 1991):

- 1) La relación estequiométrica (moles de  $O_2$ / moles de combustible) o relación equivalente (moles de combustible/moles de  $O_2$ ).
- 2) La composición del oxidante (moles  $O_2$ /moles de  $N_2$ ) principalmente a través del enriquecimiento del oxígeno.
- 3) La temperatura del oxidante (por ejemplo precalentando el aire para elevarla por encima del ambiente), e incrementar la eficiencia térmica del proceso.
- 4) El poder calorífico de los combustibles BTU/lb (cal/g)
- 5) La humedad contenida en la atmósfera de la combustión, gobernada ya sea por la humedad contenida en el combustible o por el agua o vapor inyectados dentro del sistema.

### **III.2.3. Turbulencia**

No sólo se debe proveer oxígeno sino que este debe tener un buen mezclado con el material que se está quemando, de esta manera es posible que se lleve a cabo la combustión durante todo el tiempo. Cuando se queman residuos sólidos sin turbulencia los productos iniciales de la combustión actúan como una pantalla para el oxígeno entrante y por esta razón se disminuye la tasa de reacción en la superficie, la combustión de gases requiere una mezcla perfecta de ellos con el aire, de otra manera se formarán zonas que separan los gases y el aire, y estos escaparán sin ningún cambio o con una oxidación incompleta. (EPA, 2000)

Uno de los más importantes fenómenos que contribuyen a una combustión eficiente es la turbulencia. La turbulencia de un flujo de aire o gas dentro de un incinerador

promueve la mezcla. Este parámetro es difícil de cuantificar. Una estimación del punto al cual el flujo turbulento comienza (como comparación al flujo laminar en el cual ocurre la mezcla) es indicado por el número de Reynolds ( $N_{RE}$ ).

Este cambio de flujo laminar a turbulento no es precisamente un punto discreto sino que ocurre sobre un rango de valores de  $N_{RE}$ . El valor crítico de  $N_{RE}$  corresponde a  $N_{RE}=2,300$  donde el flujo pasa de la condición laminar a la turbulenta.

Sin embargo, este número, para indicar la turbulencia es inexacto. Valores de  $N_{RE}$  arriba de los 2,300 pueden ser asumidos como indicativos de presencia de turbulencia. (Brunner, 1993)

#### **III.2.4. Exceso de aire**

Para lograr una combustión completa, es necesario ante todo mezclar el combustible con una cantidad suficiente de aire, como es prácticamente imposible efectuar una mezcla de los dos reactivos, hay que suministrar generalmente una cantidad de aire superior a la prevista en teoría, es decir trabajar con exceso de aire. (Salvi, 1975)

Por lo que el concepto de exceso de aire supone aire adicional al requerido por la combustión. Sin embargo, si uno no provee de suficiente aire, la combustión puede ser incompleta con grandes cantidades de CO y de combustible. (Baukal, 2001)

Como es obvio, cuanto más elevado es el grado de mezcla obtenido, menor es la cantidad de aire que se necesita para completar la combustión: por esta razón, los combustibles gaseosos, a causa de su naturaleza que facilita la mezcla, necesitan menor exceso de aire (5% sobre el esteoquiométrico puede ser suficiente) que los combustibles sólidos; estos precisan notables cantidades en exceso (100 % a 200 % sobre el esteoquiométrico). Un exceso de aire demasiado fuerte produce efectos negativos ya que hace bajar la temperatura de combustión. (Salvi, 1975)

El proceso de la combustión implica la oxidación de los componentes en el combustible capaces de ser oxidados. El oxidante usado es el aire atmosférico el cual contiene oxígeno como constituyente del aire. La composición del aire en base molal, es

aproximadamente 21 % de oxígeno, 78 % de nitrógeno y 1 % de argón y trazas de otros gases. En cálculos de combustión se considera el nitrógeno como el 79 % de la composición del aire.

La cantidad mínima de aire capaz de proporcionar el oxígeno suficiente para la combustión completa del combustible se denomina aire teórico, por lo que no puede existir oxígeno en los productos de la combustión. En la práctica, no es posible obtener una combustión absolutamente completa, salvo empleando aire en cantidad mayor que la teóricamente necesaria. La cantidad de aire efectivamente empleada en una combustión se expresa en forma de porcentaje con relación al aire teórico; así 150 % de aire teórico, significa que el aire suministrado es 1.5 veces la cantidad de aire teórico necesario.

La cantidad de aire efectivamente suministrada puede también expresarse en términos de porcentaje de exceso de aire. El exceso de aire, es la cantidad de aire suministrada sobre el aire teórico necesario. Así 150 % de aire teórico es equivalente a 50 % de aire en exceso.

Dos parámetros importantes que se aplican en los procesos de combustión, son la relación aire-combustible (AC) y la relación combustible-aire (CA). La relación aire combustible, se expresa generalmente en masa, aunque algunos la expresan también en base molar. La razón teórica aire-combustible, es la relación entre la masa o moles de aire teórico y la masa o moles de combustible. (Wylen, 1986)

Por la naturaleza heterogénea de los residuos es casi imposible incinerar residuos con cantidades estequiométricas de aire. Por lo en la práctica se debe utilizar aire adicional para aumentar el mezclado y las turbulencias, asegurando así que el aire pueda llegar a todas partes de los residuos.

El uso de aire en exceso en la incineración afecta la temperatura y a la composición de los productos de combustión. Mientras aumenta el porcentaje de aire en exceso, el contenido de oxígeno de los gases también se incrementa y la temperatura de

combustión disminuye, por lo tanto, el aire de la combustión puede usarse para controlar la temperatura de combustión. (EPA, 1984)

#### **III.2.4.1. Combustible auxiliar**

Algunos residuos tienen un valor de poder calorífico bajo aplicado en la incineración, por lo que, deben ser usados combustibles convencionales para llevar el residuo a una temperatura en donde pueda ocurrir una rápida oxidación de la fracción orgánica del mismo. (Beltrán, 1989)

En la práctica los residuos que serán incinerados pueden tener bajo poder calorífico como para sostener la combustión, en estos casos se debe de tener un combustible auxiliar.

Los combustibles usados en la incineración de residuos para que auxilie al poder calorífico son: (Theodore *et al.*, 1991)

- *Combustibles gaseosos* principalmente gas natural o gas L.P, también se utilizan hidrocarburos ligeros obtenidos del petróleo.
- *Combustibles líquidos* principalmente los obtenidos por la destilación del petróleo crudo como por ejemplo diesel y gasolina.

### **III.3. Consideraciones de termoquímica y termodinámica en el proceso de incineración**

Es importante tener en cuenta algunos conceptos termodinámicos en el estudio de la incineración. Los conceptos descritos serán enfocados específicamente a un sistema de combustión

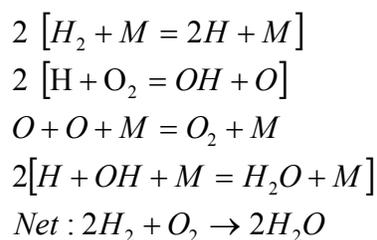
Las dos leyes básicas de termodinámica pueden ser simplemente expresada en un proceso de incineración de residuos como sigue: (Brunner, 1993)

1. En cualquier reacción la energía de entrada deberá ser igual a la energía de salida del sistema.
2. En cualquier proceso el flujo de calor deberá ser siempre de la región de más alta temperatura a la región de más baja temperatura.

### III.3.1 Estequiometria

Las ecuaciones estequiométricas son siempre ecuaciones balanceadas. Esto es, el número y tipo de átomos en los reactantes siempre es igual al número y tipo de átomos en los productos. Las reacciones químicas, incluyendo la combustión no tienen la habilidad de alterar identidades de átomos, solamente identidades moleculares. Las reacciones de combustión conservan la masa, esto es, la masa de los reactantes es igual a la masa de los productos. (Baukal, 2001)

En un proceso de combustión los mecanismos son bastantes complejos, involucrando una corta vida de las especies que no sobreviven dentro de la flama. Por ejemplo, el sistema más simple es la combustión del hidrógeno y comprende cerca de 20 reacciones elementales, algunas de estas reacciones elementales para el sistema hidrógeno - oxígeno se muestran a continuación donde el operador igual (=) distingue a estas reacciones y el operador flecha ( $\rightarrow$ ) se refiere al resultado neto



En la ecuación anterior, M se refiere a una tercera materia como la pared del reactor u otra molécula cercana que puede absorber algo de energía de la reacción, pero que participa en cierto modo. Los números precedidos de los paréntesis son usados para el balance de la reacción neta. La ecuación anterior muestra que la combustión del hidrógeno no es tan simple como  $2H_2$  con un  $O_2$  forman  $2H_2O$ , ya que cerca de 20

reacciones elementales existen para el sistema hidrógeno – oxígeno. La situación para hidrocarburos es peor, ya que en esta suceden por lo menos 100 reacciones elementales, en el caso de los residuos requieren aún de más reacciones. (Baukal, 2001)

Para encontrar la relación entre las cantidades del combustible y del comburente presentes, se utiliza la siguiente relación: (Dávila 2000).

$$\phi = \frac{\left[ \frac{\text{combustible}}{\text{comburente}} \right]_{real}}{\left[ \frac{\text{combustible}}{\text{comburente}} \right]_{teórico}} \dots\dots\dots(III.6)$$

La expresión anterior define la riqueza  $\phi$  del medio reactivo:

- Si  $\phi = 1$  se está en presencia de una mezcla que tiene una relación combustible a comburente que coincide con la estequiométrica o teórica
- Si  $\phi > 1$ , se está en presencia de una mezcla cuya relación combustible a comburente es mayor a la teórica lo que indica que es rica en combustible (y que existe como consecuencia una deficiencia del comburente)
- Si  $\phi < 1$ , se está en presencia de una mezcla pobre en combustible (existiendo un exceso de comburente)

En la incineración de residuos se debe de tomar en cuenta el calculo del exceso de aire considerando la mezcla de residuos-combustible. El cálculo de aire estequiométrico o teórico se puede calcular como: (Theodore *et al.*, 1991)

$$m_{st} = 11.5m_c + 34.5m_H - 4.29m_o - 0.97m_{cl} + 4.29m_s \dots\dots\dots(III.7)$$

Donde  $m_{st}$  es el requerimiento estequiométrico de aire por unidad de masa de la mezcla residuo-combustible (Kg aire/kg mezcla),  $m_c$  es la fracción masa de carbón (Kg

C/Kg de mezcla) y  $m_H$ ,  $m_o$ ,  $m_{cl}$ ,  $m_s$  es la fracción masa de hidrógeno, oxígeno, cloro y azufre respectivamente.

La composición del flujo de gas producido en base masa es:

$$m_{CO_2} = 3.76 m_c$$

$$m_{H_2O} = 9m_H - 0.25m_{Cl} + \{m_{H_2O,W}\}$$

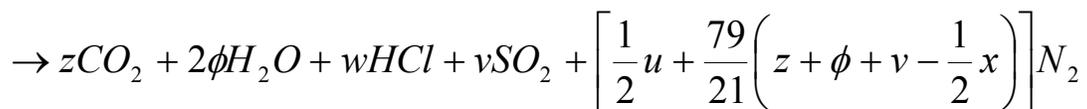
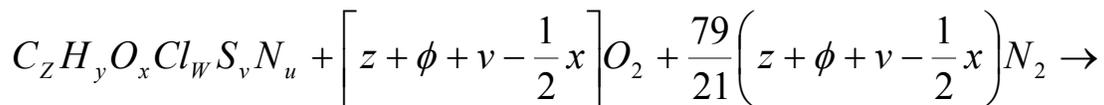
$$m_{SO_2} = 2m_S$$

$$m_{N_2} = 8.78m_C + 26.3m_H - 3.29m_O - 0.74m_{Cl} + 3.29m_S + m_{N,W}$$

$$m_{HCl} = 1.03m_{Cl}$$

Donde  $m_{CO_2}$  es la masa de  $CO_2$  en el flujo de gas (Kg  $CO_2$ /Kg mezcla),  $m_{H_2O}$ ,  $m_{SO_2}$ ,  $m_{N_2}$ ,  $m_{HCl}$  es la masa de cada producto por unidad de masa de la mezcla residuo-combustible,  $m_{N,W}$  es la fracción masa del nitrógeno en el mezcla residuo-combustible (Kg N/Kg de mezcla) y ( $m_{H_2O,W}$ ) es la fracción mezcla del agua en la mezcla del residuo-combustible (Kg  $H_2O$ /Kg de mezcla), este es usado solamente cuando parte de la fracción en peso de la mezcla residuo-combustible es expresado como agua o humedad.

Estas ecuaciones asumen que cuando hay suficiente hidrógeno disponible en la mezcla el cloro puede ser completamente convertido a ácido clorhídrico. El balance estequiométrico es: (Theodore *et al.*, 1991)



Donde  $z, y, x, w, v, u$  son los números de moles (o fracción mol) de C, H, O, Cl, S, N presente en la mezcla de residuo-combustible, respectivamente

$$y \quad \phi = \frac{1}{4} (y-w) \text{ cuando } y > w$$

$$\phi = 0 \text{ cuando } y \leq w$$

Las ecuaciones anteriores son validas cuando la combustión es completa y el aire esta constituido por el 79 % de  $N_2$  y 21 % de  $O_2$  y el oxígeno de la mezcla del residuo-combustible esta disponible para la combustión.

### III.3.2. Termoquímica

En adición a la conservación de la masa, la energía también se conserva en una reacción de combustión. Una medida de la energía química es el calor de combustión. El calor se define como la energía que se transfiere de un objeto a otro por una diferencia de temperatura. (Baukal, 2001)

El calor es energía en transito. Cuando un cuerpo absorbe calor, este almacenamiento es otra forma de energía que incrementa la temperatura del cuerpo y lo expande. Esto es porque el material usa algo de la energía térmica para elevar la temperatura y algo de energía para expandir el cuerpo en contra de la atmósfera. La misma cantidad de energía absorbida en diferentes materiales puede producir diferentes incrementos de temperatura y expansiones. Por ejemplo 100 BTU de calor pueden elevar la temperatura de 1 lb de agua por 100 °F y expandir el material de 62.4 pies<sup>3</sup> a 63.8 pies<sup>3</sup>. Los mismos 100 BTU de calor absorbido por 1 lb de aire pueden incrementar la temperatura por 400 °F y expandir el material a 13.1 pies<sup>3</sup> a 15.6 pies<sup>3</sup>. El total de energía utilizada para elevar la temperatura e incrementar el volumen es llamada entalpía (H). (Baukal, 2000)

La entalpía es una cantidad definida por la relación  $H = E + pV$  y el cambio de entalpía es  $\Delta H$ , para una reacción que se efectúa a presión constante, siendo el calor desprendido o absorbido en la reacción  $q_p$ .

$$q_p = \Delta E - p\Delta V \dots\dots\dots(III.8)$$

En una reacción química se tiene que:

$$\Delta H = H \text{ productos} - H \text{ reactivos} \dots\dots\dots(III.9)$$

$\Delta H >$  absorbe calor es endotérmica

$\Delta H <$  desprende calor es exotérmica

Existen muchos tipos de efectos de la entalpía. La entalpía latente también conocida como calor latente ( $h_f$ ) es determinada por el calor (entalpía) de condensación del agua. En muchos procesos de combustión es importante conocer el cambio de la fase de líquido vapor. El calor latente de vaporización es el calor requerido en un proceso a presión constante para completar la vaporización a una unidad masa de líquido. (Turns, 2000)

$$h_{fg}(T,P) = h_{vapor}(T,P) - h_{liquido}(T,P) \dots\dots\dots(III.10)$$

Donde  $T$  y  $P$  corresponden a la temperatura y presión de saturación. El calor de formación o entalpía de formación  $\Delta h_f$  es el calor requerido para la formación de un compuesto a partir de sus elementos constituyentes. (Castellan, 1998) Este concepto es sumamente importante ya que en este concepto se considera a la entalpía que es asociada solamente con el cambio de la entalpía sensible  $\Delta h_s$ :(Turns, 2000)

$$h_i(T) = h_{f,i}^\circ(T_{ref}) + \Delta h_{s,i}(T_{ref}) \dots\dots\dots(III.11)$$

El calor de combustión es reportado también como valor calorífico neto  $HV_N$  o valor calorífico bruto  $HV_G$ . (Baukal, 2001)

La rápida oxidación de un combustible es una reacción exotérmica. El calor (Q) es conocido como entalpía de combustión, o más específicamente calor de combustión  $\Delta h_c$ . (Castellan, 1998) Este proceso es asumido cuando se convierte completamente el carbón del residuo o del combustible auxiliar a  $CO_2$  y todo el hidrógeno es convertido a  $H_2O$ . Para que los productos salgan a la misma temperatura a la que entraron los reactantes, el calor debe de ser removido del reactor. (Turns, 2000)

$$\Delta h_c = q_{cv} = h_{\text{productos}} - h_{\text{reactantes}} \dots \dots \dots (III.12)$$

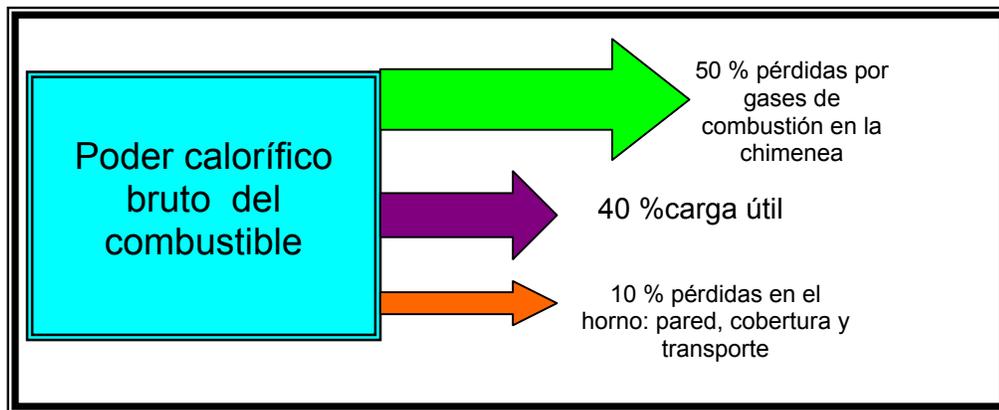
Los dos términos que con frecuencia son usados son:

- Valor calorífico bruto (HHV) o  $HV_G$ , que representa el cambio de entalpía o calor liberado cuando un compuesto es estequiometricamente sometido a una reacción de combustión y a una temperatura con el flujo final de productos también a una temperatura de referencia y agua presente en el estado líquido. (Theodore *et al.*, 1991) Este calor asume que toda el agua en los productos de combustión fue condensada a líquido. Este escenario libera la mayor cantidad de energía. (Turns, 2000)
- Valor calorífico neto (NHV) o ( $HV_N$ ) es similar al valor calorífico bruto excepto que el agua esta en estado de vapor. La diferencia entre ambos valores representa la energía necesaria para vaporizar toda el agua presente. (Theodore *et al.*, 1991)

Otro término empleado en cálculos de incineración es el calor disponible ( $HA_T$ ). El calor disponible a cualquier temperatura T es el mínimo del valor calorífico bruto requerido ( $\Sigma\Delta H$ ) para que los productos de combustión vayan de la temperatura de referencia a la temperatura T.

$$HA_T = HHV - (\Sigma\Delta H) \dots \dots \dots (III.13)$$

El calor disponible en un proceso es definido como el valor calorífico bruto del combustible menos la energía llevada afuera de la chimenea por el flujo de gases. Esta diferencia es la energía que esta disponible para realizar el trabajo, sin embargo, algo de la energía se puede perder por la conducción a través de las paredes del horno o por radiación, a través de aperturas y por infiltración de aire que puede absorber energía sensible, así como por otros tipos de pérdidas de energía que dependen del diseño del horno, de los quemadores y por el proceso de operación del horno. La distribución de la salida de energía en un sistema de combustión es mostrada usando el diagrama de Sankey como se muestra a continuación: (Baukal, 2001)



Fuente: The John Zink Combustion Handbook, 2001

Figura III.7. Diagrama de Sankey que muestra la distribución de la energía en un sistema de combustión.

En experimentos realizados con tres diferentes combustibles ( $H_2$ ,  $CH_4$  y  $C_3H_8$ ) se obtuvo que el calor disponible esta en función de la temperatura del flujo de gases por lo que a un rápido decremento del calor disponible existe un incremento en la temperatura de los gases, esto indica que la energía esta siendo llevada hacia fuera de del horno. (Baukal, 2001)

Pre calentando el aire nos da como resultado un incremento en la eficiencia global del sistema, que si se precalienta el combustible, ya que la masa del aire es mucho mayor que la masa del combustible, así que precalentado el combustible es menor la eficiencia que precalentado el aire. (Baukal, 2001)

La relación entre los diferentes términos usados en cálculos de combustión se muestra a continuación (Darryl, 1973):

Calor de combustión en el combustible	Poder calorífico bruto $HV_G$	
	Calor disponible $HA_T$	Pérdida de calor a la salida en el flujo de gases
	Poder calorífico neto $HV_N$	Calor latente de vaporización del agua $h_f$
No $H_2$ presente	Poder calorífico neto $HV_N$	

Gases a la salida	Contenido de calor $H_C$	
	Calor sensible $h_s$	Calor latente de vaporización del agua $h_f$
	Calor de combustión $h_c$	Calor presente antes de la combustión

$$HV_G = H_C$$

$$HA_T = HV_G - \text{pérdida de calor a la salida de los gases de combustión}$$

$$HV_N = HV_G - h_f$$

$$HV_N = HV_G$$

$$H_C = h_s + h_f$$

En una reacción química entre los productos de la combustión el agua está presente y puede estar en estado de vapor o líquido, dependiendo de cuanto calor es generado en el proceso. Así, si es demasiado el calor generado el agua se condensa y el calor producido es el valor calorífico bruto  $HV_G$ . Si el agua es descargada en forma de vapor en la chimenea, el calor producido es el valor calorífico neto  $HV_N$ . (Baukal, 2001)

El contenido de calor es la suma total del calor latente y el calor sensible presente en una sustancia (gas, líquido o sólido) (Von Lehmden, 1973).

**III.3.2.1. Temperatura de la flama adiabática**

Este concepto involucra que tan caliente puede ser una flama, primero hay que tener en cuenta que existe una diferencia entre el calor (Q) y la temperatura (T).

La posible temperatura de flama más alta, supone que no hay pérdida de la flama absoluta. Esta es conocida como temperatura de flama adiabática. (Baukal, 2001)

Si todo el calor liberado por la reacción viene dentro del calor de los productos de combustión, la temperatura alcanzada es definida como temperatura de flama. Si el proceso de combustión es conducido adiabáticamente, en el cual no exista transferencia de calor de los alrededores, la temperatura final alcanzada por el flujo de gas es definida como temperatura de flama adiabática. (Theodore *et al.*, 1991)

A su vez, se tienen dos temperaturas de flama adiabática: una para presión constante en el proceso de la combustión y una para volumen constante. Si la mezcla combustible - aire se encuentra a presión constante, la entalpía absoluta de los reactantes (T=298 K, P =1 Atm) a condiciones iniciales es igual a la entalpía absoluta de los productos (T= T<sub>ad</sub>, P=1 atm).

$$H_{\text{reac}}(T_i, P) = H_{\text{prod}}(T_{\text{ad}}, P) \dots \dots \dots (\text{III.14})$$

En un proceso de combustión a altas temperaturas, los productos de la combustión no son una mezcla de productos ideales como puede ser sugerido por un simple balance estequiométrico. Más bien, la mayoría de las especies se disocian produciendo una gran cantidad de especies menores. Por ejemplo los productos ideales de la combustión son CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>, y cantidades de reacciones de los productos disociados producen las siguientes especies: H<sub>2</sub>, OH, CO, H, O, N, NO y otros posibles.

La temperatura de la flama adiabática es afectada por la composición del combustible, el exceso de aire y si el aire y el combustible son precalentados. Si se comparara la

temperatura de la flama adiabática el nivel de la temperatura estará cerca de las condiciones estequiométricas, es este caso donde es justamente oxidado todo el combustible y cualquier oxidante en exceso que se adicione absorberá la energía sensible de la flama y reducirá la temperatura de la flama.

En la mayoría de las flamas reales el pico de la temperatura con frecuencia ocurre con combustibles ligeros y a condiciones por debajo de las condiciones estequiométricas. Esto es debido a la imperfección de la mezcla donde ligeramente más cantidad de  $O_2$  es necesitado para llevar a cabo la combustión de todo el combustible. Casi todas las aplicaciones de combustión industrial son realizadas en condiciones que garanticen que exista una emisión baja de CO. Por consiguiente dependiendo del diseño del quemador, la temperatura de la flama puede estar cerca de este pico, para maximizar la transferencia de calor.

Un problema que con frecuencia se encuentra al maximizar la temperatura de la flama es que a altas temperaturas se maximiza la emisión de los NOx. Los NOx se incrementan aproximadamente en forma exponencial con la temperatura del gas. Esto se tendrá que considerar en muchos conceptos de diseño para reducir los picos de temperatura de la flama y minimizar las emisiones de NOx. En experimentación con combustibles como el  $H_2$ ,  $CH_4$  y  $C_3H_8$  precalentando el aire en la combustión de los mismos se muestra que el incremento dramático de la temperatura de la flama adiabática es casi lineal.

El aire precalentado es comúnmente lo que hará que se aumente la eficiencia global del sistema así como la temperatura de flama. A su vez, si se precalienta el combustible el comportamiento anterior es semejante a éste, pero la magnitud del incremento es mucho menor que para el aire precalentado.

Precalentar el aire a una temperatura dada requiere de mucha mayor energía que precalentar el combustible a la misma temperatura debido a las diferencias en las entalpías. (Baukal, 2001)

#### III.4. Características de los residuos a incinerar

Es importante conocer las características de la composición de los residuos ya que dependiendo de su composición estos requerirán la energía necesaria para alcanzar la correcta temperatura de combustión. (EPA, 2001)

Un gran número de residuos presentan un especial problema con incineradores. Los metales, por ejemplo, se convierten en material extremadamente fino como partículas que no pueden ser colectadas por un equipo convencional de control de partículas. Cuando los residuos contienen una cantidad significativa de concentraciones de compuestos halogenados, la formación no deseable de productos de combustión, tales como ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, ácido bromhídrico y  $\text{SO}_2$  se pueden dar. Por lo tanto es necesario conocer la fracción orgánica e inorgánica de los residuos, así como la fracción húmeda del mismo. (Theodore *et al.*, 1991)

Los residuos deben ser combustibles para poder ser destruidos, de esta forma los productos primarios de la combustión son el dióxido de carbono, el vapor de agua y las cenizas inertes. (Tchobanogluos *et al.*, 1991) Por lo que el residuo ideal para incineración, desde un punto de vista económico, es aquél que contenga una alta proporción de materia orgánica y poca humedad así como pocos inertes, de forma que pueda ser quemado sin el empleo de combustible adicional y con el aprovechamiento del poder calorífico propio, para dar lugar a un residuo fino cuyo volumen no represente más que una pequeña fracción. (Rodríguez *et al.*, 1998)

Las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas de los residuos tienen que considerarse en el diseño básico de un incinerador. (Malone *et al.*, 1991)

Los porcentajes de carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, halógenos, fósforo, cenizas, metales en los residuos, así como el contenido de humedad, son necesarios para conocer y calcular los requerimientos del aire de combustión y predecir el flujo y la composición de los gases de combustión.

Es necesario conocer el poder calorífico de los residuos a incinerar. El calor de combustión o poder calorífico es la cantidad de calor que se origina en la combustión de una unidad de masa de un combustible (kcal/kg). ( Storch, 1998)

El poder calorífico superior (PCS) se define suponiendo que el agua procedente del combustible, o formada en el curso de la combustión (combustión del hidrógeno), se encuentra en su totalidad en estado líquido en los productos de la combustión. Por lo tanto comprende el calor de vaporización del agua contenida en los productos de la combustión.

