

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**QUÍMICA**



**“OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE  
UN INCINERADOR PARA LA MEJORA DE SU EFICIENCIA, EN  
LA EMPRESA INCINERAGAS EIRL”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO  
EN INGENIERÍA QUÍMICA.**

**DEIVIS GABRIEL MERA BARDALES**

**Callao, 2021**

**PERÚ**



## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Carrasco Venegas Luis Américo	PRESIDENTE
Dr. Rodríguez Taranco Oscar Juan	SECRETARIO
Mg. Díaz Bravo Pablo Belizario	VOCAL
Mg. Ángeles Queirolo Carlos Ernesto	VOCAL
Mg. López Herrera Jorge Amador	ASESOR

N° LIBRO DE SUSTENTACION: 001

ACTA DE SUSTENTACIÓN: 017-2021-UPG-FIQ-V

FECHA APROBACIÓN DE LA TESIS: 19 de diciembre del 2021

## **DEDICATORIA**

Con mucho amor y cariño dedico este proyecto de tesis, a mis padres quienes han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento, a mi esposa e hijos por ser mi fuerza y mi motivo para lograr mis metas.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco, a la escuela de postgrado de la facultad de Ingeniería química de la Universidad Nacional del Callao, asimismo extendiendo mi agradecimiento al personal a los docentes de la maestría por su orientación.

## ÍNDICE

TABLA DE CONTENIDOS .....	3
TABLA DE FIGURAS.....	4
RESUMEN.....	6
ABSTRACT .....	7
INTRODUCCIÓN .....	8
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1. Descripción de la realidad problemática.....</b>	<b>9</b>
<b>1.2. Formulación del problema. ....</b>	<b>10</b>
1.2.1. Problema general. ....	10
1.2.2. Problema específico.....	10
<b>1.3. Objetivos .....</b>	<b>10</b>
1.3.1. Objetivo general .....	10
1.3.2. Objetivo específicos.....	10
<b>1.4. Limitantes de la investigación (teórico, temporal, espacial). ....</b>	<b>10</b>
1.4.1. Teórica .....	10
1.4.2. Temporal .....	11
1.4.3. Espacial.....	11
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Antecedentes .....</b>	<b>12</b>
2.1.1. Antecedentes Internacionales .....	12
2.1.1. Antecedentes nacionales.....	13
<b>2.2. Bases teóricas .....</b>	<b>14</b>
2.2.1. Proceso de combustión de residuos sólidos.....	14
2.2.2. Mecanismo de la combustión de residuos sólidos.....	15
2.2.3. Formación y control de emisiones atmosféricas. ....	19
2.2.4. Emisiones orgánicas.....	22
2.2.5. Incineración de residuos sólidos .....	23
<b>2.3. Marco Conceptual.....</b>	<b>26</b>
2.3.1. Eficiencia de combustión .....	26
2.3.2. Gases de combustión y sus controles.....	27
2.3.3. Límites máximos permisibles .....	29
2.3.3. Tecnología de análisis de gases de combustión. ....	29

2.4. Definición de términos básicos .....	30
<b>III. HIPÓTESIS Y VARIABLES .....</b>	<b>32</b>
3.1. Hipótesis .....	32
3.1.1. Hipótesis general.....	32
3.1.2. Hipótesis específicas .....	32
3.2.3. Definición conceptual de variables.....	32
3.2.4. Operacionalización de variable .....	34
<b>V. DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>	<b>35</b>
4.1 Tipo y diseño de investigación.....	35
4.2. Método de investigación.....	35
4.3. Población y muestra.....	39
4.3.1. Población .....	39
4.3.2. Muestra .....	39
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	39
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	39
4.5.1. Técnicas .....	39
4.5.2. Instrumentos.....	39
4.6. Análisis y procesamiento de datos. ....	39
<b>V. RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
5.1 Resultados descriptivos. ....	40
5.2. Resultados inferenciales.....	41
5.3. Otro tipo de resultados estadísticos, de acuerdo a la naturaleza del problema y la Hipótesis.....	46
<b>VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados..	47
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	47
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes .....	48
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>49</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO 2: INFORME DE ENSAYO.....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO 3. ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN .....</b>	<b>59</b>