El poder calorífico inferior o neto (PCI) se define suponiendo que el agua procedente del combustible, o formada en el curso de la combustión, queda en el paso final en estado de vapor en los productos de la combustión. Por tanto, no comprende el calor de vaporización del agua contenida en los productos de la combustión. En la práctica el PCS se mide directamente y el PCI se calcula a partir del poder calorífico total y equivale al calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de un combustible sólido. (NOM-AA-33-1985)

$$PCI = PCS - 10.3 (\% H \times 9) \dots \dots \dots (III.15)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior en cal/g, 10.3 es un factor de conversión de los BTU del agua resultante de la combustión del hidrógeno, más la humedad del combustible, por unidad de peso del combustible, H es el % de hidrógeno y g es el factor de conversión que toma en cuenta el calor latente de vaporización del agua.

En el proceso de incineración se utiliza el PCS que representa la energía total disponible en el combustible y el PCI revela el funcionamiento real del horno. Para obtener estos valores se utiliza una bomba calorimétrica la cual mide la variación de temperatura, ocasionada por el calor desprendido o absorbido durante el proceso que se lleva cabo en ella, esta es un recipiente que se encuentra aislado del medio ambiente por medio de una cubierta adiabática.

El primer paso para calcular el efecto térmico de cualquier proceso, es determinar la constante del calorímetro “C” que es la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura del recipiente calorimétrico en 1 °C. Esto se realiza, efectuando un proceso cuyo efecto térmico Q es exactamente conocido o pasando una cantidad conocida de corriente eléctrica a través de la resistencia colocada dentro de la bomba calorimétrica; determinando la diferencia de temperaturas ΔT podemos calcular C por medio de la siguiente ecuación y conociendo esta constante, al efectuar cualquier otro proceso para determinar su efecto térmico, basta con determinar la diferencia de temperaturas ΔT y calcular el efecto térmico de cualquier proceso. (Burmistrova, 1977)

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \dots\dots(III.16)$$

$$Q = C\Delta T \dots\dots(III.17)$$

El poder calorífico es importante ya que puede ser relacionado para obtener un parámetro de la incinerabilidad de los residuos de la siguiente manera (Brunner, 1993):

$$I = C + \left( \frac{a}{H} \right) \dots\dots(III.18)$$

Donde I es un indicador de incinerabilidad, a es una constante con un valor de 100 Kcal/gramo, H es el poder calorífico Kcal/gramo y C es la Concentración en % peso.

Cabe mencionar que este indicador fue desarrollado para la combustión de residuos peligrosos y en donde C es el % de la concentración del componente más peligroso dentro del residuo. Un ejemplo de la aplicación de este indicador se muestra en la tabla III.1.:

Tabla III.1 Indicadores de incinerabilidad

Componente	Concentración en % peso (C)	Poder calorífico Kcal/gramo (H)	Indicador de incinerabilidad (I)
Diclorometano	1.7.	1.7	60.5
DDT	2	4.51	24.2
Tribromometano	0.1	0.13	769.3

Por lo tanto entre mayor sea el indicador de incinerabilidad más difícil es la incineración del residuo.

Los residuos a incinerar tendrán por lo tanto que ser caracterizados basándose en los siguientes parámetros: (Brunner, 1993)

1. Parámetros generales: composición de los residuos en fracción seca, incluyendo el porcentaje de los subproductos.
2. Parámetros físicos: total de residuos, peso volumétrico y cenizas.
3. Parámetros químicos: en general los constituyentes químicos (CHONSP), poder calorífico, fracción de los componentes orgánicos e inorgánicos.

### III.5. Proceso para la formación de emisiones en la combustión de residuos sólidos

Una clase especial de reacciones y procesos de la combustión es importante de considerar, la cual consiste en la secuencia de las reacciones resultantes de la formación de emisiones atmosféricas incluyendo partículas, metales pesados, óxidos de nitrógeno, gases ácidos, monóxido de carbono y orgánicos como hidrocarburos poliaromáticos (PAH's), dioxinas y furanos. (Tillman, 1991)

### III.5.1. Emisiones de partículas

Existen tres mecanismos de formación que dominan la creación de partículas en la combustión de sólidos.

El primer mecanismo es simplemente la entrada de partículas finas del combustible y de material inerte en los productos gaseosos de la combustión dentro del incinerador. Bajo estas condiciones el primer mecanismo de formación es la pirolisis del combustible, y donde las partículas son llevadas fuera del horno lo suficientemente rápido como materia carbonizada no oxidada.

El segundo mecanismo es similar al primero, excepto que las partículas finas del combustible son oxidadas, dejando solamente residuos inertes como cenizas. Estos dos mecanismos aplican a todo sistema básico de residuos sólidos.

El tercer mecanismo en la generación de partículas involucra la pirolisis del combustible dentro de la gran cadena de volátiles condensables, si estos volátiles entran a la región de enfriamiento del incinerador estos se pueden condensar, esta condensación puede ser promovida por la presencia de partículas sólidas inertes, poniendo así un escenario donde la condensación es favorecida.

Los siguientes parámetros influyen en la tasa de generación de partículas de incineración de residuos sólidos:

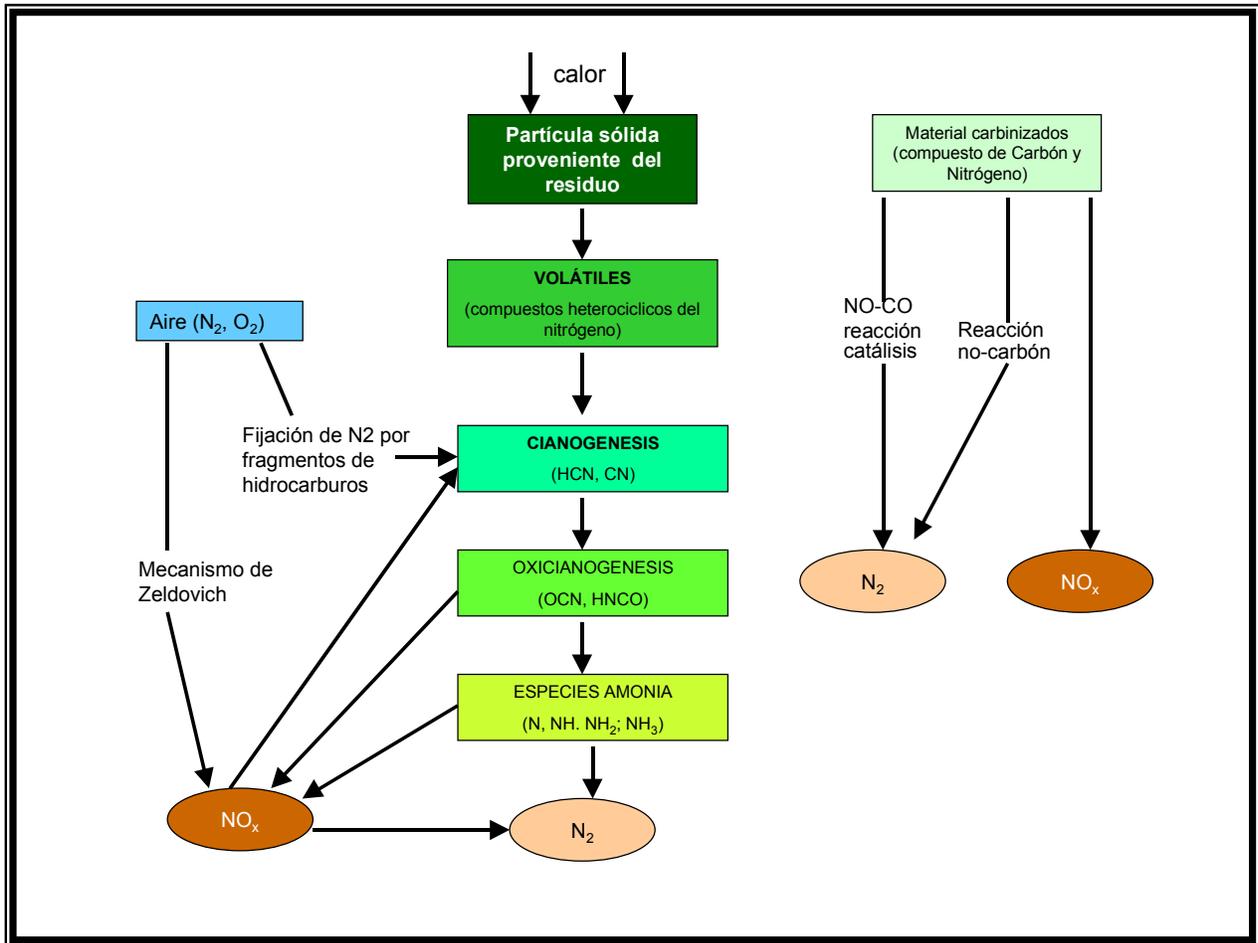
- La dimensión de las partículas del combustible
- El contenido de cenizas en el residuo
- La temperatura del horno
- La turbulencia y un adecuado mezclado dentro del incinerador.
- La distribución del aire dentro del incinerador en particular la distribución del aire primario y del aire secundario.
- El tiempo de residencia

### III.5.2. Emisiones de óxidos de nitrógeno

Los NO<sub>x</sub> se refieren a los óxidos de nitrógeno, generalmente el monóxido de nitrógeno, también conocido como óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), también se pueden incluir los N<sub>2</sub>O óxidos nitrosos, así como otras mínimas combinaciones de nitrógeno y oxígeno como el tetraóxido de dinitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). (Baukal, 2001)

En procesos de combustión a temperatura altas la mayoría de los NO<sub>x</sub> existen a la salida de las chimeneas en forma de NO. El NO es un gas incoloro que rápidamente se combina con el O<sub>2</sub> de la atmósfera para formar NO<sub>2</sub>, en la baja atmósfera, el NO reacciona con él oxígeno para formar ozono en adición al NO<sub>2</sub>, el NO<sub>2</sub> es extremadamente reactivo y es un fuerte oxidante. El NO<sub>2</sub> también se descompone en contacto con el agua para producir ácido nitroso (HNO<sub>2</sub>) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) los cuales son altamente corrosivos. (Never, 1998)

Muchos procesos de combustión son operados a elevadas temperaturas y altos niveles de exceso de aire por lo que los productos de combustión pueden tener largos tiempos de residencia en la cámara de combustión. Estas condiciones producen altas eficiencias térmicas. Las condiciones anteriores favorecen la formación de NO<sub>x</sub>, en la figura III.8. se muestra los mecanismos de formación de los óxidos de nitrógeno.



Fuente: The John Zink Combustion Handbook, 2001

Figura III.8. Rutas alternativas para la formación de óxidos de nitrógeno en la combustión de residuos sólidos.

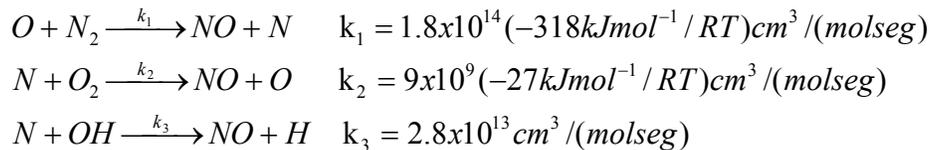
Como se menciona en procesos de combustión la mayoría de los NO<sub>x</sub> están en forma de NO (Gardiner, 1999) por lo que este trabajo se enfocará a discutir los mecanismos de producción y remoción de NO.

Existen tres mecanismos de formación de NO: térmico, inmediato y del combustible.

El NO térmico es formado por la reacción a altas temperaturas del nitrógeno con el oxígeno vía el mecanismo conocido como el de Zeldovich: (Baukal, 2001)

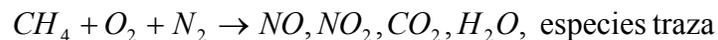
El NO térmico se incrementa exponencialmente con la temperatura por encima de los 1100 °C, este es generalmente un mecanismo predominante en el proceso de la combustión. Esto significa que este mecanismo es el más importante cuando se precaliente el aire o exista exceso de oxígeno en el aire de combustión que será usado, lo cual normalmente incrementa la temperatura de la flama.

El NO térmico o de Zeldovich es formado por las siguientes reacciones:



El nombre térmico es usado porque las reacciones anteriores tienen una muy alta energía de activación debido al triple fuerte enlace en la molécula de N<sub>2</sub>. La temperatura depende de la velocidad de coeficiente k<sub>1</sub>. (Warnatz, *et. al.*, 1999)

El NO inmediato o de Fenimore se forma por la reacción rápida entre el nitrógeno, el oxígeno y los radicales de hidrocarburo. Este mecanismo fue formulado por C.O. Fenimore (1979) el cual midió la formación del NO cerca de la flama. Representado por la siguiente reacción (Warnatz *et. al.*, 1999):

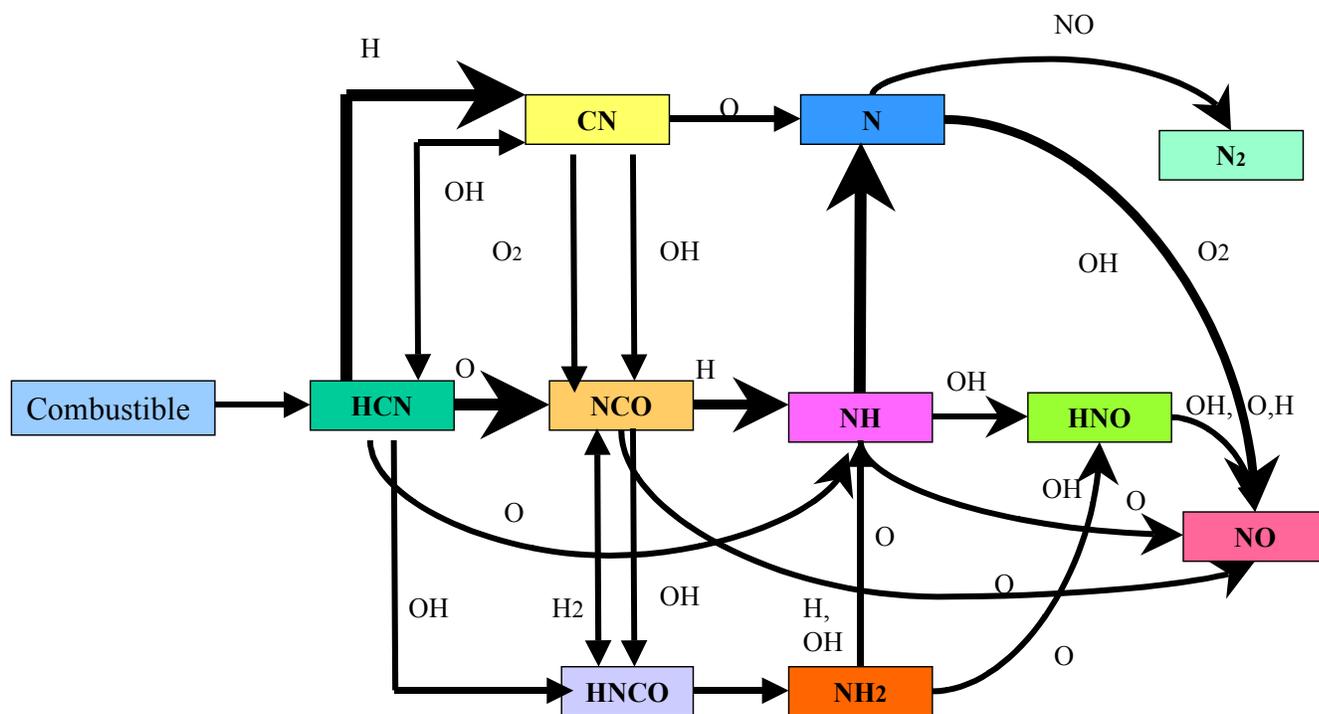


En realidad el mecanismo anterior es un proceso complicado que consiste de cientos de reacciones. Los radicales de hidrocarburos son especies intermedias formadas durante el proceso de combustión. El NO inmediato es generalmente un importante mecanismo a baja temperatura en procesos de combustión. Por lo que se dice que la producción de NO inmediato sólo depende en forma débil de la temperatura. (Nevers, 1998)

El NO del combustible es formado por la oxidación directa de compuestos orgánicos de nitrógeno contenidos en el combustible, los cuales se demuestran en la siguiente reacción:



En realidad existen muchas reacciones intermedias, por esto los mecanismos de formación de los NO del combustible se muestran a continuación en la figura III.9.



Fuente: The John Zink Combustion Handbook, 2001

Figura III.9. Mecanismos de formación del NO del combustible

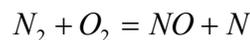
El NO que se forman a partir del contenido de nitrógeno en los combustibles no involucran a los combustibles gaseosos de alta calidad tales como el gas natural o el propano, los cuales normalmente no contienen mucho nitrógeno.

Sin embargo la formación de NO a partir de combustibles tales como aceite, carbón y residuos de aceite que son usados pueden contener cantidades significativas de nitrógeno. (Baukal, 2001)

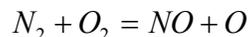
### III.5.2.1. Factores importantes que afectan los NOx

Existen muchos factores que tienen un impacto en la formación de NOx. éstos incluyen la oxidación y la composición del combustible así como las temperaturas, el contenido de oxígeno, el nivel del combustible que es oxidado, el diseño de quemadores, el horno y la temperatura del flujo de gases, y los parámetros de operación del sistema de combustión. (Nevers, 1998)

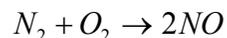
Considerando que un proceso de combustión la emisión de NOx está referida a NO y que el NO formado de una reacción a alta temperatura de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> involucra la ruptura de la triple ligadura del nitrógeno N≡N por un átomo de oxígeno.



A su vez el radical de nitrógeno reacciona con un oxígeno disponible:



Adicionando ambas ecuaciones dando el nivel global de la reacción:



Los principios fundamentales de la cinética formulan la tasa de reacción, en general la tasa de reacción de una reacción elemental  $rR + sS = pP + qQ$  esta dada por la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{d[P]}{dt} = k_f [P]^p [Q]^q - k_r [R]^r [S]^s \dots\dots\dots(III.19)$$

Donde P y Q son las especies producto, R y S son especies reactantes, t es el tiempo,  $k_f$  es la constante, las pequeñas letras son los coeficientes estequiométricos de las especies y los paréntesis denotan un volumen seco de concentración, para la ecuación de formación de NO lo anterior se refleja de la siguiente manera:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_f [N_2][O] \dots\dots\dots(III.20)$$

No obstante la  $[O]$  no es conocida por no poderse medir. Sin embargo se asume que existe un equilibrio parcial entre el oxígeno molecular y el oxígeno atómico esto es  $0.5 O_2 \rightarrow O$  las constantes pueden ser combinadas  $k = k_f \times K$ .

La relación de las constantes con la temperatura es  $k = AT^n e^{-(b/T)}$  donde A, b y n, son constantes y T es la temperatura absoluta, para el caso del NOx térmico,  $n = 0$ , y haciendo esa substitución da la siguiente ecuación:

$$d[NO] = Ae^{\frac{b}{T}} [N_2] \sqrt{[O_2]} dt \dots\dots\dots(III.21)$$

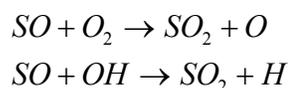
Esta ecuación no puede ser integrada porque la temperatura actual, el oxígeno y el tiempo están dentro de la difusión turbulenta de la flama la cual no es conocida. Sin embargo la ecuación anterior muestra que el incremento de la temperatura, la concentración de oxígeno o el tiempo incrementan la formación de NO. Consecuentemente la estrategia de reducción de formación NO esta en el control de esos factores. (Baukal, 2001)

Experimentaciones realizadas nos dicen que el NO están en función de la flama estequiométrica aire/combustible. El equilibrio adiabático de la temperatura de la flama es una función de la relación de la flama equivalente, ya que la temperatura de la flama

depende de las condiciones estequiométricas que se estén dando en el incinerador. La temperatura de los gases influye en la formación de NO. El nivel de NO se incrementa rápidamente cerca de los 1000 °C. La modificación de la combustión es una estrategia para reducir los NO (Warnatz, *et.al.* 1999) ya que involucra reducir la temperatura de la flama, por ejemplo una estrategia es inyectar agua dentro de la flama para reducir los NO por enfriamiento para hacer bajar la flama a menor temperatura donde la formación de los NO es menos favorable. (Baukal, 2001)

### III.5.3. Emisiones de gases ácidos

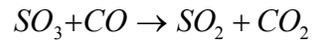
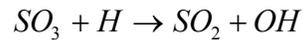
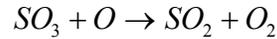
Los gases ácidos formados por la combustión de residuos sólidos incluyen dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) ácido sulfúrico, ácido clorhídrico (HCl) y ácido fluorhídrico (HF). Todas estas emisiones gaseosas son formadas en función de la cantidad de azufre, cloro y flúor contenida en el residuo, en general los halógenos actúan como un oxidante, consecuentemente la formación de HCl y HF son reacciones en fase gas homogéneas, el hidrógeno es preferentemente oxidado por el cloro y el flúor mucho mas que el oxígeno. Las moléculas de azufre son inicialmente oxidadas a SO<sub>2</sub>, entonces la formación de SO<sub>2</sub> puede ocurrir por las siguientes reacciones:



La formación del trióxido de azufre se muestra a partir de la siguiente ecuación:



El trióxido de azufre será convertido a dióxido de azufre por cualquiera de las siguientes reacciones:



Uno puede considerar que todo el azufre orgánico contenido en el combustible es convertido a óxido de azufre, y que el  $SO_3$  en los gases productos de la combustión estarán solamente en un 8-10 % del total de óxidos de azufre.

Los gases ácidos se pueden controlar por la reacción con calcio en la forma de  $CaO$  o  $CaCO_3$ . La combustión convencional utiliza el control del  $SO_2$  en la post combustión.

#### III.5.4. Monóxido de carbono y emisiones orgánicas

El monóxido de carbono e hidrocarburos no condensables tales como hidrocarburos poliaromáticos y dioxinas y furanos son las típicas emisiones de la combustión de residuos.

Las causas de las emisiones de monóxido de carbono, en general, están asociadas con las condiciones de combustión incluyendo: (Tillman, 1991)

- 1) Un inadecuado suministro de aire de combustión con un combustible rico dentro del incinerador y resultando una oxidación incompleta.
- 2) Temperatura de combustión lo suficientemente baja para que las reacciones de combustión tomen lugar muy lentamente por lo que consecuentemente darán origen a una combustión incompleta.
- 3) Insuficiente turbulencia en el combustor, resultado de una inadecuada mezcla y por consiguiente la presencia de combustible rico o zonas frías dentro del incinerador.

Por lo anterior el monóxido de carbono resulta de las condiciones de una combustión incompleta derivado por las bajas temperaturas y/o tiempo inadecuado de residencia, por lo que estas emisiones son minimizadas con temperaturas superiores a los 900 °C

y tiempos de residencia de 1 segundo con una completa mezcla de combustible y oxidantes, por lo que el control de estas emisiones, esta en función de las buenas practicas de combustión. (Seeke *et. al.*, 1987).

### III.6. Marco Normativo

En México existe un proyecto de norma NOM-098-ECOL-2000 que establece las especificaciones de operación, así como los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para las instalaciones de incineración de residuos.

En ésta se dan los lineamientos para el diseño, equipamiento y funcionamiento de las instalaciones de incineración que deben permitir que la temperatura de los gases derivados de la incineración de los residuos se eleve, tras la última inyección de aire de combustión, de manera controlada y homogénea, aún en las condiciones más desfavorables, hasta por lo menos 850 °C, alcanzados en o cerca de la pared interna, de la cámara de combustión final, durante un tiempo mínimo de por lo menos dos segundos, referido a un 7 por ciento mínimo de oxígeno. En el caso de que se incineren residuos peligrosos que contengan sustancias cloradas, la temperatura debe elevarse hasta por lo menos 1000 ± 100 °C, con un tiempo mínimo de residencia de 2 segundos. La temperatura máxima de los gases antes del equipo de control de emisiones y, en su caso, a la salida de la chimenea debe ser menor a 250 °C. Los límites máximos permisibles de emisiones se presentan en la tabla III.2.

Tabla III.2. Límites máximos permisibles de emisiones provenientes de incineración

CONTAMINANTE	LÍMITE DE EMISIÓN	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	NORMA QUE APLICA O MÉTODO
CO (mg/m <sup>3</sup> )	63	CONTINUO	INFRARROJO NO DISPERSIVO ANEXO 1
HCl (mg/m <sup>3</sup> )	15	SEMESTRAL	NMX-AA-070-1980
NOx (mg/m <sup>3</sup> )	300	SEMESTRAL	QUIMILUMINISCENCIA ANEXO 2

CONTAMINANTE	LIMITE DE EMISIÓN	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	NORMA QUE APLICA O MÉTODO
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	80	SEMESTRAL	NMX-AA-55-1979
PARTICULAS (mg/m <sup>3</sup> )	50	SEMESTRAL	NMX-AA-10-1974

Tabla III.2. Límites máximos permisibles de emisiones provenientes de incineración (cont.)

CONTAMINANTE	LIMITE DE EMISIÓN	FRECUENCIA DE MEDICIÓN	NORMA QUE APLICA O MÉTODO
ARSENICO SELENIO COBALTO NIQUEL MANGANESO ESTAÑO (mg/m <sup>3</sup> )	0.7*	SEMESTRAL	METODO CENICA-MEPE-05 ANEXO 3
CADMIO (mg/m <sup>3</sup> )	0.07	SEMESTRAL	METODO CENICA-MEPE-05 ANEXO 3
PLOMO CROMO total COBRE ZINC (mg/m <sup>3</sup> )	0.7*	SEMESTRAL	METODO CENICA-MEPE-05 ANEXO 3
MERCURIO (mg/m <sup>3</sup> )	0.07	SEMESTRAL	METODO CENICA-MEPE-05 ANEXO 3
DIOXINAS Y FURANOS EQT (ng/m <sup>3</sup> )	0.5	ANUAL	METODO CENICA-DYF-05 ANEXO 4

Todos los valores están referidos a condiciones estándar (1 atmósfera, base seca 25°C) y 7% de O<sub>2</sub>), de acuerdo a la NOM-085-ECOL-1994.

Las pruebas de incinerabilidad deben de llevarse a cabo en todos los incineradores de residuos lo cual se realiza para verificar que el incinerador es capaz de operar de acuerdo con los estándares de funcionamiento descritos en la normatividad y para demostrar una eficacia de destrucción y eliminación para los principales componentes

orgánicos contenidos en el residuo por lo que se debe de realizar un análisis de los gases de combustión de la unidad de funcionamiento. (La Grega, 1996)

En Europa se implementará en diciembre del 2002 el Lineamiento de residuos (también conocido como EU WID por sus siglas en inglés) en todas las plantas de incineración instaladas en Europa. Este reglamento surge debido a la preocupación del público en general en conseguir niveles muy bajos de emisiones contaminantes resultado de diferentes tipos de procesos de incineración. Inicialmente se aplicaba sólo a los procesos de incineración de residuos municipales; sin embargo, es posible implementarlo para las plantas dedicadas a la incineración de residuos clínicos y peligrosos así como en procesos de co-incineración (hornos de cemento por ejemplo), así como en industrias de tratamientos térmicos como la gasificación o la pirólisis.

Existen dos lineamientos con los que se puede comparar el nuevo reglamento 2000/76/EC como se muestra en la tabla III.3.

Tabla III.3. Límites máximos permisibles en Europa

Especies	Unidades	Reglamento								
		89/369/EEC			94/67/EC			2000/76/EC		
		7 días	24 hrs	1hr	1 día	30 min	97%	1 día	30 min	97%
Partículas	mg/m <sup>3</sup>	30	42		10	30	10	10	30	10
HCl	mg/m <sup>3</sup>	50	65		10	60	10	10	60	10
CO	mg/m <sup>3</sup>			100	50	100		50	100	150
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>			300	50	200	50	50	200	50
COT	mg/m <sup>3</sup>			20	10	20	10	10	20	10
HF	mg/m <sup>3</sup>			2	1	4	2	1	4	2
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>							200	400	200
NH <sub>3</sub>	mg/m <sup>3</sup>							10	20	10
Cd+Tl	mg/m <sup>3</sup>			0.2	0.05	0.1			0.05	
Hg	mg/m <sup>3</sup>			0.2	0.05	0.1			0.05	
Dioxinas y Furanos	ng/m <sup>3</sup>				0.1	0.1			0.1	

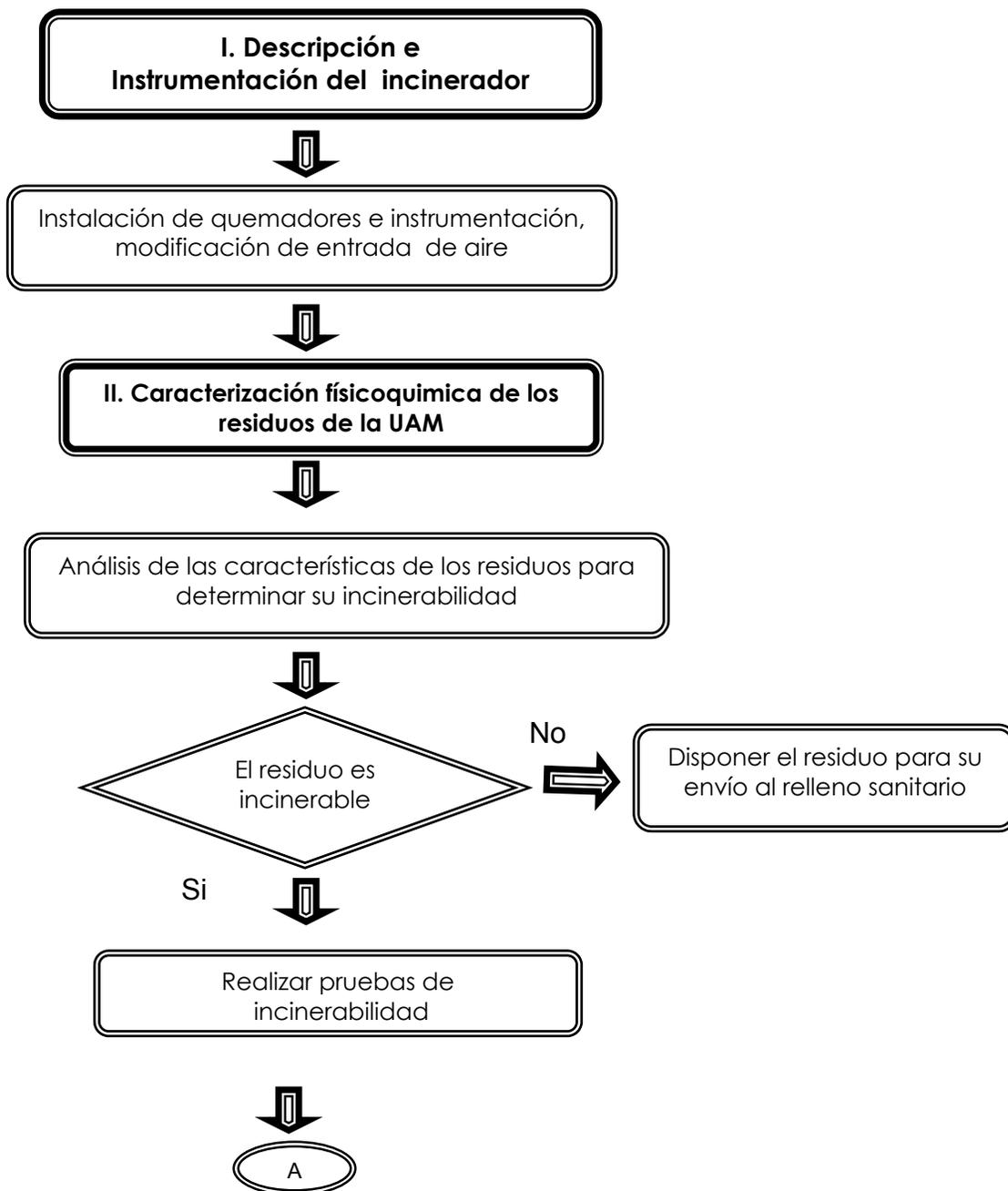
Como se observa, la reglamentación es más estricta en Europa que en México, y para cumplir con las restricciones enlistadas anteriormente se requiere diseñar muy bien los incineradores, lo cual no es tan simple y demanda grandes inversiones. El principal problema es la necesidad de un monitoreo constante de los principales contaminantes.

IV. Metodología .....	54
IV.1. Descripción e Instrumentación del incinerador .....	56
IV.1.1. Cámaras .....	56
IV.1.2. Parrillas .....	56
IV.1.3. Recolección de cenizas .....	58
IV.1.4. Chimenea.....	58
IV.1.5. Quemadores .....	59
IV.1.6. Controles instalados.....	60
IV.2. Caracterización fisicoquímica de residuos de la UAM.....	62
IV.2.1. Caracterización física.....	63
IV.2.2. Caracterización química.....	64
IV.2.3. Poder calorífico .....	67

---

## IV. Metodología

La metodología a seguir en este trabajo de tesis se presenta a continuación:



A



**III. Pruebas de incinerabilidad**



Seleccionar 30 Kg de residuos con un determinado PCS



**A.** *Determinar el tiempo de quemado*



**B.** *Variar en un 25%, 50% y 75% la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador, sin precalentamiento para obtener la condición óptima de entrada de aire*



**C.** *Variar en un 25%, 50% y 75% la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador, con precalentamiento para obtener la condición óptima de entrada de aire*



**D.** *Obtener la influencia cuando se alimenta al incinerador 50 % molida y 50% entera*



**E.** *Determinar si las condiciones obtenidas anteriormente aplican para otros residuos con diferente indicador de incinerabilidad*



**F.** **Análisis de los resultados para obtener las condiciones óptimas de incineración para un residuo específico**

## **IV.1. Descripción e Instrumentación del incinerador**

Se realizó la adecuación del incinerador marca GOODRICH de doble cámara y doble pared existente en el laboratorio de incineración del Departamento de Energía de la UAM-A, la cual se describe a continuación.

### **IV.1.1. Cámaras**

El incinerador cuenta con dos cámaras:

- a) La cámara primaria donde se lleva a cabo la incineración de los residuos, tiene un volumen de  $1\text{m}^3$ , el material de construcción es de ladrillo refractario de alta calidad, la cual se muestra en la figura IV.1
- b) La cámara secundaria, mostrada en la figura IV.2, donde se realiza la incineración de los gases de combustión, cuenta con un volumen de  $0.40\text{ m}^3$ , el material de construcción es de ladrillo refractario de alta calidad.

La entrada de aire a estas cámaras es a través de la doble pared y por las rejillas metálicas de  $0.20 \times 0.20\text{ m}$  con 40 agujeros de  $\frac{1}{2}$  " cada uno, distribuidas a lo largo de la pared exterior del incinerador.

### **IV.1.2. Parrillas**

El incinerador cuenta con tres parrillas una en la parte inferior de la cámara primaria cuyas dimensiones son  $1.03 \times 1.33 \times 0.49\text{ m}$ , una en la parte superior de la cámara primaria de  $1.03 \times 0.80 \times 0.45\text{ m}$  con un espaciamiento entre ellas de  $0.49\text{ m}$  y la tercera de  $1.03 \times 0.80 \times 0.49\text{ m}$  que se encuentra en la parte inferior de la cámara secundaria. La segunda y la tercera parrilla cuentan con un espacio de  $0.48\text{ m}$ .

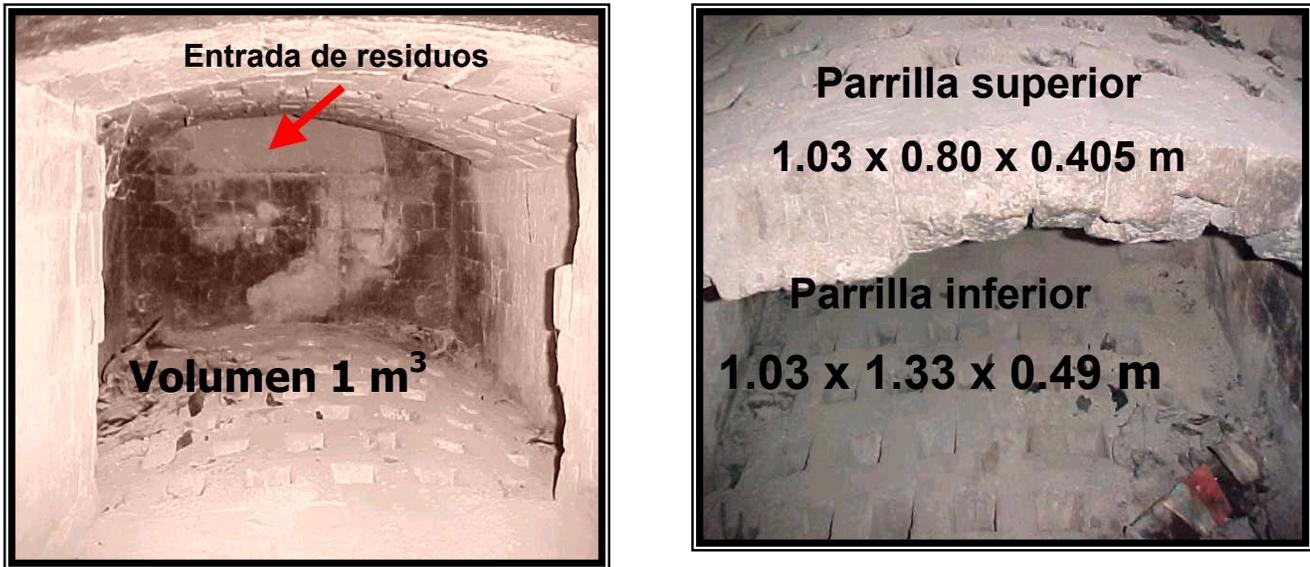


Figura IV.1. Cámara primaria del incinerador de la UAM-A

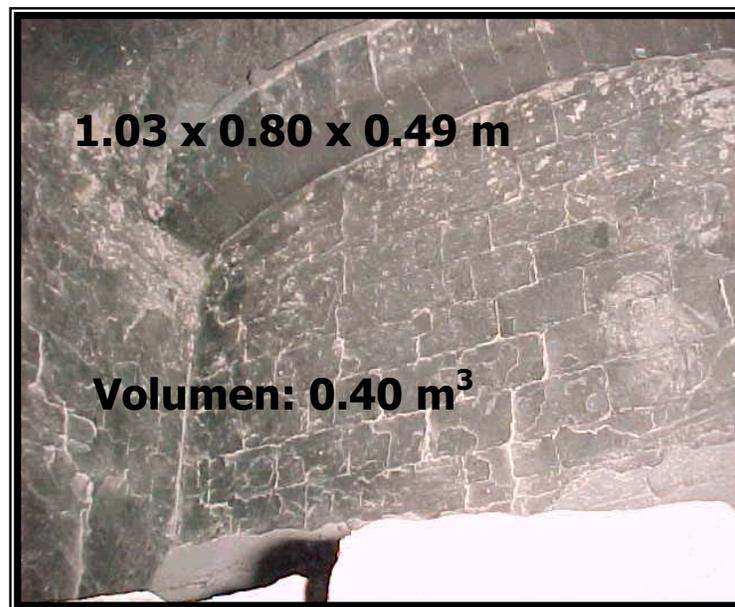


Figura IV.2. Cámara secundaria del incinerador de la UAM-A

### IV.1.3. Recolección de cenizas

El incinerador cuenta con una cámara de recolección de cenizas de  $0.5 \text{ m}^3$  en la parte inferior del mismo, cuyas dimensiones son de  $1.03 \times 1.33 \times 0.39 \text{ m}$ , ésta cuenta con dos puertas tipo cenicero de lamina para el retiro manual de las cenizas.

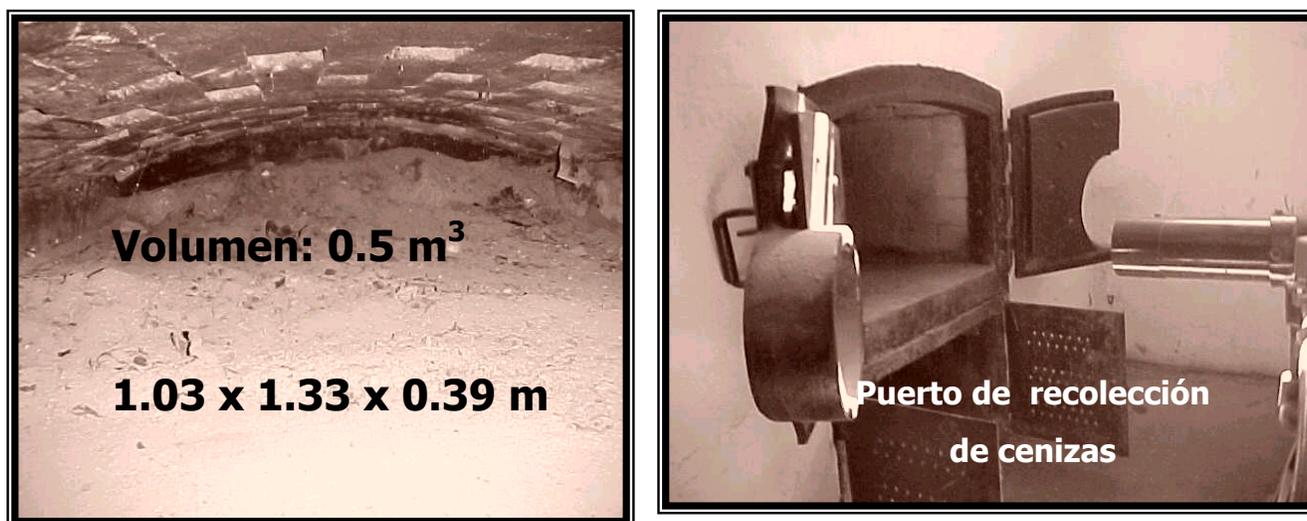


Figura IV.3. Cámara de recolección de cenizas del incinerador de la UAM-A

### IV.1.4. Chimenea

La chimenea está construida de ladrillo refractario de alta calidad, con las siguientes dimensiones  $0.52 \text{ m} \times 0.52 \text{ m}$  de ancho por  $5.1$  metros de altura. El diámetro equivalente es  $0.52 \text{ m}$  el cual fue calculado por la norma NMX-AA-009-1993-SCFI “Determinación de flujo de gases en un conducto por medio de tubo pitot”. Los puertos y plataforma de muestreo se colocaron también los calculado y recomendado en la norma anterior, obteniéndose lo siguiente:

- DISTANCIA A ( del puerto de muestreo a la salida de la chimenea): **1.1 m**

Veces el diámetro equivalente **A: 2.019**

- DISTANCIA B (de la ultima perturbación al puerto de muestreo): **4.05 m**  
 Veces el diámetro equivalente **B: 7.788**

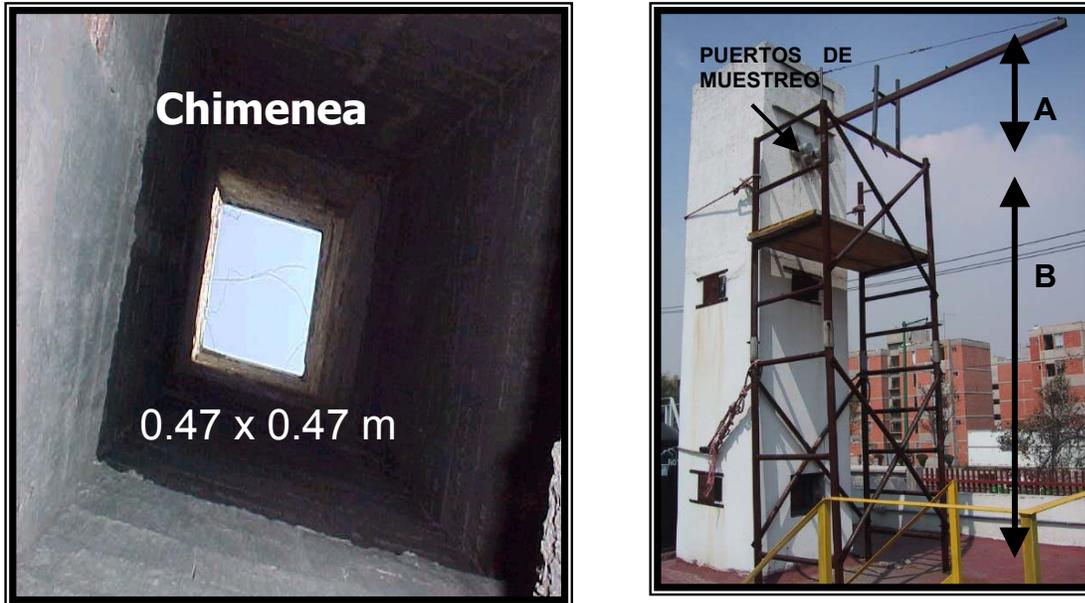


Figura IV.4. Chimenea con sus puertos y plataforma de muestreo

#### IV.1.5. Quemadores

Se retiraron dos quemadores obsoletos que tenían aproximadamente 10 años de no ser usados y cuya operación era totalmente manual y se procedió a hacer un estudio de la viabilidad para la automatización del incinerador con dos quemadores (los más sencillos que hay en el mercado) de tipo cañón, así como, desarrollar un circuito de control para su operación automática mediante pirómetros y controles de falla de flama en ambos quemadores.

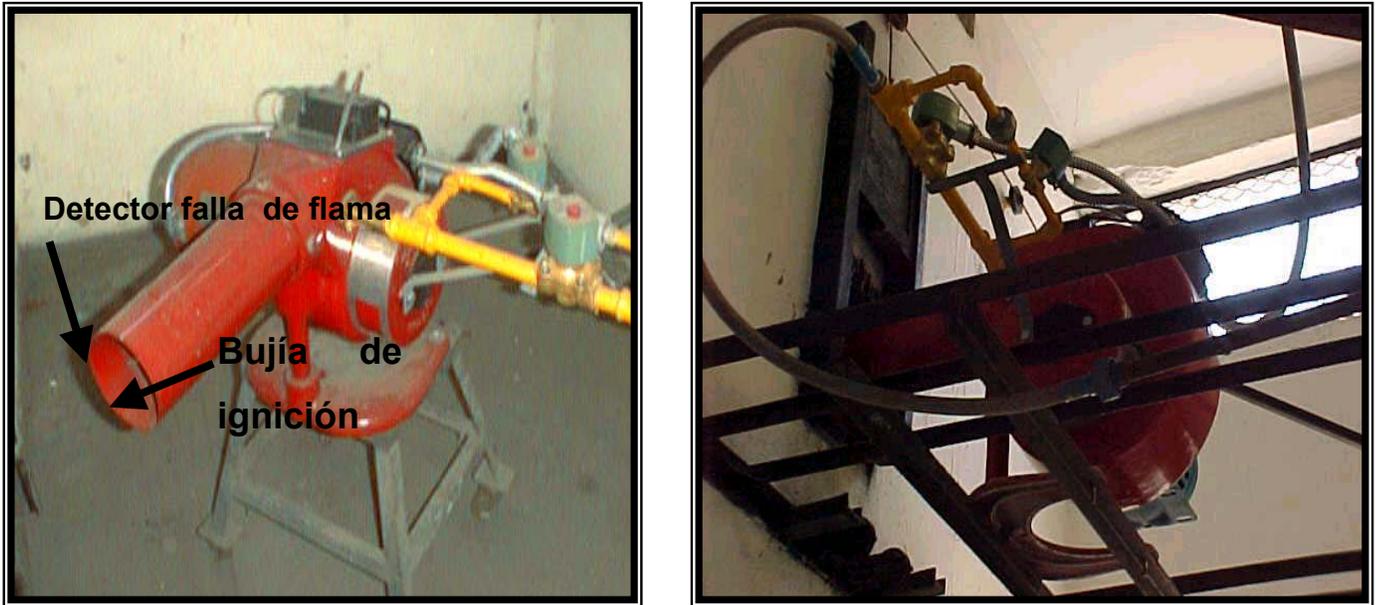


Figura IV.5. Quemadores de la cámara primaria y la cámara secundaria respectivamente

Los quemadores son de la marca COMOSA, y vienen integrados con un ventilador que produce el aire primario para la combustión, el quemador de la cámara secundaria tiene un rango de 1,200,000 a 1,500,000 BTU/hora y el quemador de la cámara primaria tiene una capacidad de 800,000 a 1,000,000 BTU/hora. Ambos quemadores funcionan con gas L.P. o gas natural.

#### IV.1.6. Controles instalados

Los controles instalados fueron:

- **Control de falla de flama:** Existen en el mercado infinidad de controles de falla de flama, pero para nuestras necesidades requeríamos de un control que sin ser muy sofisticado fuera un aparato eficiente que nos garantice un control del quemador exacto y seguro en cuanto a su operación; en este caso se optó por un control marca Honeywell modelo RA890-F que es un aparato al cual efectuando las conexiones eléctricas necesarias indicadas por el fabricante, nos

dará un juego de encendido (piloto) y después de aproximadamente 3 segundos entrega la señal de apertura de la flama principal esto es el encendido total con seguridad. El aparato cuenta con un sensor que está instalado en el cañón del quemador que registra una señal directamente de la flama, la cual llevada al control realiza lo que se llama detección de flama, misma que permite que el quemador se quede encendido al abrir el circuito de encendido.

- **Pirómetro:** Es un dispositivo cuya función es registrar la temperatura que se produce en las cámaras de combustión, mediante un sensor llamado termopar o termocople; Existen diferentes tipos de sensores, en nuestro caso se instaló un termopar tipo K, que tiene una aleación de cromel alumen y cuyo rango de lectura está entre 300 °C a 2000 °C. El pirómetro instalado para la cámara secundaria es de la marca BARBER-COLMAN, con el mismo rango de registro de temperatura.
  
- **Contactores:** Cada motor requiere de un contactor que controla el encendido del motor del quemador sin que la corriente de este pase por el control de falla de flama para evitar posibles daños en este control, que es el más importante del sistema, esto es el control opera al contactor y el cual a su vez opera el motor del quemador.
  
- **Timer:** Es un controlador de tiempo que en este caso tendrá la función de controlar el encendido de cualquiera de los quemadores, evitando que enciendan sin que en el incinerador se produzca un tiempo de purga o barrido de los gases existentes dentro del mismo, haciendo funcionar únicamente el ventilador del quemador de la cámara secundaria para extraer cualquier residuo de gases combustibles que pudiera existir en el incinerador. El tiempo de barrido es de 30 a 60 segundos.

- **Válvulas:** Sirven para regular el caudal de combustible y dosificar con precisión la cantidad de combustible a suministrar al quemador.

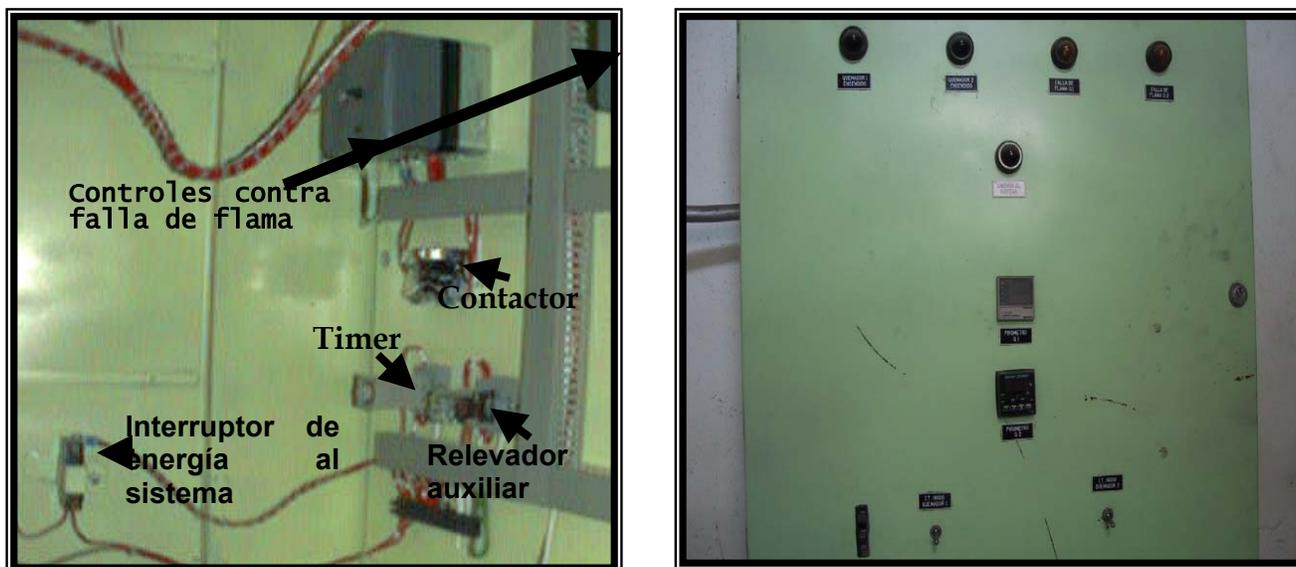


Figura IV.6. Instrumentación del incinerador de la UAM-A

## IV.2. Caracterización fisicoquímica de residuos de la UAM

Se eligieron residuos sólidos generados en la UAM-A ya que no se cuenta con equipo de control de gases en el incinerador por lo que el manejo de los residuos peligrosos involucraría emisiones peligrosas por la composición del residuo. Otra de las causas por la que no se trabajó con residuos peligrosos es que no se conoce la capacidad del horno para alcanzar los niveles de destrucción térmica ya que los estándares de la incineración de los residuos peligrosos requiere un 99.99 % de eficiencia de destrucción y remoción y para algunos compuestos específicos se requiere una eficiencia del 99.9999 %. (EPA, 1993)

Por lo anterior los residuos a manejar en esta tesis fueron los generados en la UAM-A en el periodo 02-P. Actualmente se tiene una estadística de la generación y composición de los residuos generados en la UAM-A, ya que existen trabajos de tesis

de licenciatura de la carrera de Ingeniería Ambiental y otros generados en el Taller IV de Ingeniería Ambiental. Los datos presentados fueron generados para esta tesis realizándose todas la técnicas fisicoquímicas a los residuos seleccionados. Solo se utilizó la información que existe de los residuos de la UAM-A, para corroborar que los resultados que obtuvimos se encuentran dentro del rango ya establecido.

#### IV.2.1. Caracterización física

Se obtuvieron los siguientes subproductos usando la metodología marcada en la NOM-AA-15-1985, y la NOM-AA-22-1985 de cuarteo y separación de subproductos.