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Tabla 1</b> .....	14
Reacciones de los elementos de los residuos sólidos.....	14
<b>Tabla 2</b> .....	29
Límites Máximos Permisibles de Emisiones Provenientes de Incineración. ....	29
<b>Tabla 3</b> .....	30
Metodología de muestreo y análisis de Emisiones Gaseosas.....	30
<b>Tabla 4</b> .....	34
Operacionalización de variables .....	34
<b>Tabla 5</b> .....	37
Factores y sus niveles para el diseño experimental. ....	37
<b>Tabla 6</b> .....	38
Matriz de diseño experimental utilizando el diseño de Box- Behnken. ....	38
<b>Tabla 7</b> .....	40
Resultados experimentales %CE.....	40

## TABLA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> .....	15
Mecanismo de la combustión.....	15
<b>Figura 2</b> .....	16
Proceso de calentamiento y secado de partículas .....	16
<b>Figura 3</b> .....	17
Esquemática de la formación de dioxinas y furanos.....	17
<b>Figura 4</b> .....	18
Difusión de moléculas de oxígeno a la superficie de una partícula. ....	18
<b>Figura 5</b> .....	19
Etapas de la incineración de residuos sólidos.....	19
<b>Figura 6</b> .....	20
Formación de material particulado en la combustión .....	20
<b>Figura 7</b> .....	23
Curvas de degradación para dioxinas y furanos .....	23
<b>Figura 8</b> .....	25
Vista 3D de un incinerador de doble cámara. ....	25
<b>Figura 9</b> .....	36
Diseño experimental .....	36
<b>Figura 10</b> .....	37
Etapas de la investigación .....	37
<b>Figura 11</b> .....	41
Análisis de varianza - diseño Box Behnken. ....	41
<b>Figura 12</b> .....	41
Ecuación de regresión. ....	41
<b>Figura 13</b> .....	42
Probabilidad Normal de los efectos estandarizados con $p=0.05$ .....	42
<b>Figura 14</b> .....	43
Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados con $p=0.05$ .....	43
<b>Figura 15</b> .....	44
Gráfico de Residuos estandarizados .....	44
<b>Figura 16</b> .....	45
Grafica Superficie de respuesta del porcentaje de eficiencia vs T2, Lote.....	45

<b>Figura 17</b> .....	45
Gráficas de contorno de %CE vs T2; Lote. ....	45
<b>Figura 18</b> .....	46
Precisión de optimización de respuesta del diseño Box Behnken. ....	46
<b>Figura 19</b> .....	46
Gráfica de optimización de las condiciones de operación de la incineración....	46

## RESUMEN

En este estudio, se planteó la mejora de la eficiencia de combustión. Las condiciones operativas de un incinerador se optimizaron mediante diseño Box-Behnken. Las variables independientes estudiadas incluyeron la cantidad de residuos sólidos alimentados al incinerador  $X_1$  (300kg, 350kg y 400kg), temperatura de la cámara de combustión  $X_2$  (650°C, 700°C y 750°C) y la temperatura de la cámara de postcombustión  $X_3$  (1000°C, 1100°C y 1200°C), mientras que la variable dependiente fue el porcentaje de eficiencia de la combustión  $Y_1$ (%CE). El modelo estadístico presentó un adecuado coeficiente de ajuste de ( $R^2=98.78\%$ ). Las condiciones óptimas operativas para la eficiencia de combustión fueron: cantidad de residuos sólidos alimentados al incinerador de 300kg, temperatura de la cámara de combustión 678°C y la temperatura de la cámara de postcombustión 1147°C. Así mismo, el tratamiento óptimo fue sometido a una evaluación con los mismos resultados predichos con el método estadístico obteniendo la eficiencia de combustión CE =98.96% y gases de combustión de CO:32.93 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>:2.9mg/m<sup>3</sup> y NO<sub>x</sub>:27.99mg/m<sup>3</sup>