Tabla IV.1. Subproductos de los residuos de la UAM-A

<b>Subproductos</b>	<b>% en peso</b>
Algodón	0.007
Cartón	13.29
Residuo fino	1.19
Hueso	0.18
Hule	4.10
Lata	0.42
Madera	1.52
Material de construcción	0.28
Material ferroso	1.19
Papel	25.48
Pañal desechable	0.28
Película de plástico	0.03
Plástico rígido	7.06
Poliuretano	10.5
Poliestireno expandible	0.28
Residuo alimenticio	16.84
Resido de jardinería	0.42
Envases de cartón encerado	0.55
Trapo	1.88
Vidrio de color	2.44
Vidrio transparente	18.99
Otros	0.21

El peso volumétrico se determinó mediante la norma NOM-AA-19-1985 y cuyo resultado fue de 28.918 Kg/m<sup>3</sup>.

#### IV.2.2. Caracterización química

La caracterización química de los residuos fue realizada por los siguientes métodos:

Tabla IV.2. Normatividad empleada para la caracterización química de los residuos

Determinación	Norma
Humedad	NOM-AA-16-1984
pH	NOM-AA-25-1984
Cenizas	NOM-AA-18-1984
Materia Orgánica	NOM-AA-21-1985
Nitrógeno	NOM-AA-24-1984
Relación C/N	NOM-AA-67-1985
Hidrógeno	NOM-AA-68-1984
Fósforo	NOM-AA-94-1985
Azufre	NOM-AA-92-1984
Carbono	NOM-AA-67-1985

Tabla IV.3. Resultados obtenidos de la caracterización de los residuos de la UAM-A

Parámetro	Resultado %
Humedad	6.08
pH	8.3*
Cenizas	10.28
Materia orgánica	46.78
Nitrógeno	0.72
Relación C/N	37.29
Hidrogeno	3.118
Fósforo	0.034
Azufre	0.06183
Carbono	37.29
Oxigeno	23.36

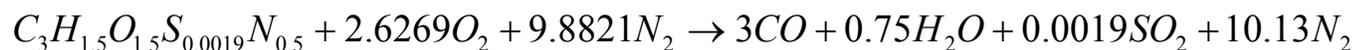
\* Unidades de pH

Como se observa, la materia orgánica es la que predomina en este tipo de residuo. El oxígeno fue obtenido por cálculo matemático (Tchobanogluos *et al.*, 1991) ya que no fue posible determinar éste en el laboratorio.

La composición  $C_xH_yO_zN_uS_vP_w$  de este residuo se obtuvo dividiendo el porcentaje entre el peso atómico de cada elemento dando como resultado lo siguiente:



De la ecuación anterior se calculó los requerimientos de aire estequiométrico obteniéndose lo siguiente:



Se requieren:

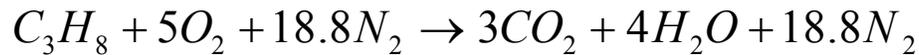
$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{(2.6269 + 9.8821) \text{kgmol} (28.88 \text{Kg} / \text{kgmol})}{1 \text{kgmol} (68.5608 \text{kg} / \text{kgmol})} = 5.26 \text{kg aire} / \text{kg combustible}$$

Dado que se queman 30 Kg de residuos se tiene que requiere de aire:

$$\text{Kg aire requerido} = \left( 5.26 \text{kg aire} / \text{kg combustible} \right) 30 \text{kg combustible} = 156 \text{kg aire}$$

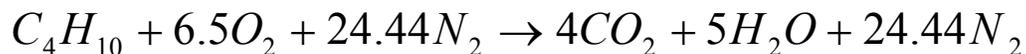
A su vez se realizó el calculo del requerimiento de aire estequiométrico del combustible auxiliar el cual es gas L.P. (80% butano y 20% propano) resultando los siguiente:

Para el propano:



$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{(18.5+5)kgmol(28.88Kg / kmol)}{1kgmol(44 \frac{kg}{kgmol})} = 15.621 \frac{kgaire}{kgcombustible}$$

Para el butano:



$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{(24.44+6.5)kgmol(28.88Kg / kmol)}{1kgmol(58 \frac{kg}{kgmol})} = 15.43 \frac{kgaire}{kgcombustible}$$

Como el gas L.P. es una mezcla en % W de 80% butano y 20% propano se tiene que el aire requerido para este combustible es:

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = [ (15.62)(0.2) + (15.43)(0.8) ] = 15.46 \frac{kgaire}{kgcombustible}$$

### IV.2.3. Poder calorífico

El poder calorífico es un parámetro importante para poder determinar el índice de incinerabilidad de los residuos generados en la UAM-A. Cabe aclarar que como fue una mezcla de residuos solo se le realizó esta determinación a la mezcla basándose en la NOM-AA-33-1985 y utilizando la bomba calorimétrica marca Parr modelo 1341 del laboratorio de incineración del departamento de Energía. No obstante el poder calorífico de cada uno de los subproductos se basó en información obtenida bibliográficamente (Tchobanogluos *et al.*, 1991) para así poder calcular el indicador de incinerabilidad.

El indicador de incinerabilidad se calculó utilizando la formula para residuos peligrosos establecida por Brunner Calvin 1993, realizando una modificación en el % de concentración ya que en éste trabajo se manejaron residuos sólidos y dado que el autor lo refiere a la concentración del componente peligrosos de la mezcla de residuos peligrosos, en lugar de concentración se manejó el % peso de los diferentes subproductos obtenidos de la mezcla de residuos de la UAM-A.

Por lo tanto:

$$I = S + \left( \frac{a}{H} \right) \dots\dots\dots IV.1$$

Donde  $I$  es un indicador de incinerabilidad,  $a$  es una constante con un valor de 100 Kcal/gramo,  $H$  es el poder calorífico Kcal/gramo y  $S$  subproducto en % peso. Los valores obtenidos se muestran en la tabla IV.4.

Tabla IV.4. Incinerabilidad de subproductos obtenidos de la UAM-A

Residuos	% W	PCS (cal/g)	Índice de Incinerabilidad
Algodón	0.007	No disponible	--
Cartón	13.29	4127	37.5
Residuo fino	1.19	---	---
Hueso	0.18	No disponible.	---
Hule	4.10	7995	16.6
Lata	0.42	177	565.4
Madera	1.52	4641	23.1
Material de construcción	0.28	---	---
Material ferroso	1.19	---	---
Papel	25.48	4206	49.3
Pañal desechable	0.28	7995	12.8
Película de plástico	0.03	N.D.	---
Plástico rígido	7.06	10402	16.7
Poliuretano	10.5	6237	26.5
Poliestireno expandible	0.28	9140	11.2
Residuo alimenticio	16.84	3324	46.9
Resido de jardinería	0.42	3613	28.1
Envases de cartón encerado	0.55	6513	15.9
Trapo	1.88	4913	22.2
Vidrio de color	2.44	48	2085.8
Vidrio transparente	18.99	48	2102.3
Otros	0.21	---	--

Del análisis anterior y de los indicadores de incinerabilidad se observa que los que presentan un valor mayor son los subproductos más difíciles de incinerar tales como las latas, los metales, el material ferroso y el vidrio. Por lo anterior se decidió segregar estos residuos para las pruebas realizadas.

Como se mencionó, la determinación del poder calorífico solo se realizó a la mezcla de residuos provenientes de la UAM, debido a que las pruebas de incinerabilidad fueron llevadas a cabo con la mezcla de residuos y no con subproductos específicos.

Siguiendo la norma de referencia para la determinación del poder calorífico, se trabajó con cinco series con seis corridas, para obtener el valor más correcto del poder calorífico de la mezcla de residuos, obteniéndose lo siguiente:

Tabla IV.5. Poder Calorífico de la mezcla de residuos de la UAM-A (cal/ gramo)

SERIE 1	SERIE 2	SERIE 3	SERIE 4	SERIE 5
3925	3807	3617	3126	3084
3925	3900	3841	4250	3715
4165	4101	4331	4250	4864
4333	4235	4851	4518	5218
4532	4361	5073	5716	5427
5227	4732	5557	5716	5897

Para obtener el valor promedio del poder calorífico, a los datos anteriores se les aplicó la media geométrica dando como resultado 4416 cal/g, debido a que la media geométrica es afectada por valores extremos en una menor cantidad en comparación con la media aritmética ya que la media geométrica es la raíz  $n$ -ésima del producto de los valores. (Stephen,1967)

Una vez obtenido el valor medio del poder calorífico se determinó su indicador de incinerabilidad por medio de la ecuación IV.1. y un 100 %  $W$  de los residuos

obteniéndose un valor de 123 . Lo mismo se realizó con las siguientes mezclas de residuos tal y como se muestra en la tabla IV.6.

Tabla IV.6. Indicador de incinerabilidad de diferentes mezclas de subproductos

Residuo	% W	PCS (cal/g)			Promedio (cal/g)	Indicador de Incinerabilidad (I)
		Serie 1	Serie 2	Serie 3		
Residuos del taller de madera con papel	100	3156	3098	2997	3084	132
Residuos de Jardín con papel	100	3316	2873	3715	3301	130
Residuos del taller de plásticos con PET	100	8325	8827	8051	8401	112

Del análisis anterior se observa que el residuo más incinerables son los del taller de plásticos, seguido de los residuos de jardín con papel y por último el de taller de madera con papel, ya que entre **menor** sea el indicador de incinerabilidad el residuo es más incinerable.

IV.3. Pruebas de incinerabilidad .....	71
IV.3.1. Fases de experimentación .....	75

### **IV.3. Pruebas de incinerabilidad**

Las condiciones a las cuales fueron hechas las pruebas de incinerabilidad de los residuos de la UAM-A se rigieron a partir de las siguientes variables para obtener las condiciones óptimas de incineración.

#### **I. Las relacionadas con el residuo**

- Tipo y cantidad de residuo
- Propiedades físicas y químicas
- Indicador de incinerabilidad

#### **II. Las relacionadas con el incinerador**

- Aire suministrado al incinerador
- Temperatura
- Pre calentamiento del horno

El combustible que se utilizó fue gas L.P. por medio de un tanque existente de 1000 L y para el análisis instantáneo de los gases de combustión se realizó por medio de una celda electroquímica marca TESTO 350 corrigiéndose los valores obtenidos a un 7 por ciento de oxígeno tal y como lo marca el proyecto de la NOM-098-ECOL-2000.

#### **I. Las relacionadas con el residuo**

- Tipo y cantidad de residuos

El tipo de residuo como se mencionó, fue la mezcla seleccionada de residuos una vez que se analizaron sus propiedades físicas, químicas y sus indicadores de incinerabilidad. Los residuos fueron los siguientes:

- Basura sin metal y sin vidrio
- Residuos del taller de madera con papel
- Residuos de jardín con papel
- Residuos del taller de plásticos con PET

La cantidad de residuos a incinerar se calculó a partir del peso volumétrico de los residuos y la capacidad de la cámara primaria del incinerador la cual es de un 1 m<sup>3</sup>. Y puesto que el peso volumétrico es de 28.918 Kg/m<sup>3</sup>, se alimentaron por cada corrida 30 Kg de residuos. Por las características propias del incinerador la alimentación fue por lotes.

– Indicador de incinerabilidad

Los indicadores fueron obtenidos a través de la determinación del poder calorífico de la mezcla de los residuos

Tabla IV.7. Indicador de Incinerabilidad

<b>Residuos</b>	<b>Indicador de incinerabilidad (I)</b>
Residuos sin metal y sin vidrio	123
Residuos del taller de madera con papel	132
Residuos de jardín con papel	130
Residuos del taller de plásticos con PET	112

## II. Las relacionadas con el incinerador

### - Aire suministrado al incinerador

La aportación de aire de combustión para la incineración de residuos está ligada por diseño al mismo quemador, dado que el ventilador que proporciona el aire de combustión está instalado en los mismos quemadores. El aire también es aportado a través de rejillas metálicas de 0.20 x 0.20 m con 40 agujeros de ½ " cada uno distribuidas a lo largo de la pared exterior del incinerador ya que el aire que entra hacia estas rejillas es conducido a través de la doble pared a las cámaras primarias y secundarias. Para controlar la entrada de aire se colocaron láminas corredizas en todas las rejillas metálicas como se observa en la figura IV.7.

Las modificaciones para controlar la aportación de aire en los quemadores fueron realizadas por medio de una válvula de mariposa que se adaptó en el punto de succión de los ventiladores de los quemadores, tal como se muestra en la figura IV.8, ésta válvula consiste en un tubo conectado directamente al ventilador de cada uno de los quemadores con un papalote que abrirá o cerrará el paso del aire para realizar las pruebas.



Figura IV.7. Placas de control de ingreso de aire a las cámaras primaria y secundaria



Figura IV.8. Dispositivo de control de ingreso de aire los quemadores

- Temperatura

La temperatura del incinerador estará en función del combustible y poder calorífico de los residuos esta variable deberá estar en cumplimiento de la normatividad NOM-ECOL-098-2000 (850-1000 °C) +/- 2 °C (26). Para su medición se cuenta con un pirómetro de precisión y un pirómetro de rango abierto de control en las dos cámaras.

- Tiempo

Se calculó el tiempo de residencia el cual depende del flujo de los productos de combustión según la siguiente ecuación:

$$\text{tiempo} = \frac{\text{Volumen de la cámara}}{\text{flujo de los productos de combustión}}$$

La normatividad NOM-ECOL-098-2000 solicita que sean 2 segundos el tiempo de residencia.

El volumen de la cámara secundaria es de  $0.40 \text{ m}^3$  y el flujo de los productos de combustión se calculó mediante un muestreo isocinético siguiendo la normatividad mexicana NOM – AA – 009 – 1993, NOM – SCOFI – 010 – 2000 obteniéndose los siguientes resultados:

Velocidad de salida =  $1.4 \text{ m / s}$

Volumen de la segunda cámara =  $0.40 \text{ m}^3$

Flujo de los gases de combustión =  $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$

De donde se tiene un tiempo de residencia de aproximadamente de 1.08 segundos.

### **IV.3.1. Fases de experimentación**

Recapitulando lo anterior las fases de experimentación se realizaron en función de la variación de los parámetros mencionados, obteniéndose las siguientes pruebas de incinerabilidad:

#### **A. Determinación del tiempo del quemado**

Como base inicial y para poder realizar los diferentes tipos de pruebas se determinó el tiempo en que tarda en quemarse la mezcla de residuos generados por la UAM-A, para poder obtener la duración del experimento. Se alimentaron tres lotes de 30 kg de residuos con un determinado indicador de incinerabilidad, a un 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador, cronometrándose el tiempo hasta donde se observe que los residuos han disminuido en un 90 % del volumen y solo queden formas amorfas e inquemadas de los residuos alimentados.

**B. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador sin precalentamiento**

Una vez determinado el tiempo en que tarda en incinerarse el residuo se procedió a realizar pruebas con 30 Kg. del mismo tipo de residuo y el mismo indicador de incinerabilidad, variando en un 25%, 50% y 75% la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador, sin precalentamiento del mismo, ésto es que el horno estaba frío cuando se realizaron las pruebas.

Se realizaron mediciones cada 5 minutos de los gases de combustión y de las temperaturas de las cámaras primaria y secundaria.

Tabla IV.8. Pruebas de incinerabilidad para determinar la condición óptima de entrada de aire al incinerador y sin precalentamiento.

Condicionante	Pruebas		
Variando: - % de capacidad de entrada de aire al incinerador  Constantes: - Indicador de incinerabilidad - Cantidad de residuos	Temperatura inicial de las cámaras = 25 °C 75% de capacidad de entrada de aire	Temperatura inicial de las cámaras = 25 °C 50% de capacidad de entrada de aire	Temperatura inicial de las cámaras = 25 °C 25% de de capacidad de entrada de aire

**C. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador con precalentamiento**

Se realizaron tres pruebas variando en un 25%, 50% y 75% la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador, precalentando él mismo con gas L.P. hasta obtener lecturas de temperaturas en la segunda cámara arriba de los 700 °C .

Se realizaron mediciones cada 5 minutos de los gases de combustión así como de las temperaturas de la cámara primaria y la cámara secundaria.

Tabla IV.9. Pruebas de incinerabilidad para determinar la condición óptima de entrada de aire al incinerador y con precalentamiento.

Condicionante	Pruebas		
Variando: - Capacidad de entrada de aire al incinerador  Constantes: - Indicador de incinerabilidad - Cantidad de residuos	$T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  25 % de capacidad de entrada de aire	$T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 50% de capacidad de entrada de aire	$T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 75 % de capacidad de entrada de aire

T = temperatura segunda cámara

#### D. Determinación de la influencia de los residuos en la incineración, reduciendo el área superficial de los mismos

Para determinar la influencia de los residuos se realizó una prueba a un 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador y precalentando él mismo arriba de los 700 °C en la segunda cámara, con variaciones en la forma de alimentación de los residuos adicionando 50 % molida del total y 50 % entera.

#### E. Variación del índice de incinerabilidad para observar la influencia del esta variable en la incineración de residuos

Para poder observar la variación debido a diferentes indicadores de incinerabilidad se realizaron tres pruebas con diferentes poderes caloríficos, precalentando el incinerador a más de 700 °C y a un 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador.

Tabla IV.10. Pruebas de incinerabilidad para determinar la influencia en la incineración del indicador de incinerabilidad de los residuos

Condicionante	Pruebas
Variable: Indicador de Incinerabilidad	Residuos del taller de madera con papel
Constantes: Temperatura > 700 °C	Residuos de jardín con papel
50 % de la capacidad de entrada de aire al suministrado al incinerador.	Residuos del taller de plásticos con PET

<b>V. Resultados y discusión.....</b>	<b>79</b>
V.1. Determinación del tiempo del quemado de los residuos .....	79
V.2. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador sin precalentamiento .....	79
V.2.1. Variación de la temperatura a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado de aire .....	81
V.2.2. Variación de las emisiones a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador.....	84
V.2.2.1. Oxígeno.....	84
V.2.2.2. Monóxido de carbono .....	86
V.2.2.3. Dióxido de carbono.....	89
V.2.2.4. Dióxido de azufre.....	91
V.2.2.5. Óxidos de nitrógeno .....	92
V.3. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador con precalentamiento .....	96
V.3.1. Variación de la temperatura a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado de aire.....	98
V.3.2. Variación de las emisiones a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador y con precalentamiento del mismo .....	102
V.3.2.1. Oxígeno.....	102
V.3.2.2. Monóxido de carbono .....	103
V.3.2.3. Dióxido de carbono.....	105
V.3.2.4. Óxidos de nitrógeno .....	107

## V. Resultados y discusión

### V.1. Determinación del tiempo del quemado de los residuos

En esta prueba se realizaron tres corridas con 30 Kg de residuos, con un indicador de incinerabilidad de 123, y con un 50% la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador, obteniéndose los siguientes resultados que se muestran en la tabla V.1.

Tabla V.1. Tiempo de quemado de residuos de la UAM-A

Corrida	Tiempo (min)	% de reducción de los residuos
1	25	90%
2	30	90%
3	35	95%

Como se mencionó anteriormente el tiempo de quemado estuvo determinado por la reducción del volumen de los residuos en la cámara primaria en un 90 % y hasta que se observaron formas amorfas e inquemadas de los residuos.

Por lo que se concluyó que el tiempo de cada prueba de incinerabilidad es de 35 minutos.

### V.2. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador sin precalentamiento

Una vez determinado el tiempo en que tarda en incinerarse 30 Kg. de residuo con un indicador de incinerabilidad de 123, el cual fue aproximadamente de 35 minutos se realizaron pruebas con el mismo tipo de residuo sin precalentar el horno a 25, 50 y 75 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador.

Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en las siguientes tablas, cabe mencionar que los valores fueron corregidos a un 7 por ciento de oxígeno.

Tabla V.2. Resultados de la prueba de incinerabilidad a 75 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador

Parámetro	TIEMPO (minutos)						
	5	10	15	20	25	30	35
Temperatura 1era cámara (°C)	217	326	347	401	425	428	455
Temperatura 2da cámara (°C)	551	557	560	563	565	571	572
O <sub>2</sub> (%)	11.2	11.5	12.5	13.5	13.7	14.2	15.2
CO <sub>2</sub> (%)	7	6.6	6.4	5.9	5.4	5.3	5.4
NO (ppm)	37	64	70	56	59	46	39
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
NOx (ppm)	37	65	70	56	60	47	39
SO <sub>2</sub> (ppm)	4	3	2	2	1	1	0
CO (ppm)	201	69	13	9	5	2	1

Tabla V.3. Resultados de la prueba de incinerabilidad a 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador

Parámetro	TIEMPO (minutos)						
	5	10	15	20	25	30	35
Temperatura 1era cámara (°C)	300	355	381	444	460	466	477
Temperatura 2da cámara (°C)	607	617	637	643	652	662	675
O <sub>2</sub> (%)	6.3	6.8	8.3	9	10	11	11.6
CO <sub>2</sub> (%)	12.6	10.2	8.5	8.1	7.4	6.8	6.7
NO (ppm)	53	100	95	95	81	68	67
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
NOx (ppm)	53	100	95	95	81	68	67
SO <sub>2</sub> (ppm)	1	1	1	1	1	1	1
CO (ppm)	175	56	17	15	10	8	1

Tabla V.4. Resultados de la prueba de incinerabilidad a 25 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador

Parámetro	TIEMPO (minutos)						
	5	10	15	20	25	30	35
Temperatura cámara (°C) 1era	324	368	411	442	464	477	482
Temperatura cámara (°C) 2da	655	663	673	682	691	695	698
O <sub>2</sub> (%)	4.8	6.2	7.7	9.4	9.6	9.8	10.3
CO <sub>2</sub> (%)	11	9.1	8.9	7.8	7.6	7.5	7.2
NO (ppm)	78	114	117	97	92	83	78
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>x</sub> (ppm)	78	114	117	98	92	83	78
SO <sub>2</sub> (ppm)	2	1	1	1	1	1	1
CO (ppm)	240	124	43	23	17	6	3

### V.2.1. Variación de la temperatura a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado de aire

En las figuras V.1. y V.2. se muestran las gráficas obtenidas de los datos de las temperaturas contra el tiempo de quemado, mostrando la variación de la temperatura en las cámaras primaria y secundaria a los diferentes ingresos de aire. En la tabla V.5. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmico así como los coeficientes de correlación para los datos de las temperaturas obtenidas en la cámara primaria, para las tres diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador, esto con el fin de determinar el ajuste óptimo de los datos.

Tabla V.5. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación de los datos de temperatura de la cámara primaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
25%	$y = -0.1729x^2 + 12.236x + 265.71$ $R^2 = 0.9995$	$y = 5.3214x + 317.57$ $R^2 = 0.9262$	$y = 86.735\ln(x) + 178.77$ $R^2 = 0.9891$
50%	$y = -0.1971x^2 + 13.829x + 233.86$ $R^2 = 0.9831$	$y = 5.9429x + 293$ $R^2 = 0.9081$	$y = 96.844\ln(x) + 138.05$ $R^2 = 0.9694$
75%	$y = -0.2667x^2 + 17.781x + 149$ $R^2 = 0.9685$	$y = 7.1143x + 229$ $R^2 = 0.8761$	$y = 118.73\ln(x) + 35.595$ $R^2 = 0.9809$

Asimismo, en la tabla V.6. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmico de las temperaturas obtenidas en la cámara secundaria, con sus coeficientes de correlación, para las tres diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador.

Tabla V.6. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación de los datos de temperatura de la cámara secundaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
25%	$y = -0.0262x^2 + 2.5548x + 641.57$ $R^2 = 0.9941$	$y = 1.5071x + 649.43$ $R^2 = 0.9721$	$y = 23.654\ln(x) + 612.69$ $R^2 = 0.9625$
50%	$y = -0.0138x^2 + 2.7595x + 593.57$ $R^2 = 0.9871$	$y = 2.2071x + 597.71$ $R^2 = 0.9842$	$y = 34.091\ln(x) + 545.47$ $R^2 = 0.9438$
75%	$y = -0.0057x^2 + 0.9143x + 547.29$ $R^2 = 0.9805$	$y = 0.6857x + 549$ $R^2 = 0.9754$	$y = 10.678\ln(x) + 532.52$ $R^2 = 0.9509$

En las tablas anteriores se observa que el mejor ajuste de los datos de temperatura es el polinomial de segundo orden tanto para la primera cámara como para la segunda cámara a las tres diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador, lo anterior se justifica ya que el coeficiente de correlación fue el más alto, del orden de 0.98, observándose en todos los casos un incremento de pendiente positiva conforme va aumentando el tiempo de incineración y dándose un cambio de pendiente a los 35 minutos en donde la temperatura empieza a disminuir, lo cual es debido a que los

residuos se han reducido en un 95 %, por lo que no existe suficiente poder calorífico para seguir manteniendo el aumento de temperatura en las dos cámaras.

En las figuras V.1. y V.2. se observan que a 25 % de capacidad de entrada de aire introducido al incinerador la temperatura alcanzada es mayor que cuando se introduce 75 % de capacidad de entrada de aire, por lo que a mayor ingreso de aire menor temperatura en las cámaras. La segunda cámara alcanza temperaturas mayores comparadas con las de la primera cámara tal como se muestra en la figura V.2., ya en esta cámara se encuentra instalado el quemador con mayor capacidad.

La norma maneja que en la segunda cámara se deben de alcanzar al menos 800°C lo cual no se cumple con una diferencia de 100 °C.

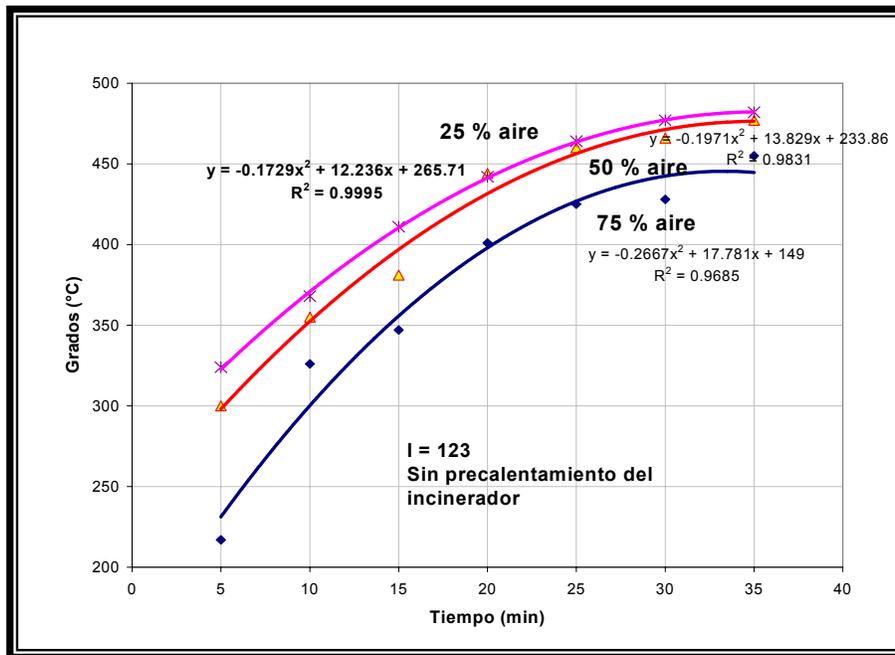


Figura V.1. Gráfica de variación de la temperatura en la primera cámara a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

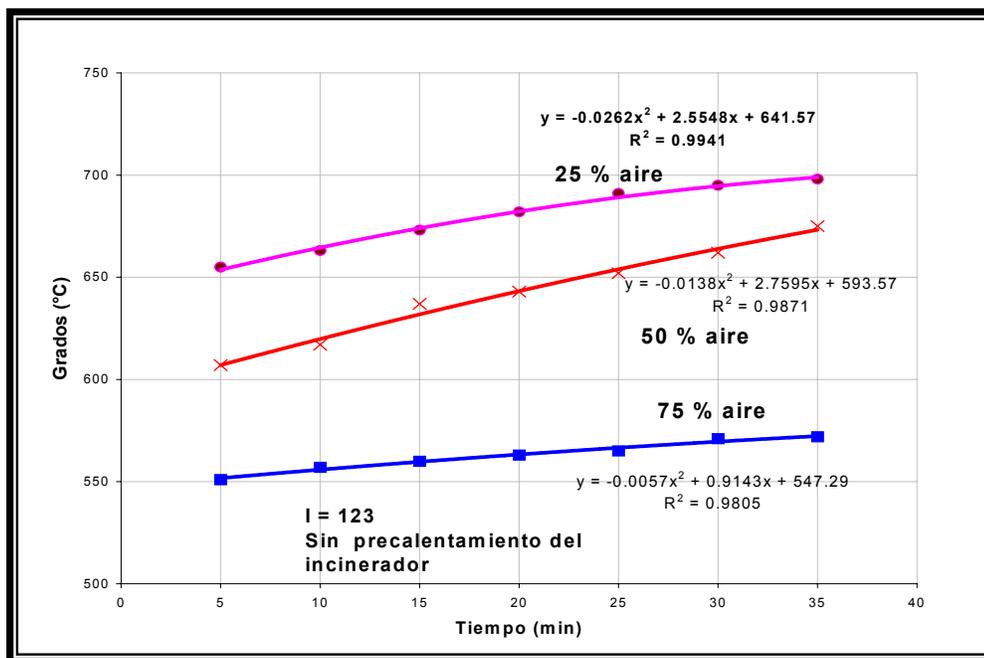


Figura V.2. Gráfica de variación de la temperatura en la segunda cámara a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

## V.2.2. Variación de las emisiones a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

### V.2.2.1. Oxígeno

En la figura V.3. se muestra la emisión de  $O_2$  a diferentes capacidades de ingresos de aire y a diferentes temperaturas, la temperatura a la que se está relacionando es la de la segunda cámara.

En la tabla V.7. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmico de los datos de concentración de oxígeno obtenidos en la chimenea con el equipo TESTO para determinar el ajuste óptimo a los datos, también se muestran los coeficientes de correlación para las tres diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador.

Tabla V.7. Ecuaciones de ajuste y coeficientes a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la emisión de oxígeno

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
75%	$y = 0.0012x^2 - 1.1702x + 289.24$ <b>R<sup>2</sup> = 0.934</b>	$y = 0.1871x - 92.162$ R <sup>2</sup> = 0.9323	$y = 105.11\ln(x) - 652.54$ R <sup>2</sup> = 0.9317
50%	$y = 9E-05x^2 - 0.0298x - 8.3447$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9878</b>	$y = 0.0834x - 44.5$ R <sup>2</sup> = 0.9874	$y = 53.279\ln(x) - 335.38$ R <sup>2</sup> = 0.9864
25%	$y = -0.002x^2 + 2.8364x - 993.63$ <b>R<sup>2</sup> = 0.988</b>	$y = 83.823\ln(x) - 538.37$ R <sup>2</sup> = 0.9591	$y = 83.823\ln(x) - 538.37$ R <sup>2</sup> = 0.9591

Por lo anterior el ajuste realizado a los datos fue el polinomial de segundo orden, debido a que el coeficiente de correlación obtenido en este ajuste fue el más alto con relación al ajuste lineal y logarítmico en las tres diferentes capacidades de entrada de aire suministrado.

En la figura V.3. se observa que el crecimiento es de pendiente positiva conforme va aumentando la temperatura. También se observa que la mayor cantidad de oxígeno se obtiene a mayor ingreso de aire (75 %) ya que se introduce más oxígeno con el aire atmosférico lo contrario sucede con 25 % de aire introducido. La temperatura no es un factor importante en la emisión de O<sub>2</sub> ya que a 75% de ingreso de aire se tiene una menor temperatura y mayor emisión de O<sub>2</sub>.

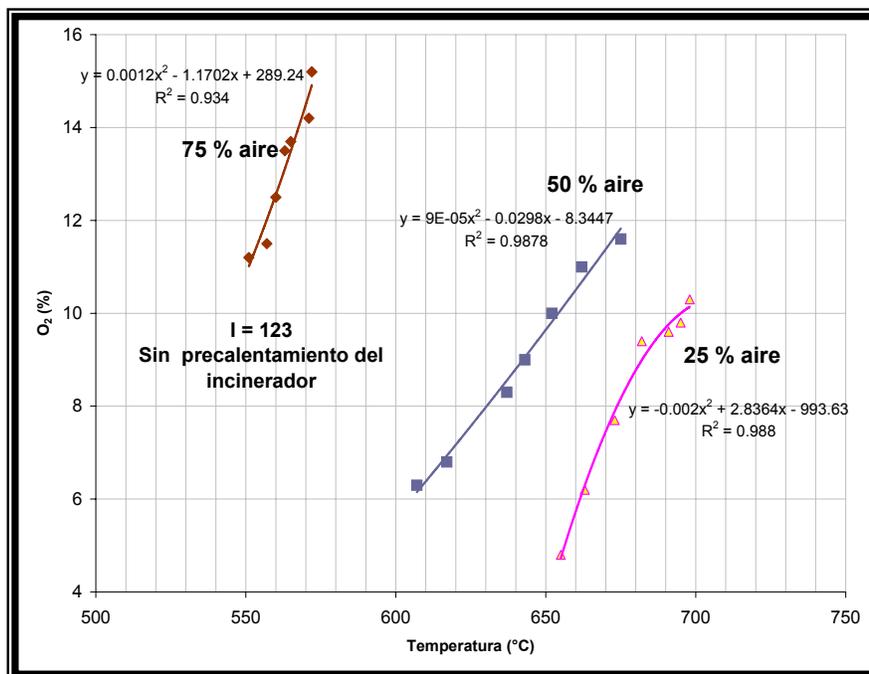


Figura V.3. Gráfica de la emisión de  $O_2$  a diferentes temperaturas en la segunda cámara y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

### V.2.2.2. Monóxido de carbono

La producción de CO a diferentes capacidades de aire suministrado y diferentes temperaturas se muestra en la figura V.4.

En la tabla V.8. se muestran las ecuaciones y los coeficientes de correlación de ajuste logarítmica, lineal y exponencial de los datos de producción de CO medidos en la chimenea para los tres diferentes experimentos.

Tabla V.8. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la producción de monóxido de carbono

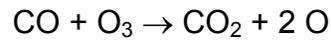
Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste logarítmica y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste exponencial y coeficiente de correlación
75%	$y = -5444.9\ln(x) + 34516$ $R^2 = 0.7308$	$y = -9.6728x + 5477.9$ $R^2 = 0.7255$	$y = 3E+60e^{-0.2429x}$ <b><math>R^2 = 0.958</math></b>
50%	$y = -1352.9\ln(x) + 8785.2$ $R^2 = 0.6719$	$y = -2.0958x + 1385.5$ $R^2 = 0.6594$	$y = 2E+19e^{-0.0651x}$ <b><math>R^2 = 0.9363</math></b>
25%	$y = -3254.8\ln(x) + 21290$ $R^2 = 0.8226$	$y = -4.7909x + 3320.9$ $R^2 = 0.8165$	$y = 5E+28e^{-0.0925x}$ <b><math>R^2 = 0.9569</math></b>

Con los resultados obtenidos del ajuste de los datos se observa que la tendencia es exponencial debido a que en ésta se obtuvieron los valores más altos del coeficiente de correlación en los tres casos, observándose que al inicio de la incineración y donde se tiene la menor temperatura la producción de CO es muy alta y conforme va aumentando la temperatura la producción de monóxido de carbono va disminuyendo hasta casi llegar a cero por lo que decaimiento de este contaminante es exponencial.

Otra observación realizada al inicio de la incineración fue que los 30 Kg. de residuos introducidos al incinerador ocupan el total del volumen de la primera cámara por lo que al inicio de la combustión el aire de los quemadores es bloqueado por la masa de residuos, ya que los residuos hacen una especie de pantalla y no permiten la circulación del aire dentro de la cámara primaria propiciando condiciones pirólicas en algunas regiones de la cámara y conforme se van consumiendo los residuos la circulación del aire se va mejorando en toda la cámara, por lo que disminuye la formación de CO.

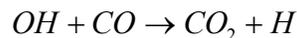
El CO es un producto intermedio de la combustión y la reacción principal, donde participa este, es la oxidación de CO a CO<sub>2</sub>. (Schorr, 1991) Las reacciones que ocurren en el proceso de oxidación del óxido de carbono tienen una importancia fundamental en la combustión, ya que según la mayor parte de los investigadores, constituyen un camino obligado para la combustión de los hidrocarburos. El mecanismo

ha sido objeto de muchas controversias y todavía hasta hoy existen muchas controversias sobre este. Existen algunas teorías como la de Lewis y Von Elbe en donde explican que la ramificación puede estar ligada a la presencia de ozono (arriba de los 250 °C). (Salvi, 1975)



Y que las moléculas de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y CO pueden estar consideradas como la tercera especie, otro factor que hay que considerar en esta reacción es la presión ya que a bajas presiones la oxidación es lenta.

Garner es otro investigador que ha descrito el mecanismo de formación cuando se tiene la presencia de iones OH, tal como se indica en la siguiente reacción:



Cuando los radicales OH reaccionan con el monóxido de carbono se produce la reacción inducida CO a CO<sub>2</sub>. Este mecanismo puede ser el probable para explicar la sucesiva desaparición de CO. (Salvi, 1975)

En la figura V.4. se observa que conforme va aumentando la temperatura arriba de los 700°C el monóxido disminuye. Además se tiene que la generación de CO decrece con un incremento de aire suministrado (75% de capacidad de ingreso de aire).

En cuanto a la normatividad este contaminante en los primeros instantes de incineración rebasa los límites máximos permisibles (72 ppm), pero conforme aumenta la temperatura se encuentra por debajo de la norma.

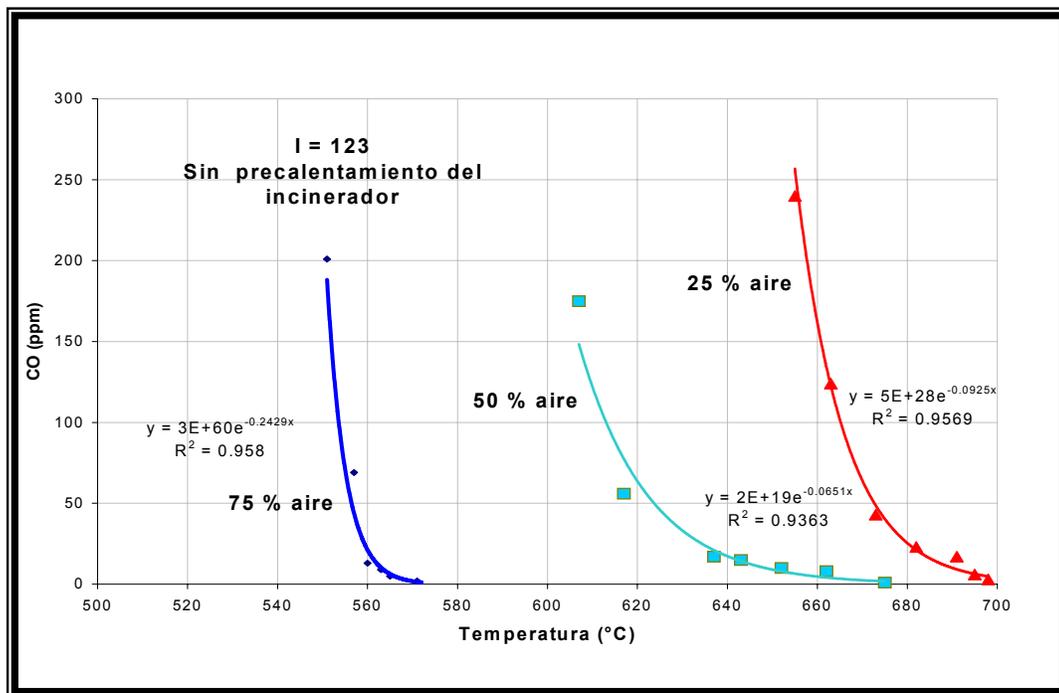


Figura V.4. Gráfica de la producción de CO a diferentes temperaturas en la segunda cámara y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

### V.2.2.3. Dióxido de carbono

La producción de CO<sub>2</sub> registrada en la chimenea y relacionada con la temperatura de la segunda cámara a diferentes capacidades de ingreso de aire al sistema se muestra en la figura V.5.

En la tabla V.9. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmico de los datos obtenidos, con sus coeficientes de correlación.

Tabla V.9. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la producción del dióxido de carbono

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
75%	$y = 0.0013x^2 - 1.529x + 459.84$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9188</b>	$y = -0.0859x + 54.362$ R <sup>2</sup> = 0.9096	$y = -48.329\ln(x) + 312.05$ R <sup>2</sup> = 0.9107
50%	$y = 0.0012x^2 - 1.6657x + 568.1$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9831</b>	$y = -0.0839x + 62.463$ R <sup>2</sup> = 0.8996	$y = -53.911\ln(x) + 357.08$ R <sup>2</sup> = 0.9082
25%	$y = 0.0017x^2 - 2.3816x + 840.42$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9509</b>	$y = -0.0766x + 60.529$ R <sup>2</sup> = 0.895	$y = -51.985\ln(x) + 347.45$ R <sup>2</sup> = 0.8986

El ajuste óptimo para los datos de la producción de dióxido de carbono es el polinomial de segundo orden, debido a que el coeficiente de correlación fue el más alto en comparación con los otros dos ajustes en los tres casos de capacidades de ingreso de aire.

En la figura V.5. se observa que conforme aumenta la temperatura la oxidación del carbono contenido en el combustible es completada a CO<sub>2</sub> y que la secuencia de oxidación a altas temperaturas nos conduce a la formación de CO<sub>2</sub> ya que al aumentar la temperatura las reacciones son aceleradas (Semenov, 1958), sin embargo en las diferentes capacidades de entrada de aire suministrados se observa que empieza un decaimiento en la formación de CO<sub>2</sub> lo cual se debe a que los residuos se van agotando, siendo éstos la fuente principal de carbono.

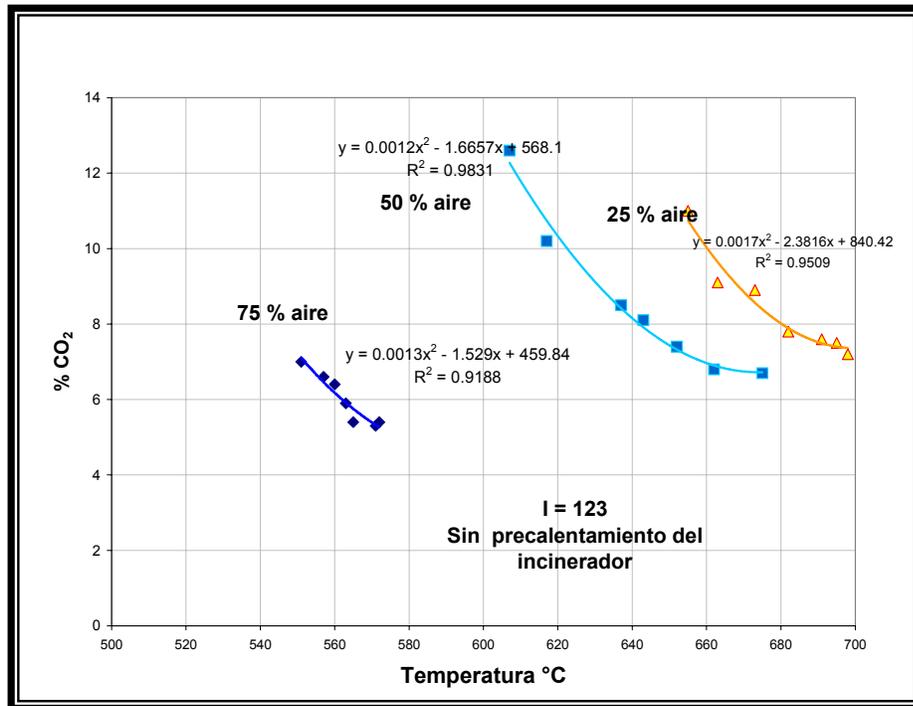


Figura V.5. Gráfica de la producción de CO<sub>2</sub> a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

#### V.2.2.4. Dióxido de azufre

La producción de dióxido de azufre a diferentes ingresos de aire y a diferentes temperaturas en la cámara secundaria se muestra en la figura V.6., en esta gráfica se observa que en los tres experimentos, la formación del dióxido de azufre es baja del orden de 0 a 2 ppm en comparación con las 210 ppm que establecen los límites máximos permisibles establecidos en la norma NOM-ECOL-098-2000. Aquí no se realizó un ajuste ya que los valores fluctúan en un rango de 0-2 ppm.

Dado que la principal fuente de sulfuro son los residuos, y los residuos de la UAM-A contienen 0.06183 % de azufre, la producción de este contaminante es mínima.

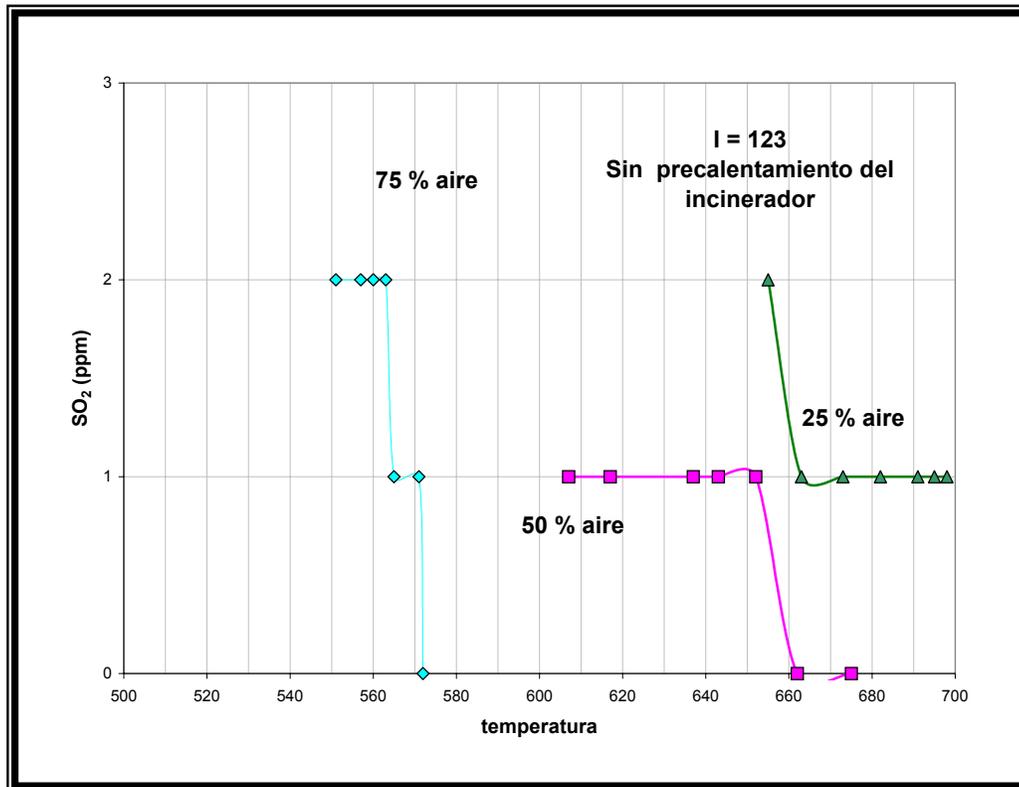


Figura V.6. Gráfica de la producción de SO<sub>2</sub> a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

### V.2.2.5. Óxidos de nitrógeno

Cabe mencionar que los NO<sub>x</sub> generados son su totalidad NO como se muestra en las tablas V.2, V.3 y V.4., los cuales son los más estables y los que siempre predominan en un proceso combustión lo cual concuerda con lo reportado por Gardinier en 1999, por lo que la gráfica de la figura V.7. esta referida la producción de NO<sub>x</sub> como NO a diferentes ingresos de aire y a diferentes temperaturas.

En la tabla V.10. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, de segundo, tercero y cuarto orden de la producción de óxido de nitrógeno, con sus coeficientes de correlación para las tres capacidades de ingreso de aire, medidos en la chimenea con

la celda electroquímica, a las diferentes temperaturas obtenidas en la cámara secundaria, con el fin de determinar el ajuste óptimo de los datos obtenidos.

Tabla V.10. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador para estimar la producción de óxido de nitrógeno

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial orden dos y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste polinomial orden tres y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste polinomial orden cuatro y coeficiente de correlación
75%	$y = -0.2348x^2 + 263.7x - 73968$ $R^2 = 0.8659$	$y = 0.0157x^3 - 26.713x^2 + 15129x - 3E+06$ $R^2 = 0.937$	$y = -0.0014x^4 + 3.0977x^3 - 2621.6x^2 + 986109x - 1E+08$ <b><math>R^2 = 0.9439</math></b>
50%	$y = -0.0267x^2 + 34.111x - 10799$ $R^2 = 0.5701$	$y = 0.0014x^3 - 2.7074x^2 + 1753.4x - 378074$ $R^2 = 0.9501$	$Y = -2E-05x^4 + 0.0499x^3 - 49.381x^2 + 21686x - 4E+06$ <b><math>R^2 = 0.9755</math></b>
25%	$y = -0.0703x^2 + 94.852x - 31880$ $R^2 = 0.7764$	$y = 0.0033x^3 - 6.7517x^2 + 4613.4x - 1E+06$ $R^2 = 0.9474$	$y = -0.0001x^4 + 0.3409x^3 - 349.38x^2 + 159105x - 3E+07$ <b><math>R^2 = 0.9795</math></b>

De la tabla anterior se deduce que el coeficiente de correlación del ajuste polinomial de orden cuatro fue el mas alto con relación a los otros dos ajustes en los tres diferentes ingresos de aire, por lo que el ajuste de los datos de NO fue realizado con éste.

En la figura V.7. se observa un aumento y disminución de óxido de nitrógeno conforme transcurre el tiempo de incineración.

Dado a que el contenido de nitrógeno en los residuos es muy bajo del orden de 0.72 % se descarta que el mecanismo de formación de NO sea debido al combustible.

Por la observación realizada en la figura V.7, se tiene que a mayor temperatura alcanzada en la cámara secundaria mayor producción de NO, por lo que el mecanismo de formación que contribuye en la formación de NO es el térmico.

El NO térmico viene de la fijación del oxígeno molecular del aire de combustión. La concentración de átomos de O en flamas desarrolladas con temperaturas altas se debe al proceso de disociación si la temperatura es lo suficientemente alta, en este caso los átomos de O atacan el enlace químico  $N \equiv N$ .



por lo que los átomos formados de N reaccionan rápidamente con el  $O_2$  para generar átomos de O:



Las reacciones anteriores son conocidas como el mecanismo de Zeldovich (Zeldovich 1946). El nivel de formación de NO es muy sensible a la temperatura y la concentración de radicales, por lo que el NO térmico es formado mas fácilmente en la región de flama con temperaturas altas. Debido a que el oxígeno participa en la formación de NO térmico este es formado bajo condiciones pobres de combustible, cuando la relación equivalente no esta cerca del estequiométrico. (Glarborg *et al.* 1986)

En cuanto a los límites que establece la NOM-ECOL-098-2000, que marca 368 ppm las emisiones debidas a la incineración de los residuos de la UAM-A no rebasan la norma en ninguno de los casos.

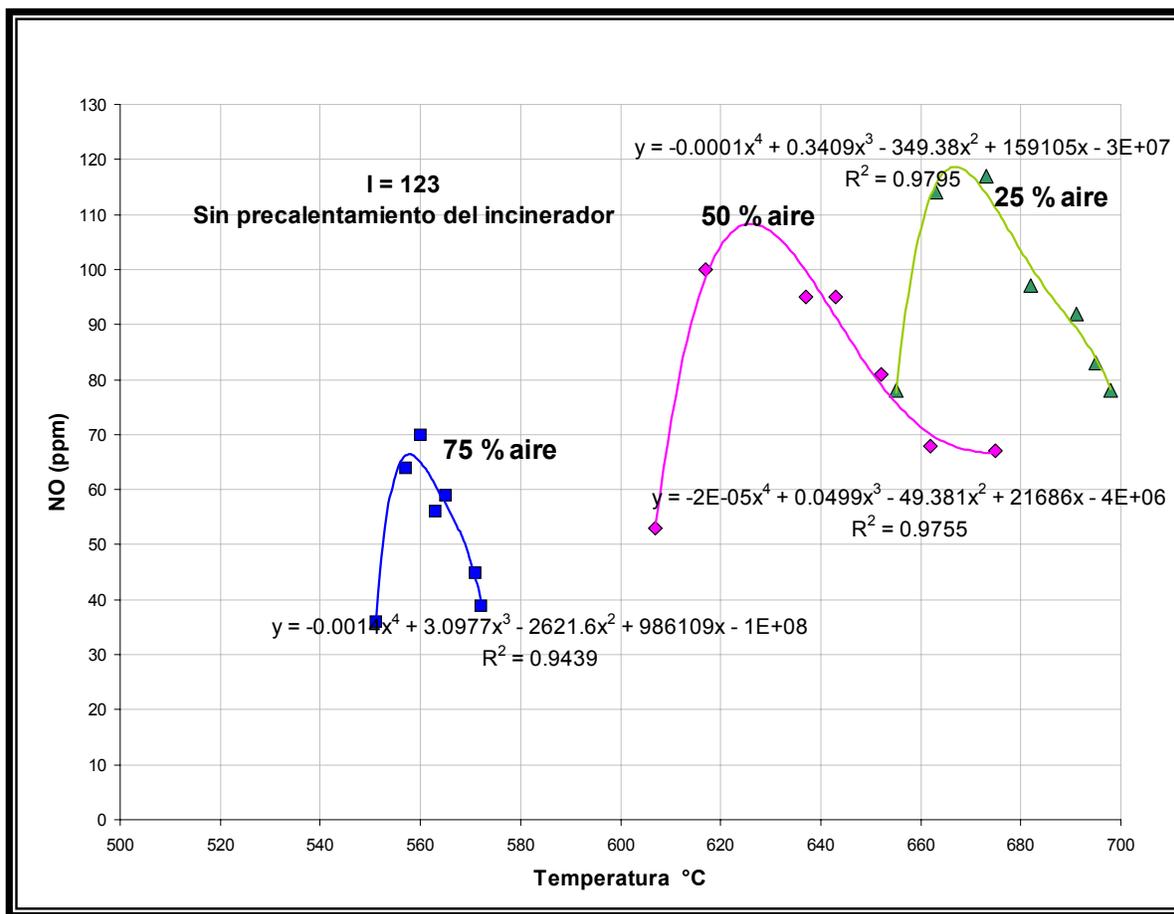


Figura V.7. Gráfica de la producción de NO a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador.

### V.3. Determinación la condición óptima de entrada de aire al incinerador con precalentamiento

Se decidió realizar tres pruebas a tres diferentes capacidades de ingreso de aire suministrado al incinerador con el mismo tipo de residuo pero esta vez precalentando el incinerador con gas L.P. hasta alcanzar temperaturas arriba de los 700 °C en la segunda cámara. Dado que en el experimento anterior no se alcanzo la temperatura óptima arriba de los 800 °C. Los resultados de estas pruebas se muestran a continuación en las tablas V.11, V.12 y V.13.