## **ABSTRACT**

In this study, the improvement of combustion efficiency was proposed. The operating conditions of an incinerator were optimized using the Box-Behnken design. The independent variables studied included the amount of solid waste fed to the incinerator  $X_1$  (300kg, 350kg and 400kg), the temperature of the combustion chamber  $X_2$  (650°C, 700 °C and 750 °C) and the temperature of the afterburner chamber.  $X_3$  (1000 °C, 1100 °C and 1200 °C), while the dependent variable was the percentage of combustion efficiency  $Y_1$  (% CE). The statistical model presented an adequate adjustment coefficient of ( $R^2 = 98.78\%$ ). The optimal operating conditions for combustion efficiency were: quantity of solid waste fed to the incinerator of 300kg, combustion chamber temperature 678 ° C and post-combustion chamber temperature 1147 °C. Likewise, the optimal treatment was subjected to an evaluation with the same predicted results with the statistical method obtaining the combustion efficiency  $CE = 98.96\%$  and combustion gases of CO: 32.93 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>: 2.9mg /m<sup>3</sup> and NO<sub>x</sub>: 27.99mg / m<sup>3</sup>

## **INTRODUCCIÓN**

Según (Prakash, 2007), recomienda de todas las tecnologías disponibles para el tratamiento de residuos hospitalarios, se ha descubierto que el proceso de incineración es más eficaz para destruir residuos sólidos peligrosos y, capaz de reducir el volumen y peso, sin embargo, cuando existe un mal proceso operativo de los incineradores pueden emitir gases tóxicos al medio ambiente que requieren ser tratados por dispositivos de control ambiental. Para (World Health Organisation et al., 2014) los residuos hospitalarios se definen como cualquier residuo, que consiste total o parcialmente en tejido humano y animal, sangre o cualquier otro fluido corporal, excreciones, productos farmacéuticos, vendajes, jeringas, agujas o instrumentos cortopunzantes. Según (DIGESA, 2018), los incineradores se utilizan ampliamente debido a su potencial de reducción de peso, volumen y su eficacia para destruir patógenos y sustancias químicas tóxicas en los residuos sólidos.

Esta investigación se basa en la metodología de diseño Box-Behnken se ha tomado tres factores como son la cantidad de residuos sólidos alimentados al incinerador, la temperatura de la cámara de combustión y postcombustión como resultado se obtendrá la eficiencia de combustión %CE y las concentraciones de los gases de combustión (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>). El objetivo de esta tesis es, por tanto, optimizar las condiciones de la incineración para alcanzar mejoras en la eficiencia de combustión así como determinar los factores que influyen significativamente cuidando que estos no superen los límites máximos permisibles acorde a las normativas internacionales, con el fin de mejorar los futuros diseños de incineradores, y a su vez este trabajo sirva como referencia para establecer una normativa referente a las emisiones de plantas de incineración en nuestro país.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática.**

Según (Jacob et al., 2021), considera que los residuos sólidos hospitalarios son la fuente potencial de contaminación al medio ambiente, como por ejemplo jeringas, bolsas de sangre, retos anatomopatológicos, excreciones y medicamentos que son altamente tóxicos, si no manejan adecuadamente, todos los residuos mencionados anteriormente pueden ser causal de una gran cantidad de actividad patógena. La (Encyclopedia.com, 2018), señala que los incineradores suelen ubicarse cerca de áreas urbanas, en consecuencia, existe una gran preocupación por las emisiones gaseosas de los incineradores y los posibles efectos en la salud de las personas y al medio ambiente. Según (Swithenbank et al., 1999), sostiene que la eliminación segura de los residuos se ha convertido en un problema ambiental, una vez que se realiza la reutilización y el reciclaje, todavía queda una gran parte de residuos, de echo otro problema surge con los vertederos que generan problemas de emisión de metano, contaminación de las aguas subterráneas y uso de grandes extensiones de tierra, y estos resultarían perjudiciales para el medio ambiente. La incineración es la tecnología de mayor ventaja frente a otras y sobre todo más respetuoso con el medio ambiente para tratar mejor los residuos, pero es importante optimizar las condiciones de operación para obtener incineradores con mayor eficiencia de funcionamiento. Por otro lado, la emisión a la atmósfera de metales pesados y gases ácidos y quizás más importante a largo plazo, las dioxinas y furanos, es uno de los problemas clave a los que se enfrenta de la incineración, por ello es de vital importancia que los incineradores cuenten con dispositivos de tratamiento y control de emisiones toxicas esto permite reducir los niveles de contaminación. Sin en el Perú embargo, aún no se dispone de una norma técnica para el control de los gases de combustión, por lo tanto, para hacer frente a estos problemas, ante lo expuesto, se propone fomentar el tratamiento por incineración de los residuos, desarrollar procedimientos que garanticen el funcionamiento óptimo del proceso de incineración, y a futuro realizar estudios para reaprovechar de la energía producida por los residuos.

## **1.2. Formulación del problema.**

### **1.2.1. Problema general.**

- ¿Cuáles serán las condiciones óptimas de operación de un incinerador, para la mejora de su eficiencia, en la empresa Incineragas EIRL?

### **1.2.2. Problema específico.**

- ¿Cuáles serán los factores significativos del incinerador, que influyen en la eficiencia de combustión?
- ¿Cuál será el porcentaje de eficiencia de combustión del incinerador en sus condiciones óptimas de operación?
- ¿Cuáles serán las concentraciones de los gases de combustión, del incinerador, en sus condiciones óptimas?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

- Determinar las condiciones óptimas de operación de un incinerador, para la mejora su eficiencia, en la empresa Incineragas EIRL

### **1.3.2. Objetivo específicos**

- Determinar los factores significativos del incinerador, que influyen en la eficiencia de combustión
- Determinar el porcentaje de eficiencia de combustión del incinerador en sus condiciones optimas
- Determinar las concentraciones de los gases de combustión, del incinerador, en sus condiciones optimas

## **1.4. Limitantes de la investigación (teórico, temporal, espacial).**

### **1.4.1. Teórica**

Se determina la cantidad de residuo para la alimentación, temperaturas en las cámaras, de modo que se pueda garantizar la evacuación de los gases que salen del horno y esparcirlos en la atmósfera.

#### **1.4.2. Temporal**

Se debe identificar el residuo sólido hospitalarios para el proceso de incineración y poder evaluar las condiciones óptimas para luego determinar la eficiencia de combustión.

#### **1.4.3. Espacial**

La investigación tiene el carácter experimental y operativo, por lo que se realizará en las instalaciones de la empresa Incineragas EIRL.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes**

#### **2.1.1. Antecedentes Internacionales**

Según (Honest et al., 2020), evaluaron las concentraciones de emisiones gaseosas en cuatro incineradores diferentes hospitales en Tanzania, teniendo como resultado la eficiencia de combustión el más bajo 51.4% y más alto 60%. Asimismo, los resultados indicaron un rendimiento deficiente de los incineradores, también analizaron las concentraciones gaseosas de combustión resultando por encima de los límites máximos permisibles de la EPA de EE. UU.

Según (Wahid, 2013), realizó una evaluación del funcionamiento de un incinerador en hospitales de Egipto, los incineradores en estudio cuentan con una capacidad de 100 kg /h, estableció las temperaturas de las cámaras de combustión primaria y postcombustión en 830°C y 1120°C respectivamente, además, no observo humo negro de la chimenea, asimismo analizó las concentraciones de los gases de combustión en la chimenea del incinerador dando como resultado que monóxido de carbono, dióxido sulfúrico y óxidos de nitrógeno fueron menores a los límites máximos permisibles de las leyes ambientales egipcias, 87, 26.5 y 91 mg/m<sup>3</sup>.

(Finney et al., 2009), investigaron la combustión en un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio, los parámetros elegidos para este estudio fueron el flujo de alimentación, el flujo de aire primario y la altura del lecho. Encontraron que las y las condiciones óptimas de funcionamiento encontradas fueron el flujo de alimentación, 3,25 kg/h y un caudal de aire total de 650 kg/m<sup>2</sup>h.

(Wikström et al., 1999), estudio investigaron la influencia de la variación en las condiciones de combustión en la formación primaria de microcontaminantes orgánicos, en total realizaron 11 experimentos en un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio para las pruebas utilizaron residuos municipales, además analizaron muestras dibenzo-pdioxinas y dibenzofuranos, concluyen que estos compuestos están estrechamente ligados con la eficiencia de combustión, en este estudio obtuvieron CE de 96.37 y 99.94 y CO entre 19 y 3200 ppm.