Tabla V.11. Resultados de la prueba de incinerabilidad con precalentamiento del incinerador a 75 % de la capacidad de entrada de aire suministrado

Parámetro	TIEMPO (minutos)						
	5	10	15	20	25	30	35
Temperatura 1era cámara (°C)	581	568	545	529	526	528	529
Temperatura 2da cámara (°C)	714	696	679	671	664	654	639
O <sub>2</sub> (%)	8.2	8.5	9.9	10	12	13	14
CO <sub>2</sub> (%)	9.6	8.4	7.6	7.4	6.3	5	5.4
NO (ppm)	90	89	88	74	71	66	60
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>x</sub> (ppm)	90	89	88	74	71	66	60
SO <sub>2</sub> (ppm)	1	1	1	1	1	1	1
CO (ppm)	3	0	0	0	0	0	0

Tabla V.12. Resultados de la prueba de incinerabilidad con precalentamiento del incinerador a 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado

Parámetro	TIEMPO (minutos)						
	5	10	15	20	25	30	35
Temperatura 1era cámara (°C)	578	561	546	548	545	542	541
Temperatura 2da cámara (°C)	776	747	714	696	675	654	634
O <sub>2</sub> (%)	7.2	8.6	8.8	9.1	9.6	11.5	11.7
CO <sub>2</sub> (%)	9.3	8.6	7.6	7.5	7.3	6.9	5.7
NO (ppm)	112	108	94	90	84	78	68
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
NOx (ppm)	112	108	94	90	84	78	68
SO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
CO (ppm)	10	12	13	10	8	8	7

Tabla V.13. Resultados de la prueba de incinerabilidad con precalentamiento del incinerador a 25 % de la capacidad de entrada de aire suministrado

Parámetro	TIEMPO (minutos)						
	5	10	15	20	25	30	35
Temperatura 1era cámara (°C)	616	602	590	580	582	586	581
Temperatura 2da cámara (°C)	765	756	750	744	743	740	735
O <sub>2</sub> (%)	2	5	7.3	8.3	8.8	9	9.5
CO <sub>2</sub> (%)	12.8	10.7	9.2	8.5	8.2	8.1	7.7
NO (ppm)	81	79	75	70	65	62	61
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
NOx (ppm)	81	79	75	70	65	62	61
SO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0
CO (ppm)	19	16	7	4	3	2	2

**V.3.1. Variación de la temperatura a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado de aire**

En las figuras V.8. y V.9. se muestran las gráficas de los datos de las temperaturas obtenidas en la primera y en la segunda cámara contra el tiempo de quemado a las diferentes capacidades de entrada de aire y con precalentamiento del horno.

En la tabla V.14. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmica de los datos de temperatura de la cámara primaria, con sus coeficientes de correlación para las tres diferentes capacidades de ingreso de aire y con precalentamiento del incinerador.

Tabla V.14. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación de las temperaturas obtenida en la cámara primaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
25%	$y = 0.071x^2 - 3.8738x + 633$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9452</b>	$y = -1.0357x + 611.71$ R <sup>2</sup> = 0.6992	$y = -18.347\text{Ln}(x) + 642.87$ R <sup>2</sup> = 0.8819
50%	$y = 0.0619x^2 - 3.5476x + 591.57$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9323</b>	$y = -1.0714x + 573$ R <sup>2</sup> = 0.7456	$y = -18.776\text{Ln}(x) + 604.66$ R <sup>2</sup> = 0.9205
75%	$y = 0.1052x^2 - 6.031x + 611.71$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9759</b>	$y = -1.8214x + 580.14$ R <sup>2</sup> = 0.7805	$y = -31.079\text{Ln}(x) + 631.58$ R <sup>2</sup> = 0.9134

En la tabla V.15. también se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmico de las temperaturas obtenidas en la cámara secundaria, con sus coeficientes de correlación para los tres diferentes ingresos de aire.

Tabla V.15 Ecuaciones de ajuste y coeficientes de las temperaturas de la cámara secundaria a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
25%	$y = 0.0214x^2 - 1.7786x + 772.43$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9821</b>	$y = -0.9214x + 766$ R <sup>2</sup> = 0.9438	$y = -14.865\ln(x) + 789.6$ R <sup>2</sup> = 0.9874
50%	$y = 0.0471x^2 - 6.5357x + 806.57$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9974</b>	$y = -4.65x + 792.43$ R <sup>2</sup> = 0.9898	$y = -72.428\ln(x) + 904.21$ R <sup>2</sup> = 0.9653
75%	$y = 0.0248x^2 - 3.3048x + 727.57$ <b>R<sup>2</sup> = 0.984</b>	$y = -2.3143x + 720.14$ R <sup>2</sup> = 0.9756	$y = -36.333\ln(x) + 776.58$ R <sup>2</sup> = 0.9666

En las tablas anteriores se observa que el mejor ajuste es el polinomial de segundo orden ya que el coeficiente de correlación fue el más alto con relación a los ajustes logarítmico y lineal tanto para los datos de temperatura de la primera cámara como de la segunda cámara a los tres diferentes ingresos de aire y con precalentamiento del incinerador.

En la figura V.8. y en la figura V.9. se observa un decaimiento de las temperaturas tanto en la primera cámara como en la segunda cámara conforme va aumentando el tiempo de incineración, debido que el horno se precalienta arriba de los 700 °C y el poder calorífico de los residuos no es capaz de aumentar y/o mantener la temperatura.

También se observa que la temperatura alcanzada es mayor cuando se introduce un 25 % de aire en la cámara primaria y en la cámara secundaria tal y como sucede cuando no se precalienta el incinerador, ésto se debe a que el aire que esta ingresando se encuentra a temperatura ambiente y por lo tanto enfría la cámara y a mayor cantidad de aire menor es la temperatura alcanzada en las cámaras.

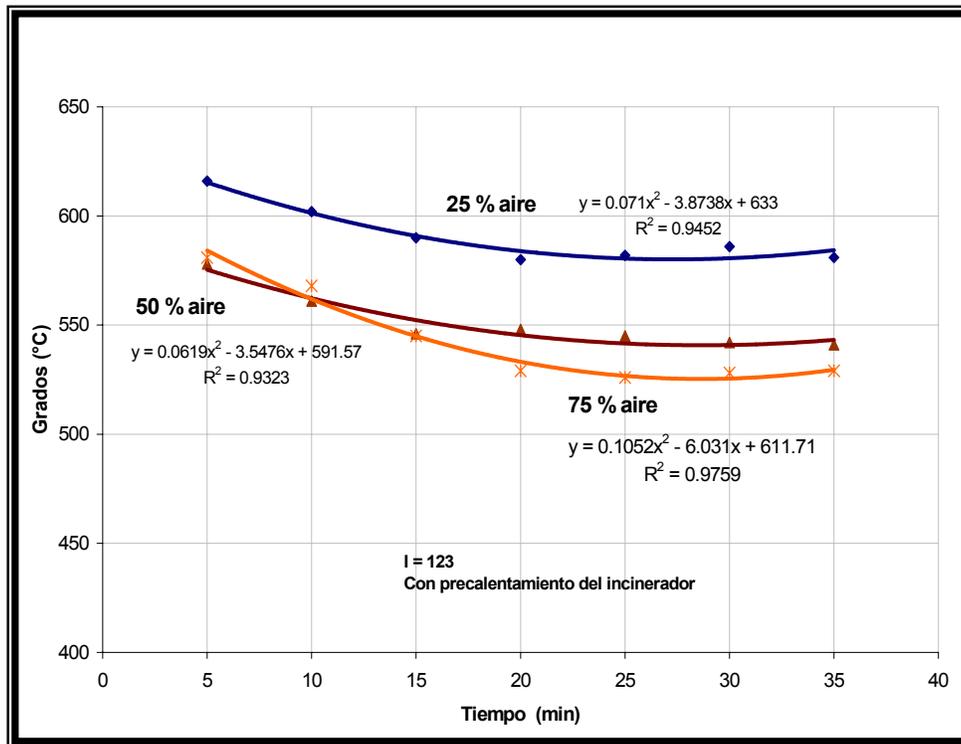


Figura V.8. Gráfica de variación de la temperatura en la primera cámara con precalentamiento a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

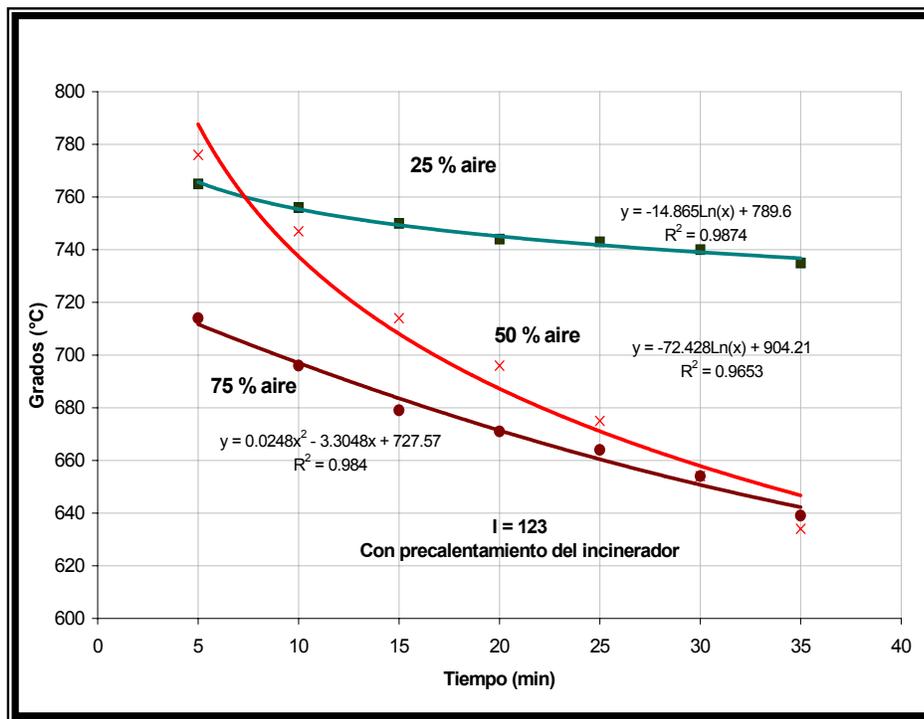


Figura V.9. Gráfica de variación de la temperatura en la segunda cámara con precalentamiento a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

Al realizar la comparación cuando se precalienta el horno y cuando no se precalienta se obtiene que para la primera cámara según la figura V.1. las máximas temperaturas alcanzadas son del orden de 400- 500 °C, y cuando se precalienta el incinerador con gas L.P. la mínima temperatura alcanzada es de 530 °C y las máximas se encuentran arriba de los 600°C tal como se muestra en la figura V.8.

En cuanto al comportamiento de las temperaturas en la segunda cámara en la figura V.2. se observa que cuando no se precalienta el incinerador que las temperaturas van del orden de 500 a 700 °C y cuando se precalienta (figura V.9.) se observan temperaturas de 620 a 760 °C, sin poder alcanzar la temperatura establecida en la norma oficial mexicana, que marca que la segunda cámara debe de estar arriba de los 800 °C.

**V.3.2. Variación de las emisiones a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador y con precalentamiento del mismo**

**V.3.2.1. Oxígeno**

En la figura V.10. se muestra la emisión de O<sub>2</sub> a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado y a diferentes temperaturas, la temperatura a la que se está relacionando es la de la segunda cámara. En la tabla V.16. Se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmico de la producción de oxígeno obtenidas en la chimenea con el equipo TESTO, con sus coeficientes de correlación para los tres diferentes ingresos de aire, para obtener el ajuste óptimo a los datos.

Tabla V.16. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la emisión de oxígeno con precalentamiento a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
75%	$y = 0.0006x^2 - 0.8246x + 315.93$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9508</b>	$y = -0.0787x + 63.75$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9248</b>	$y = -53.411\ln(x) + 358.52$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9299</b>
50%	$y = 0.0001x^2 - 0.1933x + 87.917$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9296</b>	$y = -0.0304x + 30.769$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9064</b>	$y = -21.467\ln(x) + 150.07$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9145</b>
25%	$y = -0.006x^2 + 8.7724x - 3186.7$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9947</b>	$y = -0.2584x + 200.3$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9522</b>	$y = -193.58\ln(x) + 1288$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9497</b>

Por lo anterior el mejor ajuste realizado a los datos fue el polinomial de segundo orden, debido a que el coeficiente de correlación obtenido en este ajuste fue el más alto.

En la figura V.10 se observa en los tres casos un decaimiento de la temperatura pero un incremento en el oxígeno conforme va aumentando la temperatura. También se observa que la mayor cantidad de oxígeno se obtiene a mayor ingreso de aire (75 %) siguiendo 50 % y por último 25 % de aire. Lo cual es similar pero en con pendiente

positiva con los datos obtenidos cuando no se precalienta el incinerador como se muestra en la figura V.3.

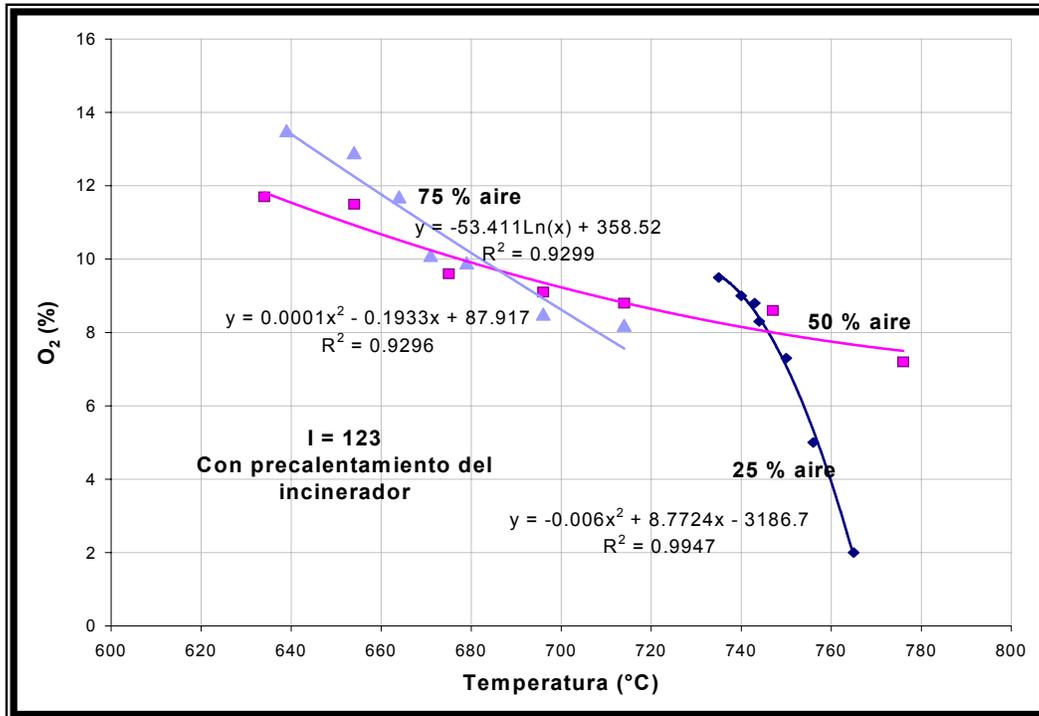


Figura V.10. Gráfica de la emisión de  $O_2$  con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

El comportamiento obtenido de la producción de  $O_2$  con precalentamiento o sin precalentamiento del incinerador es similar del orden de  $\pm 2\%$ .

### V.3.2.2. Monóxido de carbono

La producción de CO a diferentes capacidades de ingreso de aire, a diferentes temperaturas y con precalentamiento del incinerador se muestra en la figura V.11.

En la tabla V.17. se muestran las ecuaciones de ajuste logarítmica, lineal y exponencial de los datos de temperaturas obtenidos en la cámara secundaria, con sus coeficientes de correlación para los tres diferentes ingresos de aire al incinerador, para obtener el ajuste óptimo a los datos obtenidos.

Tabla V.17. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la producción de monóxido de carbono con precalentamiento a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial de orden tres y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste polinomial de orden dos y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
75%	$y = 4E-05x^3 - 0.0749x^2 + 49.839x - 11054$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9733</b>	$y = 0.0011x^2 - 1.4488x + 479.76$ R <sup>2</sup> = 0.832	$y = 20.881\ln(x) - 135.56$ R <sup>2</sup> = 0.4748
50%	$y = 8E-06x^3 - 0.0164x^2 + 11.067x - 2497.3$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9913</b>	$y = 0.0007x^2 - 0.9069x + 299.03$ R <sup>2</sup> = 0.9611	$y = 43.375\ln(x) - 281.45$ R <sup>2</sup> = 0.7693
25%	$y = 0.0006x^3 - 1.3x^2 + 964.89x - 238767$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9962</b>	$y = 0.0134x^2 - 19.654x + 7233.1$ R <sup>2</sup> = 0.9847	$y = 284.49\ln(x) - 1879$ R <sup>2</sup> = 0.8905

Con los resultados obtenidos del ajuste de los datos se observa que la mejor tendencia es la polinomial de orden tres debido a que el coeficiente de correlación es más alto que los otros dos casos.

En la figura V.11. se observa que al inicio de la incineración y donde se tiene la mayor temperatura la producción de CO es mayor y conforme se van agotando los residuos la producción de monóxido de carbono va disminuyendo hasta casi llegar a cero, lo cual es básicamente similar al comportamiento cuando no se precalienta el incinerador donde se ve una decaimiento exponencial ya que al inicio de la incineración la producción de CO se eleva arriba de los 100 ppm como se observa en la figura V.4.,ésto no sucede cuando se incinera con el horno precalentado ya que las emisiones no son mayores de 12 ppm.

De lo observado se tiene que la mayor emisión de CO se obtiene a menor ingreso de aire.

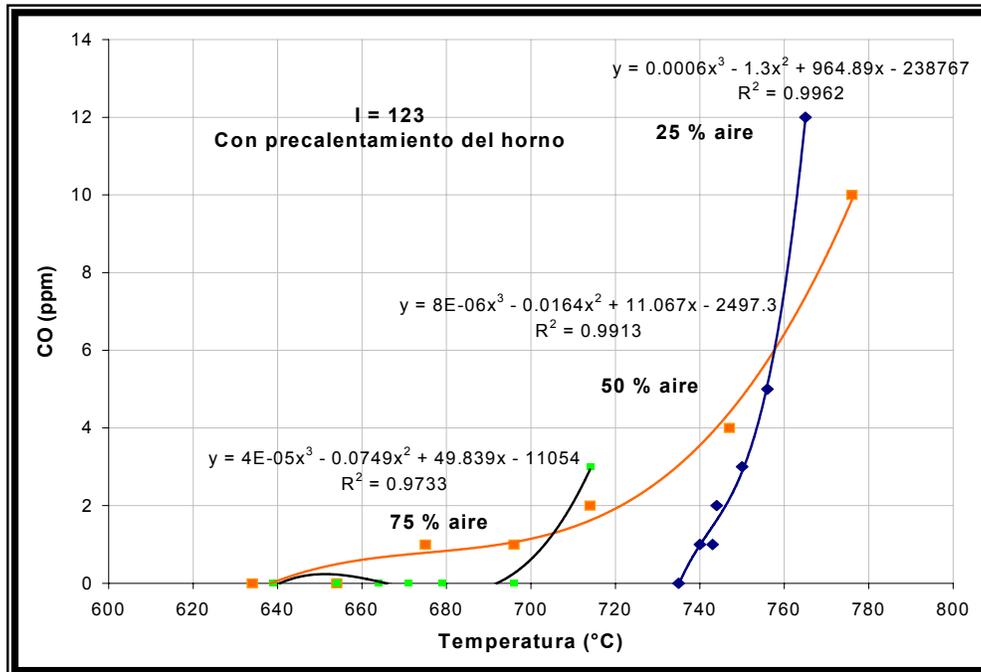


Figura V.11. Gráfica de la producción de CO con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

### V.3.2.3. Dióxido de carbono

Los resultados a diferentes ingresos de aire se muestran en la figura V.12, en la tabla V.18. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, lineal y logarítmico y sus coeficientes de correlación de los datos de producción de dióxido de carbono obtenidos en la chimenea con el equipo TESTO a diferentes temperaturas de la cámara secundaria, para las tres capacidades de ingreso de aire y con precalentamiento del incinerador.

Tabla V.18. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la producción del dióxido de carbono con precalentamiento a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
75%	$y = 8E-05x^2 - 0.0484x + 2.5268$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9227</b>	$y = 0.0624x - 34.932$ R <sup>2</sup> = 0.9218	$y = 42.157\ln(x) - 267.45$ R <sup>2</sup> = 0.9204
50%	$y = -3E-05x^2 + 0.0585x - 20.766$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9466</b>	$y = 0.0223x - 8.0641$ R <sup>2</sup> = 0.9444	$y = 15.716\ln(x) - 95.35$ R <sup>2</sup> = 0.9466
25%	$y = 0.0042x^2 - 6.0753x + 2223$ <b>R<sup>2</sup> = 0.996</b>	$y = 0.1741x - 120.85$ R <sup>2</sup> = 0.9513	$y = 130.44\ln(x) - 853.75$ R <sup>2</sup> = 0.9487

El ajuste óptimo para los datos de la producción de dióxido de carbono es el polinomial de segundo orden debido a que el coeficiente de correlación fue el más alto en relación con los otros dos ajustes a las tres diferentes capacidades de ingreso de aire al incinerador.

Aquí se observa que conforme aumenta la temperatura hay mayor formación de CO<sub>2</sub> sin embargo se observa que a los tres diferentes ingresos de aire en la figura V.12 empieza haber un decaimiento en la formación de CO<sub>2</sub> ya que la temperatura va disminuyendo además de que los residuos se van agotando y estos son la fuente principal de carbono tal y como se observó en la figura V.5. en la producción de CO<sub>2</sub> sin precalentamiento del incinerador, también se observa que las emisiones a 25 % y 50 % de ingreso de aire son similares cuando se calienta o no precalienta con excepción a 75% de aire dándose un aumento en la emisión de CO<sub>2</sub> cuando se precalienta el incinerador (8-14 %) con relación a cuando no se precalienta (5-7 %), sin embargo dadas las diferencias registradas no se considera relevante esta variación.

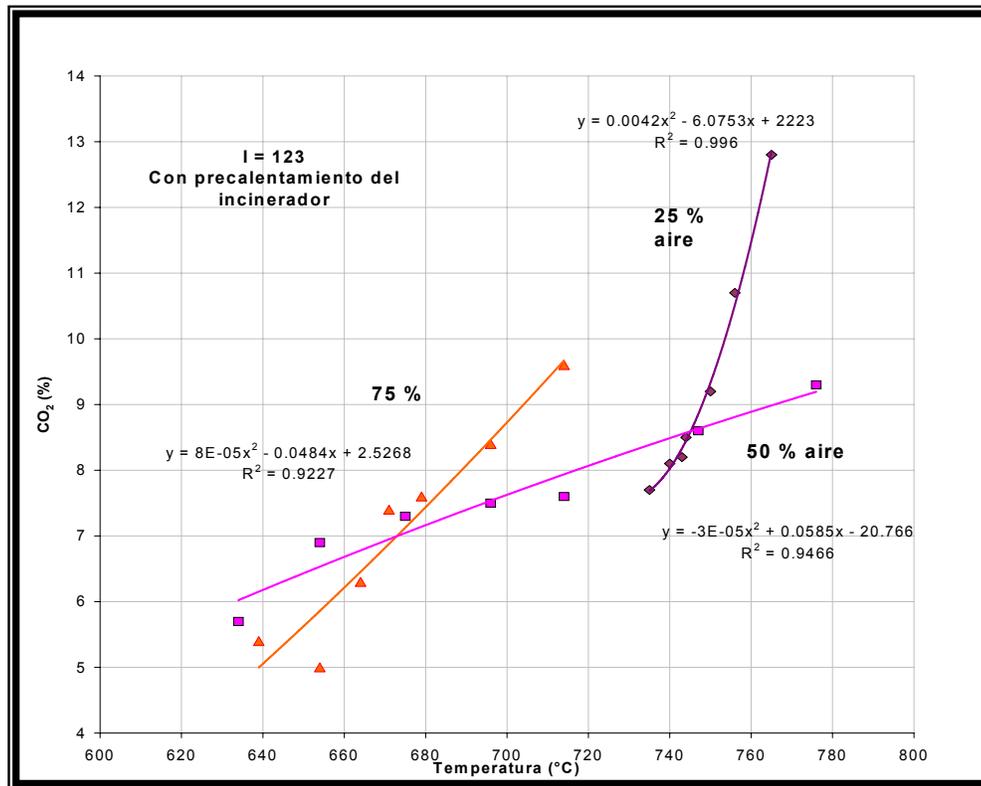


Figura V.12. Gráfica de la producción de CO<sub>2</sub> con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

### V.3.2.4. Óxido de nitrógeno

La formación de óxido de nitrógeno a los diferentes ingresos de aire y con precalentamiento del incinerador se observa en la figura V.13.

En la tabla V.19. se muestran las ecuaciones de ajuste polinomial, de orden dos, tres y cuatro de la producción de óxido de nitrógeno a las temperaturas obtenidas en la cámara secundaria, con sus coeficientes de correlación para los tres diferentes ingresos de aire.

Tabla V.19. Ecuaciones de ajuste y coeficientes de correlación para estimar la producción de óxido de nitrógeno con precalentamiento a las diferentes capacidades de entrada de aire al incinerador

Capacidad de entrada de aire suministrado	Ecuación de ajuste polinomial y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste lineal y coeficiente de correlación	Ecuación de ajuste logarítmico y coeficiente de correlación
75%	$y = -0.004x^2 + 5.9061x - 2070.6$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9094</b>	$y = 0.4483x - 225.25$ R <sup>2</sup> = 0.869	$y = 304.33\ln(x) - 1905.1$ R <sup>2</sup> = 0.8753
50%	$y = -0.0005x^2 + 1.0184x - 374.64$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9895</b>	$y = 0.3093x - 125.79$ R <sup>2</sup> = 0.9849	$y = 217.76\ln(x) - 1335.3$ R <sup>2</sup> = 0.988
25%	$y = -0.015x^2 + 23.218x - 8919.1$ <b>R<sup>2</sup> = 0.9397</b>	$y = 0.7564x - 495$ R <sup>2</sup> = 0.9104	$y = 567.97\ln(x) - 3687.7$ R <sup>2</sup> = 0.9123

De la tabla anterior se deduce que el mejor ajuste de los datos es el polinomial de segundo orden debido a que el coeficiente de correlación fue el más alto en comparación con los ajustes lineal y logarítmico.

En la figura V.13 se observa que existe mayor producción de NO a mayor temperatura. El mismo comportamiento sucede cuando no se precalienta el incinerador como se muestra en la grafica V.7, observándose también que a 25 % de aire se tiene la mayor producción de NO ya que se alcanza la máxima temperatura en esta condición, lo contrario sucede cuando se precalienta el incinerador resultando que a 50 % de ingreso de aire se alcanza la máxima temperatura con la máxima producción de NO. Por lo que se deduce que el mecanismo de formación de NO es el térmico ya que a mayor temperatura mayor producción de NO.

En cuanto al límite de 368 ppm que establece la NOM-ECOL-098-2000, las emisiones debidas a la incineración de los residuos de la UAM no rebasan la norma en ninguno de los dos casos.