### **2.1.1. Antecedentes nacionales**

(Periche, 2019), en su estudio describe el proceso de tratamiento realizando una metodología que posee un enfoque cualitativo y cuantitativo hasta un nivel de tipo exploratorio y descriptivo. Asimismo, indica que solo el 5% de los residuos hospitalarios realizan el tratamiento, por ultimo concluye, que la incineración reducirá eficazmente los residuos; por lo que presenta un desempeño adecuado para la gestión integral de los residuos hospitalarios.

(Romero, 2017), investigo la pre-factibilidad del proyecto de ampliación y mejoramiento de una Planta de Tratamiento por incineración, tiene por objetivo aumentar la capacidad de procesamiento de incineración con valorización energética, concluye que generara una rentabilidad de S/. 5,830,072.84 en un periodo de 10 años, con una tasa de retorno de 44%, y con un tiempo de retorno de inversión de 3.9 años la implementación de este proyecto generaría el aumento de la rentabilidad del servicio prestado de 8% en el primer año a 18% en el décimo año. También indica que el aprovechamiento energético permitiría reducir costos operativos a través de la generación eléctrica.

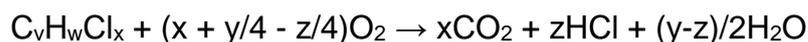
## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Proceso de combustión de residuos sólidos

Según (Tillman et al., 1989), los residuos sólidos son materiales de composición carbonosa que contiene cantidades significativas de hidrógeno, azufre y cloro. La ecuación de que representa a la estequiometria de combustión de forma general se resumen, asumiendo oxígeno como oxidante, es la siguiente:



Para esta ecuación, las letras x, y, y z representan cantidades de los elementos químicos: carbono, hidrógeno y oxígeno. Esta ecuación se representa de siguiente manera para los residuos que contienen clorados:



Para un material de tipo hidrocarburo que contiene cloro y oxígeno, la ecuación estequiométrica resumida es la siguiente:



Cuando un residuo se incinera por completo, generalmente se asume que los elementos del residuo siguen los patrones de reacción que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 1**

Reacciones de los elementos de los residuos sólidos.

Elementos de residuos	Conversión	Productos
Hidrogeno, H	→	H <sub>2</sub> O
Carbono, C	→	CO <sub>2</sub>
Cloruro, Cl	→	HCl
Sulfuro S	→	SO <sub>2</sub>
Nitrógeno, N	→	N <sub>2</sub> O

Fuentes:(Lee & Huffman, 1989)

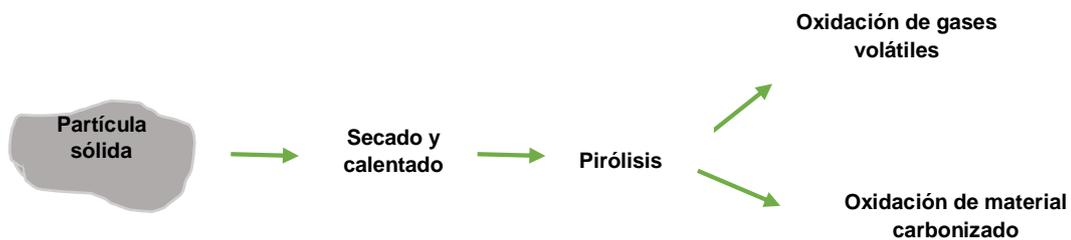
### 2.2.2. Mecanismo de la combustión de residuos sólidos.

Según (Tillman, 1991), cualquiera sea el sistema de incineración, estos residuos sólidos se someten a las siguientes etapas de reacción:

- i) Secado y calentamiento de partículas para alcanzar la temperatura de reacción.
- ii) Pirólisis de la partícula sólida:
- iii) Oxidación del material carbonizado.

#### Figura 1

Mecanismo de la combustión.