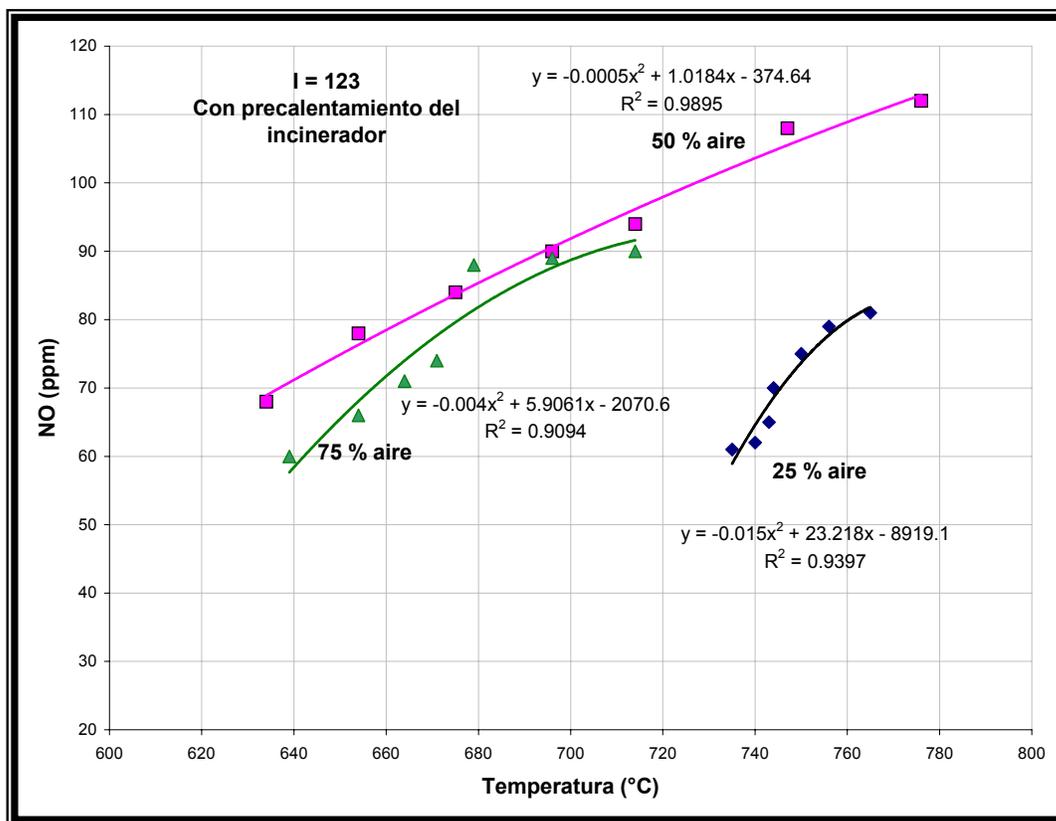


Figura V.13. Gráfica de la producción de NO con precalentamiento, a diferentes temperaturas y a diferentes capacidades de entrada de aire suministrado al incinerador

V.4. Determinación de la influencia de los residuos en la incineración, reduciendo el área superficial de los mismos .....	110
V.4.1. Variación de la temperatura con 50 % de residuos molidos y 100 % de residuos enteros .....	111
V.4.2. Variación de las emisiones con 50 % de residuos molidos y 100 % de residuos enteros .....	112
V.4.2.1. Oxígeno .....	112
V.4.2.2. Monóxido de carbono .....	113
V.4.2.3. Dióxido de carbono .....	114
V.4.2.4. Oxidos de nitrógeno .....	115
V.5. Variación del Poder calorífico .....	116
V.5.1. Variación de la temperatura a diferentes indicadores de incinerabilidad ...	118
V.5.2. Variación de la emisiones a diferentes indicadores de incinerabilidad.....	119
V.5.2.1. Oxígeno .....	119
V.5.2.2. Monóxido de carbono .....	120
V.5.2.3. Dióxido de carbono .....	121
V.5.2.4. Óxido de nitrógeno .....	122

---

**V.4. Determinación de la influencia de los residuos en la incineración, reduciendo el área superficial de los mismos**

Para determinar la influencia de los residuos se realizó una prueba a 50 % capacidad de suministro de aire precalentando el incinerador arriba de los 700 °C con variaciones en la forma de alimentación de los residuos adicionando 50 % molidos del total y 50 % enteros, con un indicador de incinerabilidad de 123. Los resultados se muestran en la tabla V.20.

Tabla V.20. Resultados de prueba de incinerabilidad a 50 % de capacidad de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador, con 50% de residuos molidos y 50% de residuos enteros

Parámetro		TIEMPO (minutos)						
		5	10	15	20	25	30	35
Temperatura cámara (°C)	1era	398	441	460	469	474	447	429
Temperatura cámara (°C)	2da	755	735	715	695	686	656	645
O <sub>2</sub> (%)		9	10.1	10.7	10.6	10.9	11.5	11.8
CO <sub>2</sub> (%)		8.1	6.9	6.8	6.7	6.5	6.4	6.2
NO (ppm)		105	97	96	92	85	81	77
NO <sub>2</sub> (ppm)		0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>x</sub> (ppm)		105	97	96	92	85	81	77
SO <sub>2</sub> (ppm)		1	1	1	1	1	1	1
CO (ppm)		9	9	7	5	4	4	3

Los resultados se compararon con los resultados obtenidos en la tabla V. 12, los cuales son los derivados de la incineración de residuos 100 % enteros a 50 % de ingreso de aire y con precalentamiento del incinerador, lo anterior para poder comparar los residuos a las mismas condiciones con la única variante de que se alimentó el incinerador con 50 % enteros y 50% molidos.

**V.4.1. Variación de la temperatura con 50 % de residuos molidos y 100 % de residuos enteros**

Los datos obtenidos de la temperatura de la segunda cámara a diferentes tiempos comparados cuando se adicionan 50% de residuos molidos y 100 % enteros se muestran en la figura V.14.

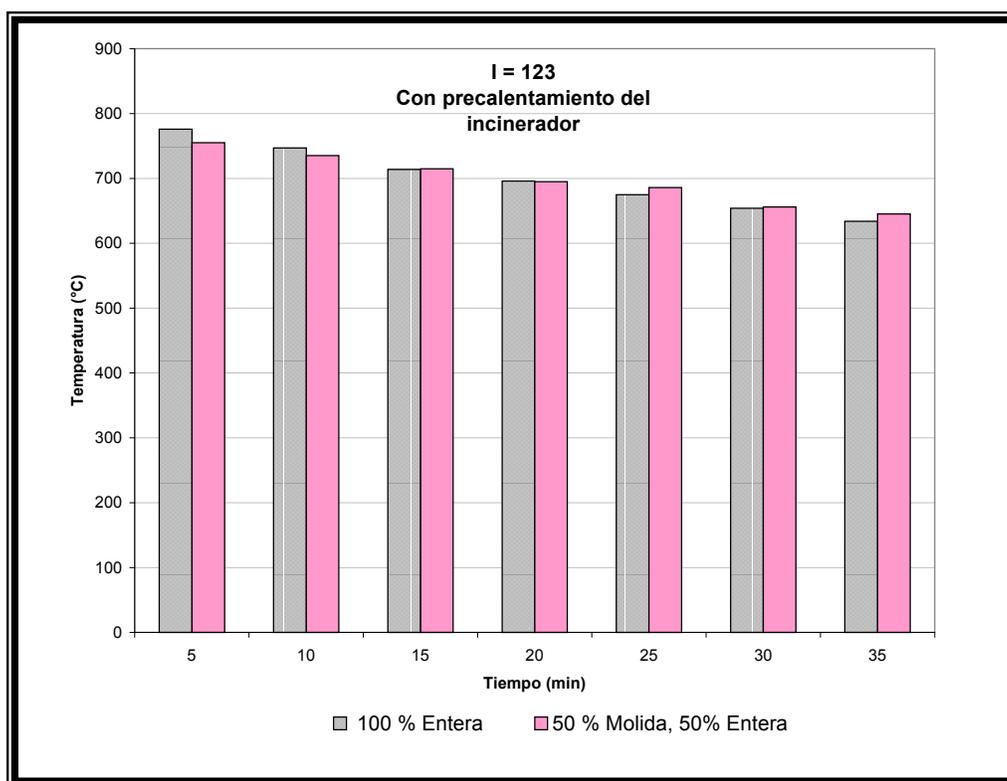


Figura V.14. Gráfica de la variación de la temperatura cuando se alimenta al incinerador con residuos 100 % enteros y 50% molidos –50 % enteros

En esta gráfica se puede observar que la temperatura es prácticamente la misma (+/- 2% de variación) en los dos casos ya que los residuos contienen el mismo poder calorífico y la misma composición por lo que la forma de adicionar el residuo no influye en la temperatura.

**V.4.2. Variación de las emisiones con 50 % de residuos molidos y 100 % de residuos enteros**

**V.4.2.1. Oxígeno**

La variación de la producción de oxígeno cuando se alimenta al incinerador residuos 50% enteros y 50% molidos en comparación cuando se alimenta 100 % enteros se muestra en la figura V.15.

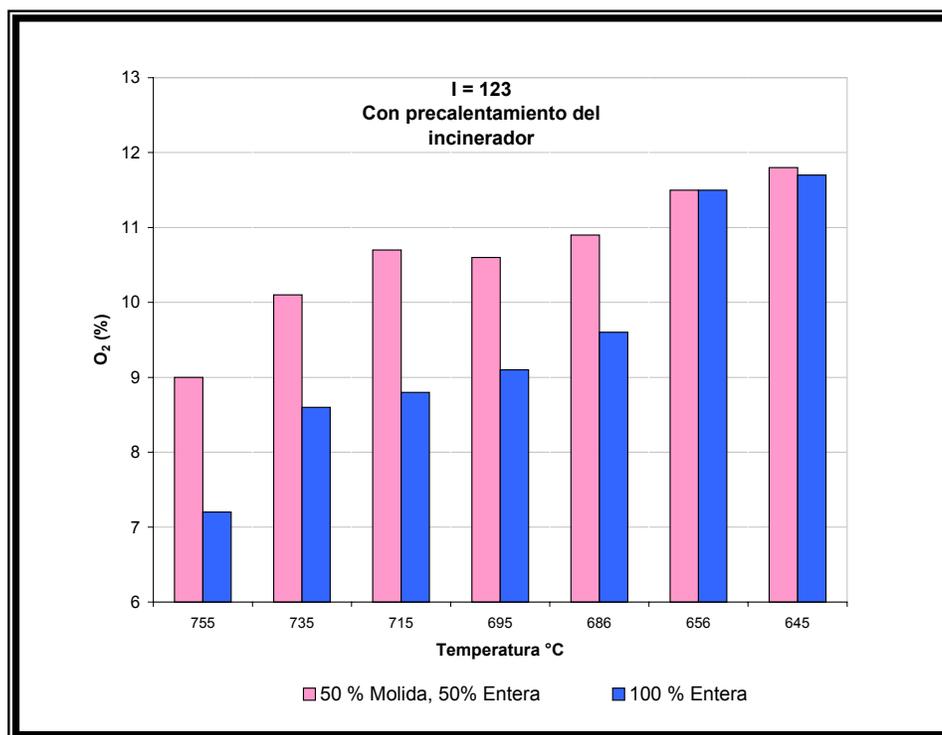


Figura V.15. Gráfica de la variación de la emisión de O<sub>2</sub> cuando se alimenta al incinerador con residuos 100% enteros y 50% molidos –50 % enteros

En la figura anterior se observa que la emisión de O<sub>2</sub> es mayor (+/- 25% de variación) cuando se alimentan al incinerador los residuos 50% molidos y 50 % enteros, en relación a cuando se alimentan 100 % enteros, lo anterior se debe a que el volumen de los residuos 50 % molido es menor, por lo que la circulación del aire es mejor en esta condición, lo contrario pasa cuando los residuos están en forma completa ya que actúan como pantalla y no permiten el ingreso del aire adecuadamente a la cámara

primaria, lo anterior se corrobora a que conforme transcurre el tiempo la emisión de  $O_2$  es casi la misma en los dos casos ya que los residuos se van consumiendo y el volumen se va reduciendo.

#### V.4.2.2. Monóxido de carbono

La variación de la emisión de monóxido de carbono se observa en la figura V.16. cuando el incinerador es alimentando con residuos 50% molidos y 50% enteros y comparado cuando se alimenta con los residuos 100% enteros.

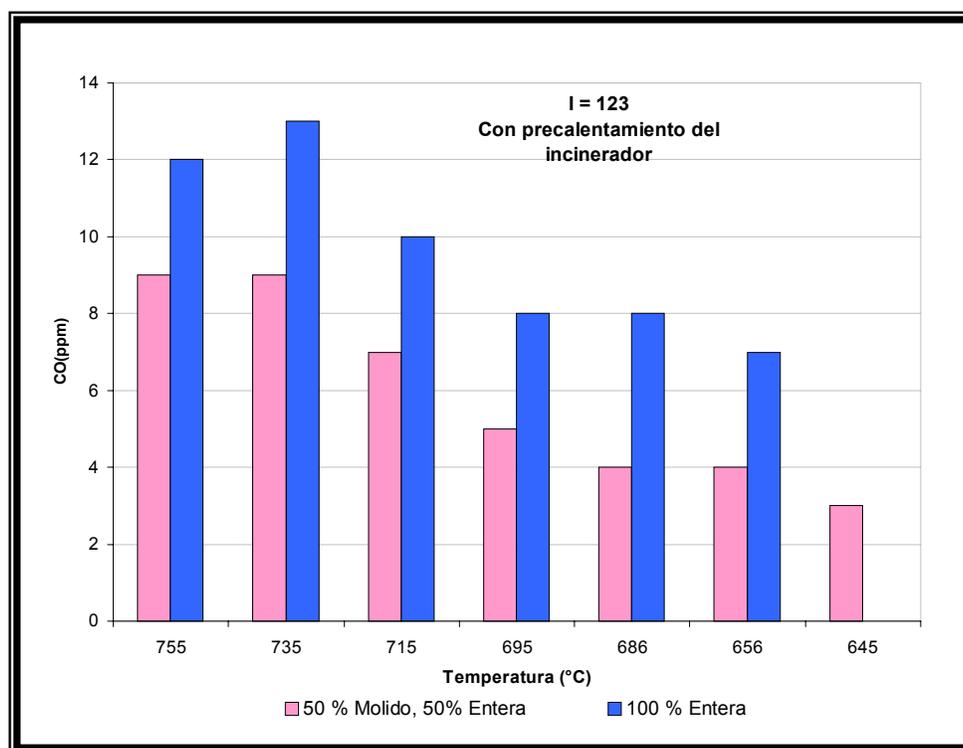


Figura V.16. Gráfica de la variación de la producción de CO cuando se alimenta al incinerador con los residuos 100 % enteros y residuos 50% molidos –50 % enteros.

Como en el caso de la producción de  $O_2$  la emisión de CO es mayor (+/- 50% de variación) cuando se alimenta al incinerador con los residuos 100% enteros, puesto que el aire ingresado a la cámara primaria, no alcanza a llegar a todos los residuos, ya que estos ocupan todo el volumen de la cámara, por lo que hay zonas con ausencia

de oxígeno lo que provoca mayor emisión de CO, no sucediendo lo mismo, cuando se adiciona 50% entero –50% molido, siendo el que se ocupa un menor volumen y donde existe mayor circulación de aire.

### V.4.2.3. Dióxido de carbono

La variación de la producción de dióxido de carbono se observa en la figura V.17. cuando se alimentan al incinerador los residuos 100 % enteros y 50% enteros- 50% molidos.

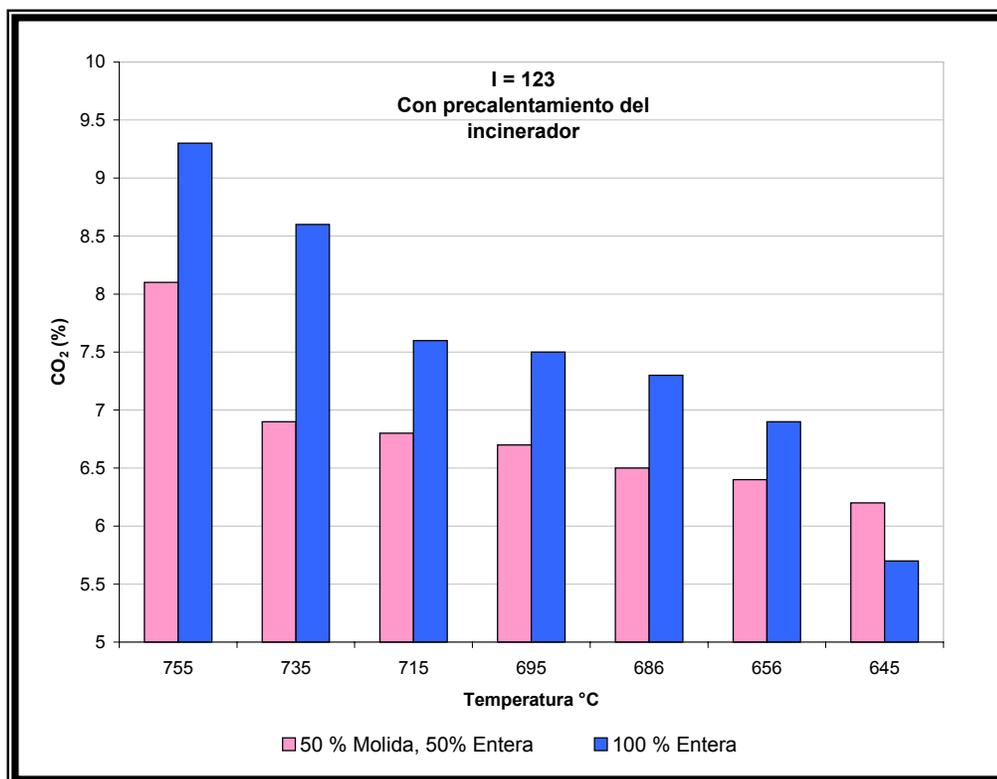


Figura V.17. Gráfica de la variación de la producción de CO<sub>2</sub> cuando se alimenta al incinerador los residuos enteros y residuos 50% molidos –50 % enteros

En la gráfica V.17, la mayor producción de CO<sub>2</sub> se presenta cuando se adiciona al incinerador los residuos 100 % enteros existe un +/- 20 % de variación, ya que la combustión de los residuos es más eficiente, con relación a la entrada de aire.

**V.4.2.4. Oxidos de nitrógeno**

Los datos obtenidos de la producción de óxido de nitrógeno a las diferentes formas de alimentar el incinerador con 100 % entera y 50% molidos - 50 % enteros de los residuos se observa en la figura V.18.

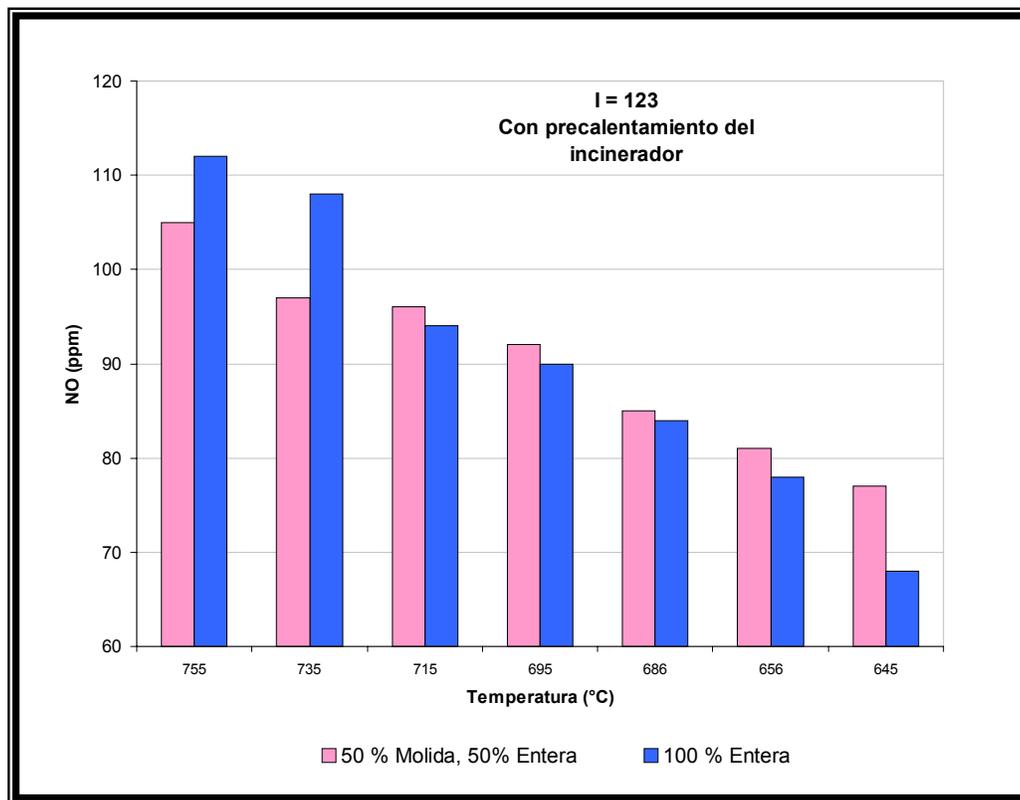


Figura V.18. Gráfica de la variación de la producción de NO cuando se alimenta al incinerador con los residuos enteros y residuos 50% molidos –50 % enteros

En la figura V.18 se observa que la mayor producción de NO es a mayores temperaturas y cuando se alimenta los residuos 100% enteros, obteniéndose que a menor temperatura (por debajo de los 715 °C) la producción de NO es casi igual (+/- 12 de variación).

### V.5. Variación del Poder calorífico

Las pruebas de incinerabilidad para este apartado fueron realizadas con diferentes residuos para obtener diferentes indicadores de incinerabilidad como se muestra en la tabla V.21. para así poder comparar esta variable en la influencia de las emisiones a 50% de capacidad de ingreso de aire y con precalentamiento del incinerador. Los resultados de esta prueba se encuentran en las tablas V.22, V.23 y V.24.

Tabla V.21. Indicadores de incinerabilidad de los residuos

Residuo	Índice de Incinerabilidad (I)
Residuos sin vidrio y sin metal	123
Residuos del taller de madera con papel	132
Residuos de Jardín con papel	130
Residuos del taller de plásticos con PET	112

Tabla V.22. Resultados de prueba de incinerabilidad con I = 132, a 50 % de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador

Parámetro	TIEMPO (minutos)							
	5	10	15	20	25	30	35	
Temperatura cámara (°C) 1era	525	581	576	585	582	579	585	
Temperatura cámara (°C) 2da	750.5	743.9	735.8	736.1	731.6	733.3	723.5	
O <sub>2</sub> (%)	9.1	10.2	11.1	11.2	11.9	11.8	12.3	
CO <sub>2</sub> (%)	8	7.2	6.6	6.6	6.1	6.2	5.8	
NO (ppm)	159	137	120	121	110	106	100	
NO <sub>2</sub> (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	
NO <sub>x</sub> (ppm)	159	137	120	121	110	106	100	
SO <sub>2</sub> (ppm)	1	1	1	1	1	1	1	
CO (ppm)	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla V.23. Resultados de prueba de incinerabilidad con I = 130, a 50 % de capacidad de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador

Parámetro		TIEMPO (minutos)						
		5	10	15	20	25	30	35
Temperatura cámara (°C)	1era	500	546	546	558	550	540	541
Temperatura cámara (°C)	2da	729.8	740.9	735.0	727.9	727.4	731.8	744.4
O <sub>2</sub> (%)		9.2	9.9	10.6	11.2	11.1	11.3	11.7
CO <sub>2</sub> (%)		7.9	7.4	6.9	6.6	6.6	6.5	6.2
NO (ppm)		149	146	130	110	104	99	91
NO <sub>2</sub> (ppm)		0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>x</sub> (ppm)		149	146	130	110	104	99	91
SO <sub>2</sub> (ppm)		1	1	1	1	1	1	1
CO (ppm)		0	0	0	0	0	0	0

Tabla V.24. Resultados de prueba de incinerabilidad con I = 112 a 50 % de capacidad de ingreso de aire –con precalentamiento del incinerador

Parámetro		TIEMPO (minutos)						
		5	10	15	20	25	30	35
Temperatura cámara (°C)	1era	484	529	554	561	580	583	584
Temperatura cámara (°C)	2da	780.3	743.1	743.4	724	730.9	737.2	741.6
O <sub>2</sub> (%)		2.3	5.8	7.1	8.7	10.1	9.4	9.6
CO <sub>2</sub> (%)		12.6	10.2	9.3	8.2	7.3	7.8	7.7
NO (ppm)		70	110	124	118	105	107	101
NO <sub>2</sub> (ppm)		0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>x</sub> (ppm)		70	110	124	118	105	107	101
SO <sub>2</sub> (ppm)		10	2	2	1	1	1	1
CO (ppm)		384	12	2	0	0	0	0

Hay que mencionar que mientras menor sea el indicador de incinerabilidad el residuo es más incinerable. (Brunner, 1993)

Los cálculos del indicador de incinerabilidad fueron realizados en punto IV.3.

### V.5.1. Variación de la temperatura a diferentes indicadores de incinerabilidad

La variación de la temperatura a diferentes indicadores de incinerabilidad se muestra en la figura V.19.

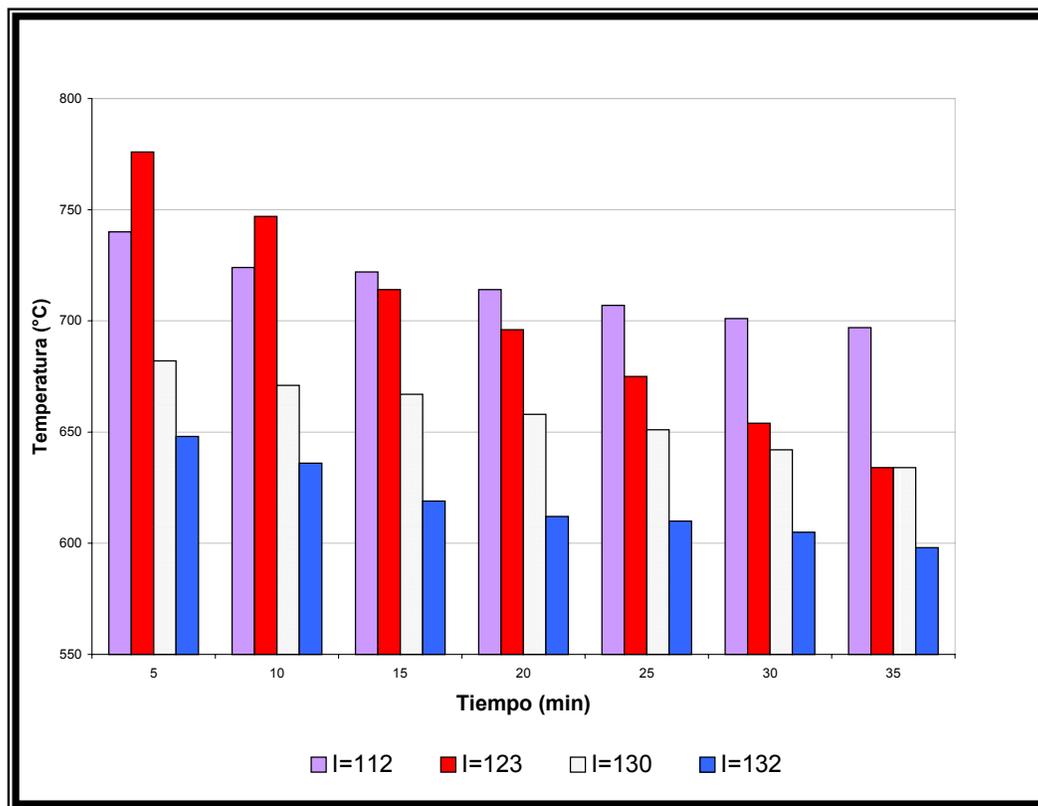


Figura V.19. Gráfica de la variación de la temperatura a diferentes indicadores de incinerabilidad

Del análisis anterior se tiene que la temperatura máxima es lo que presenta el menor indicador de incinerabilidad (I=112) puesto que el poder calorífico de estos residuos está por encima de las 8000 cal/g, por lo que es un residuo potencialmente incinerable.

En esta gráfica se observa la influencia del poder calorífico en la temperatura de la segunda cámara, ya que los mayores indicadores de incinerabilidad presentan una menor temperatura a las mismas condiciones.

## V.5.2. Variación de la emisiones a diferentes indicadores de incinerabilidad

### V.5.2.1. Oxígeno

La variación de la emisión de oxígeno se observa en la figura V.20. a diferentes indicadores de incinerabilidad.

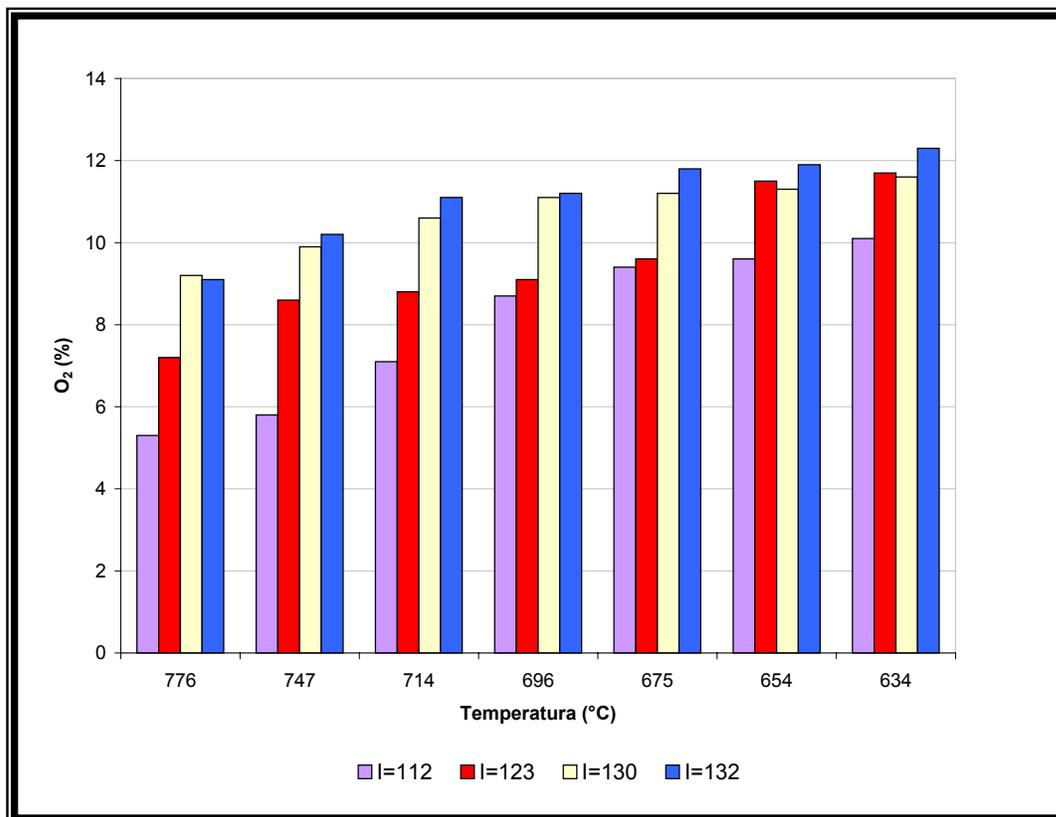


Figura V.20. Gráfica de la variación de la emisión de O<sub>2</sub> a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire y con precalentamiento del incinerador.

De la gráfica se observa que la emisión de oxígeno conforme aumenta la temperatura es casi la misma a los diferentes indicadores de incinerabilidad 123, 130 y 132, obteniéndose que para un indicador de incinerabilidad 112 se tiene la menor emisión de O<sub>2</sub>.

### V.5.2.2. Monóxido de carbono

La variación de la producción de monóxido de carbono se observa en la figura V.21. a indicadores de incinerabilidad.

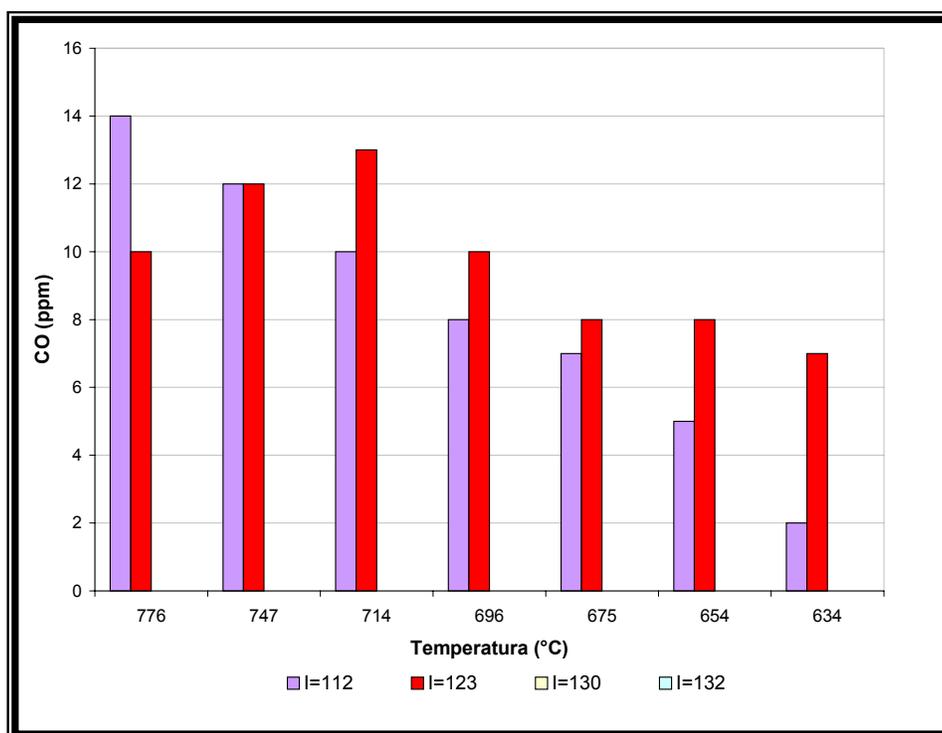


Figura V.21. Gráfica de la variación de la producción de CO a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire, con precalentamiento del incinerador

Se deduce por la observación de la gráfica que los residuos con un indicador de incinerabilidad de 130 y 132 no producen monóxido de carbono, lo anterior se puede deber a que el volumen de estos residuos es menor en comparación con los otros dos tipos de residuo, ya que los residuos del taller de plásticos con PET presentan un mayor volumen junto con los residuos enteros de la UAM-A en comparación con los de madera y jardín, por lo que provocan que se presenten espacios dentro del incinerador donde el aire no alcanza a mezclarse bien, generando productos de la combustión incompletos.

### V.5.2.3. Dióxido de carbono

La variación de la producción del dióxido de carbono se presenta en la figura V.22. a diferentes indicadores de incinerabilidad.

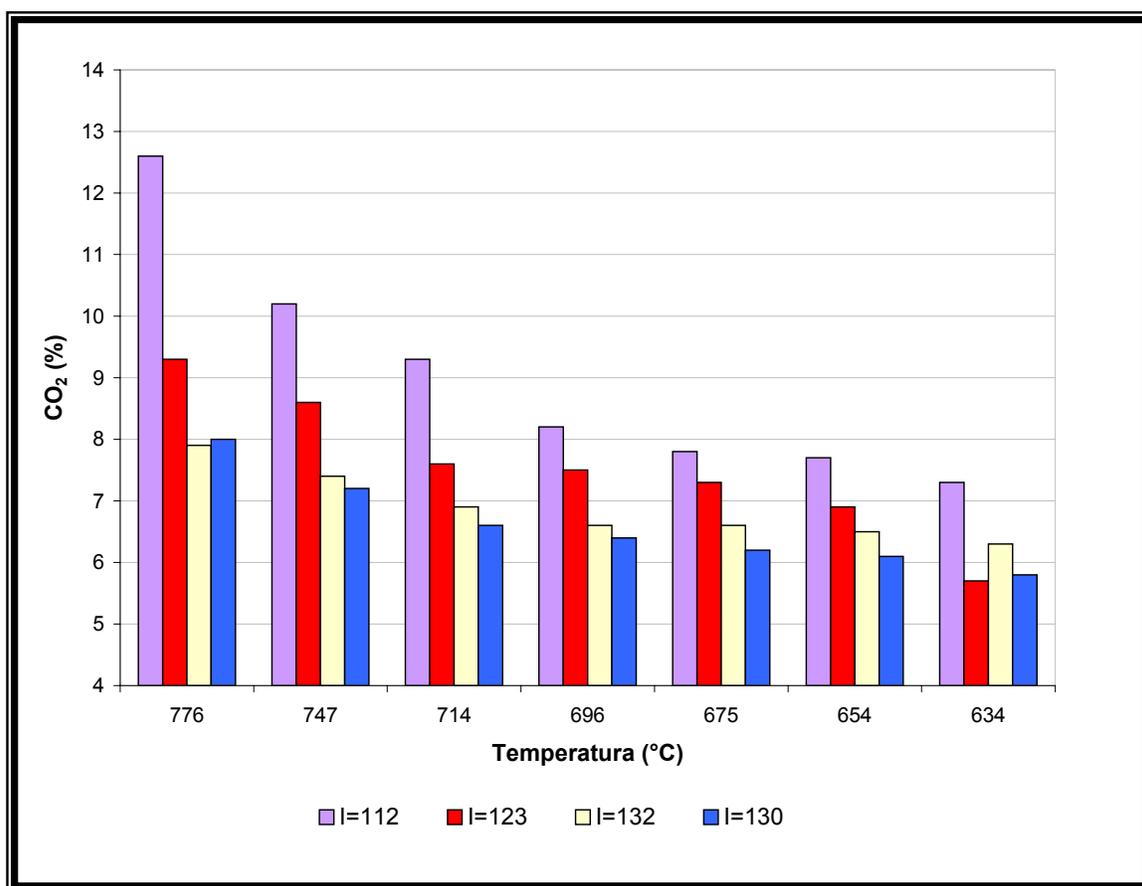


Figura V.22. Gráfica de la variación de la producción de CO<sub>2</sub> a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire con precalentamiento del incinerador

El CO<sub>2</sub> se presenta en mayor cantidad cuando incineramos residuos con un alto poder calorífico y con un índice de incinerabilidad menor. Lo anterior es que se alcanzan temperaturas mayores en esta condición provocando que las reacciones se completen.

### V.5.2.4. Óxido de nitrógeno

La variación de la producción de óxido de nitrógeno se muestra en la figura V.23. a diferentes indicadores de incinerabilidad.

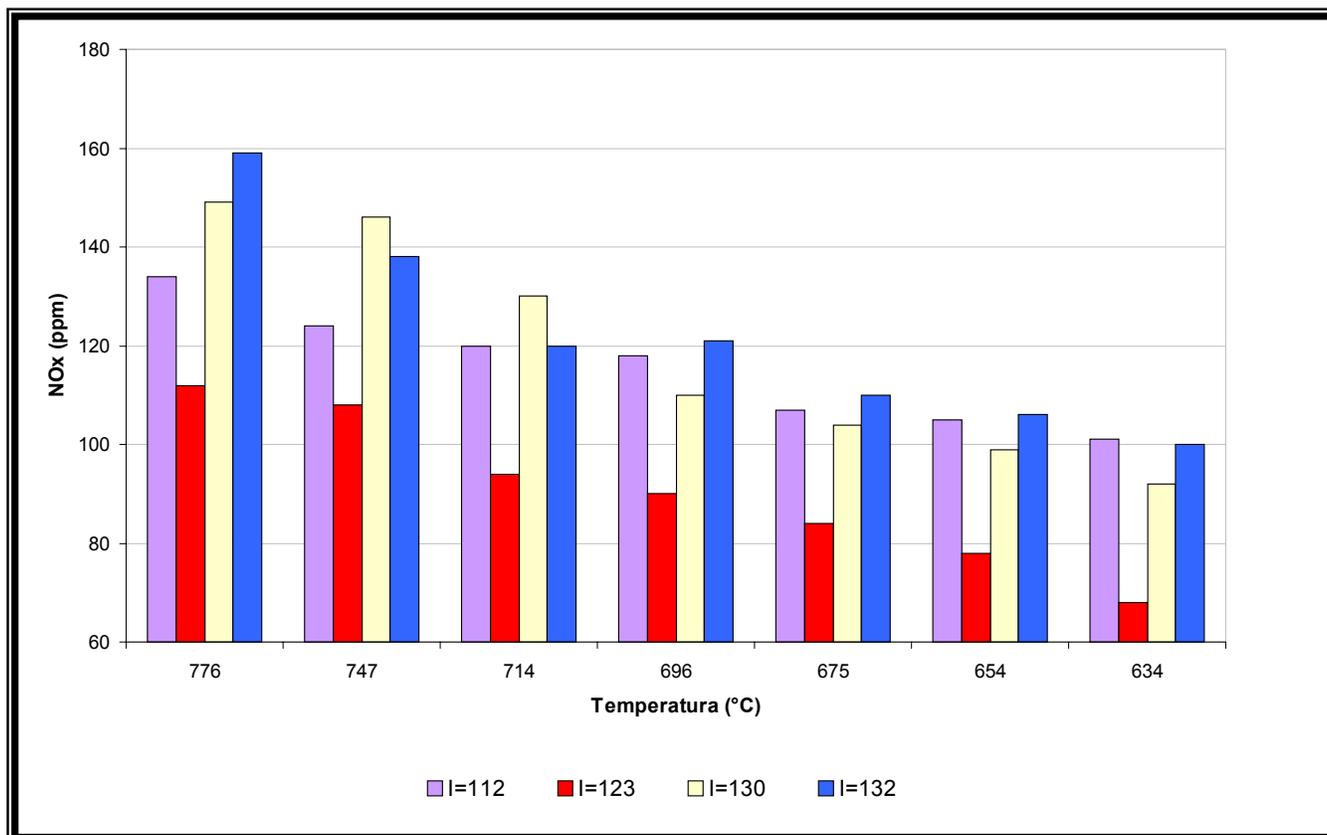


Figura V.23. Gráfica de la variación de la producción de NO a diferentes indicadores de incinerabilidad a 50% de capacidad de ingreso de aire con precalentamiento del incinerador.

La mayor cantidad de NO se logra cuando se incineran residuos con un indicador de incinerabilidad de 132, lo cual se debió a la composición de los residuos que se están incinerado ya que el residuo de jardín ( I=130) y el residuo de madera (I=132) contiene mayor cantidad de nitrógeno, por lo que en este caso, intervienen los mecanismos de formación de NO, térmico y el del combustible.

El NO térmico interviene con los residuos de menor índice de incinerabilidad (I=112, I=123) en donde se presenta la mayor temperatura y existe la mayor producción de NO, y comparando estos dos valores se obtiene que el que genera más NO es el que posee el mayor poder calorífico (I=112).

VI. Conclusiones y recomendaciones.....	124
VI.1. Conclusiones generales .....	124
VI.2. Conclusiones específicas .....	125
VI.3. Recomendaciones.....	128

## **VI. Conclusiones y recomendaciones**

### **VI.1. Conclusiones generales**

De acuerdo con los datos generados se tienen las siguientes conclusiones generales:

- Las emisiones se pueden reducir o incluso controlar si se establecen las condiciones óptimas de operación en residuos susceptibles de incinerarse, es decir, de aquellos que tienen un poder calorífico capaz de generar calor y mantener una temperatura de combustión, propiedad que se puede describir por el indicador de incinerabilidad de un residuo, variable que es necesaria evaluar y considerar para optimizar el proceso.
- Las condiciones óptimas de operación están vinculadas con la relación aire-combustible, la temperatura, el tiempo de retención y un mezclado eficiente (turbulencia).
- El mezclado se puede optimizar reduciendo el área superficial de los residuos a través de operaciones de trituración y/ molienda, es decir pulverizando el residuo para incrementar la transferencia de masa y calor.
- Si se trabaja en las condiciones óptimas además de reducir y/o controlar las emisiones se puede obtener un ahorro en el consumo de combustible auxiliar y reducir los costos de mantenimiento de las instalaciones.

## VI.2. Conclusiones específicas

Adicionalmente con relación a las variables que se controlaron directa o indirectamente en la experimentación realizada, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

### - Temperatura

Esta variable debe de ser mayor de los 800 °C en la segunda cámara tal y como lo establece el proyecto de la NOM-ECOL-098-2000, en las pruebas de incinerabilidad realizadas en esta tesis, por el diseño del incinerador esta temperatura nunca se alcanzó, concluyendo lo siguiente:

La temperatura máxima alcanzada con y sin precalentamiento del incinerador se obtuvo cuando se introdujo un ingreso de aire de 25 % de la capacidad total, sin embargo en ninguno de los dos casos se obtuvo una temperatura arriba de los 800 °C, ya que cuando se precalentó el incinerador, la temperatura al inicio de las pruebas de incineración alcanzó arriba de los 700 °C sin embargo al introducir los residuos se observó una decaimiento en la misma, por lo que en este caso el poder calorífico de los residuos no pudo mantener o elevar la temperatura.

Sin embargo la norma maneja el rango de más de 800 °C en la segunda cámara considerando que se están incinerando residuos peligrosos y para garantizar que el componente más peligrosos sea destruido, por lo que en nuestro caso se trabajó con residuos municipales donde no existen componentes peligrosos y evaluando las emisiones generadas se obtuvo que no se rebasó los límites máximos permisibles del proyecto de la NOM-ECOL-098-2000.

Por lo anterior se concluye que las temperaturas alcanzadas sin precalentar el incinerador se encuentran en el rango de 500 °C y 700 °C y fueron las óptimas para incinerar este tipo de residuos y por lo tanto no es necesario precalentar el incinerador

ya que sólo se observan incrementos en el rango 600 °C a 700 °C y por lo contrario al hacerlo se gasta combustible auxiliar, incrementando los costos de incineración.

- Monóxido de carbono

En cuanto al monóxido de carbono se observó que se incrementa su emisión debido en gran medida al volumen y geometría propia de los residuos o sea al área superficial de los mismos ya que no existe la turbulencia adecuada en la cámara primaria al no permitir que el aire circule adecuadamente, generando zonas en donde la combustión es incompleta por la ausencia de aire.

Lo anterior fue comprobado cuando se adiciono al horno 50% molida y 50% entera con el mismo poder calorífico a 50% de capacidad de ingreso de aire, observándose una disminución del CO al igual que sucedió cuando se ingresaron residuos como los de jardín y residuos del taller de madera que está en forma de aserrín y que no ocupan todo el espacio disponible en la primera cámara.

Otra observación realizada fue que cuando se adicionaba menor cantidad de aire la producción de CO se incrementaba, además de que el precalentar el incinerador o no precalentarlo no afecta en las emisiones de CO.

- Óxido de nitrógeno

Como se observó el mecanismo de formación de NO dominante es el térmico ya que la condición que favorecía esta producción era con 25 % de ingreso de aire, en donde se alcanzo la mayor temperatura.

La forma de alimentar los residuos al incinerador ya sea 50 % molidos o 100 % enteros no influye en la formación de NO, ni tampoco si se precalienta el incinerador, ya que las

temperaturas alcanzadas en la segunda cámara son similares la formación de NO cuando no se precalienta.

Es importante considerar la composición de los residuos en cuanto a contenido de nitrógeno ya que si los residuos contienen mayor proporción de éste, el mecanismo que puede provocar mayor producción de NO es el del combustible.

Cabe mencionar que en ninguno de los casos se rebaso la norma oficial mexicana de 368 ppm.

- Óxidos de azufre

En este caso este contaminante no representó un problema ya que el contenido de azufre en los residuos de la UAM es muy bajo, se recomienda que se caractericen todos los residuos que se alimenten al incinerador para conocer el contenido de azufre de los mismos y poder evitar la emisión de este contaminante.

- Oxígeno y Dióxido de carbono

En cuanto a oxígeno y dióxido de carbono estos son productos de una combustión completa y dependen de la cantidad de aire introducido al incinerador por lo que su producción está regida en el control de aire que ingresa al incinerador, lo óptimo está en 50 % de ingreso de aire al incinerador, para un tipo de residuo con un indicador de incinerabilidad de 123.

### **VI.3. Recomendaciones**

Si se requiere trabajar con residuos que contengan componentes peligrosos es necesario incrementar la temperatura en la segunda cámara como está estipulado en el proyecto de la NOM-ECOL-098-2000.

La forma de modificar la temperatura del aire es introduciendo la menor cantidad de aire al incinerador.

Otra forma de incrementar la temperatura en la segunda cámara es aumentando el poder calorífico de los residuos tal y como se observó con los residuos que se adicionaron variando su indicador de incinerabilidad resultando que se alcanzan mayores temperaturas cuando el indicador es menor.

También por literatura se recomienda introducir aire precalentado para aumentar la eficiencia térmica del sistema, por lo que se recomienda que se le realicen modificaciones al incinerador para poder ingresar a las cámaras aire precalentado, o en su caso, se cambien los quemadores por otros de mayor capacidad, una vez que se garantice que el refractario tolerará estas condiciones de temperatura.

Para controlar la emisión de CO se recomienda introducir los residuos 50% molidos o en menor cantidad de ellos para poder incrementar la turbulencia dentro de la cámara primaria.

Para el control de NO se observó que el mecanismo dominante es el térmico por lo que se propone que se introduzca aproximadamente un 50 % de la capacidad de entrada de aire suministrado al incinerador para que la temperatura no se incremente además de cuidar que los residuos contengan cantidades mínimas de nitrógeno.

Como una recomendación general se propone no precalentar el incinerador ya que no se observó disminución de la producción de emisiones contaminantes y además se introduzcan al mismo los residuos molidos y/o triturados para incrementar el mezclado.

Se propone que se realicen pruebas con 40%, 30, 20, 10 % de capacidad de suministro de aire para observar el comportamiento del incinerador.

Asimismo, se sugiere que se realice un cambio en la alimentación manual de los residuos y se cambie por una alimentación continua de los mismos para poder mantener las temperaturas de operación adecuadas y no perder calor cada vez que se abra la puerta de alimentación.

Se propone que se instale un sistema de control de gases para poder realizar pruebas con otros tipos de residuos y encontrar la optimización de la incineración de los mismos.

## Referencias

- Acurio Guido, Antonio Rossin, Paulo Fernando, Francisco Zepeda (1997) Diagnostico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el caribe, OPS, Washington DC
- Ares Elena, Paul Bolton (2002) Waste incineration Research paper 9<sup>th</sup> May 2002, House of commons library.
- ASSURE (2000) Incineration in Europe, October.
- Baukal Jr. Charles E. (2001) The John Zink Combustion Handbook, John Zink.
- Beard Taylor J., Lachetta Antonio, Lilleleht Lembit (1980) APTI Course 427 Combustion Evaluation, EPA.
- Burmistrova (1977) Manual de practicas de Fisicoquímica, Mir Moscu.
- Brunner Calvin R. (1993) Hazardous Waste Incineration, Mc. Graw Hill.
- Brunner Calvin R. (1991) Handbook of Incineration Systems, Mc Graw Hill
- Castellan G. (1998) Fisicoquímica, Pearson
- Chaparro Beltran (1989) Pirólisis de los desperdicios sólidos municipales, Ing. Química, año 21, núm. 243, pp. 215-218.
- Dávila Gómez J.A. (2000) Combustión, Proyectec

- DEFRA ( 2002) Digest of Environmental Statistics, December.
- Enkerlin, Garza R. (1997) Ciencia Ambiental y desarrollo sostenible, Thomson.
- EPA (1984) A Profile of Existing Hazardous Waste Incineration Facilities and Manufacturers in the U.S. , U.S. Environmental Protection Agency. Washington DC, PB 84-157072.
- EPA (1993) Operational parameters for Hazardous Waste Combustion Devices.
- EPA (2001) Exposure on Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetraclorodibenzo-p-Dioxin (TCDD) and related compounds Vol.2 Cap. 3 Waste incineration.
- Eurostat (2000) Waste Generated in Europe 1985-1997, Eurostat.
- Galloway Terry R. (1989) Destroying Hazardous Waste On Site-Avoiding Incineration, Environmental Progress, vol 8. No.3, pp. 176-185.
- Gardiner Jr W.C. (1999) Gas-Phase Combustion Chemistry, Springier
- Glarborg P, Miller JA, Kee R.J. (1986) Kinetic modeling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well-stirred reactors, Comb Flame.
- Grimm N., Rosaler R. (1997) Manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado. Mc Graw Hill, pp 21.1-21.11.
- Gutiérrez Víctor (2000) II Foro Internacional de Incineración de Residuos INE.

- INE, SEDESOL (1993) Informe de la situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y la protección al Ambiente, 1991-1992, Pág. 187.
- INE, SEMARNAP (1999) Promoción de la minimización y manejo integral de los residuos peligrosos, Oct. pp. 20-21.
- James A., Jahnke D. (1993) Continuous Emission Monitoring, Van Nostrand Reinhold.
- La Grega (1996) Gestión de residuos tóxicos, Mc. Graw Hill.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, D.O.F 28 de enero de 1988
- Malone Steverson (1991) Waste Incineration, Environ Sci. Techonol, Volk 25, No.11 1991, pp. 1808-1814.
- Never Noel (1998) Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire, McGraw Hill.
- NOM-ECOL-098-2000, Incineración de residuos, especificaciones de operación y limites de emisión de contaminantes.
- Programa para la Minimización y el Manejo Integral de los Residuos Industriales Peligrosos en México, 1996-2000.
- Rodríguez Juan, Ibarien Angel (1998) Los residuos peligrosos caracterización, tratamiento y gestión, Síntesis pp. 169-210.
- Salvi Giuliano (1975) La combustión: Teoría y aplicaciones, DOSSAT, S.A.

- Sancho y Cervera (2000) La situación actual del manejo integral de integral de los residuos sólidos en México, Fundación – ICA .
- Schorr Marvin M. (1991) NOx, Emission Control for Gas Turbines: A 1991 Update on Regulations And Technology, Energy Engineering, Vol.88, No.6.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (1994) Informe de la Situación General en Materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1993-1994. Instituto Nacional de Ecología, México.
- Seekel, W.R., Lanoier, and M.P. (1987) Municipal Waste Combustion Study: Combustion Control of MSW Combustors to Minimize Emission of Trace Organics, EER Corporation, Irvine Ca.
- SEMARNAP (1996) Programa para el Manejo Integral y el Aprovechamiento de los Residuos Industriales en la Región Central de México, Instituto Nacional de Ecología, México.
- SEMARNAP-INE (1999) Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades riesgosas.
- Semenov, N.N. (1958) Some Problems in Chemical Kinetics and Reactivity, Princenton.
- Spalding Brian D. (1983) Combustión y Transferencia de Masa, CECOSA.
- Stephen P. Shao (1967) Estadística para economistas y administradores de empresas, Herrero Hermanos

- Storch de Gracia (1998) Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras, Mc. Graw Hill.
- Tillman, David A. (1991) The Combustion of Solid Fuels and Wastes, Ed. Academic Press, Inc.
- Tchobanogluos G., Theisen, H. (1991) Integrated Solid Waste Management, Mc Graw Hill, pp 687-705.
- Turns Stephen R. (2000) An introduction to combustion concepts and applications, second edition, Mc. Graw Hill.
- Theodore L, Reynolds J. (1991) Introduction to Hazardous Waste Incineration. Ed. John Wiley & Son pp 185-186.
- Von Lehmden Darryl J. (1973) Fundamentals in combustion calculations, combustion evaluation sources and control devices EPA.
- Vogel G., Aug. (1986) Presented at the EPA 12 Th. Annual Research Symposium, Incineration and Treatment of Hazardous Waste , Cincinnati, OH.
- Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. (1999) Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formatio, Ed. Springer
- Wylen V. (1986) Fundamentos de Termodinámica, Limusa, pp. 501-548.
- Yeager U. B. (1973) Coal Burning-Design Parameters, EPA.