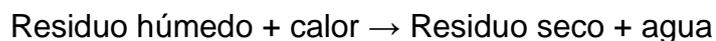


Fuente: (Tillman, 1991)

Las etapas anteriores se describen a continuación:

#### i) Secado y calentamiento

(Tillman, 1991), con frecuencia, los residuos sólidos contienen humedad dentro de su estructura porosa. Para que se inicie la combustión, tiene que calentarse a la temperatura de reacción. La transferencia de calor se transfiere en la partícula desde el interior del horno incinerador. La humedad contenida en los poros de la partícula se evapora y el vapor escapa de la partícula de combustible este proceso se puede representar de la siguiente manera:



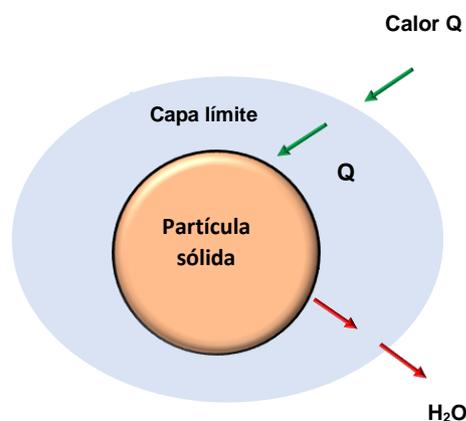
Las velocidades asociadas con el secado de partículas son una función de numerosas variables que incluyen la temperatura, tamaño de partícula de combustible; la porosidad de las partículas y la capacidad de transportar vapor desde la partícula al ambiente del horno. El proceso de secado ocurre cuando la temperatura del frente de reacción excede aproximadamente 105 °C. En ese

punto, la humedad se convierte en fase de vapor y se mueve a través de la estructura de poros a la superficie de la partícula, a través de la capa límite y al ambiente del incinerador. Impulsando este proceso dentro de la partícula está el mecanismo de transferencia de calor conductor. El calor se transfiere a la capa límite y a la partícula tanto por radiación como por convección desde el ambiente del horno. Más críticamente, el calor se transfiere a la humedad que debe evaporarse por conducción dentro de la partícula. En efecto, la ecuación de transferencia de calor por conducción general que se presenta a continuación:

$$Q = -kA(T_2 - T_1)/X$$

### Figura 2

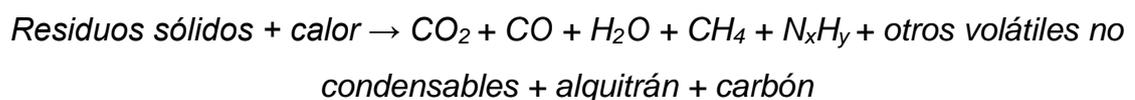
Proceso de calentamiento y secado de partículas



Fuente: (Tillman, 1991)

### ii) Pirólisis de la partícula sólida y formación de dioxinas y furanos

(Tillman, 1991), la pirólisis es el calentamiento de cualquier sustancia en ausencia de oxígeno para lograr la combustión. El mecanismo de pirólisis se puede representar de la mediante la siguiente ecuación general:

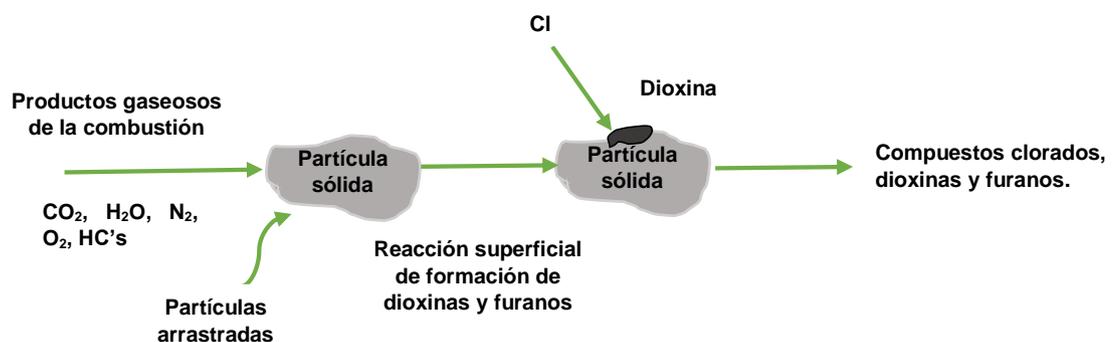


(Tillman, 1991), en la pirólisis, el calor pasa a través de la capa límite y hacia la partícula sólida tanto por radiación como por conducción. Cuando el calor

impulsado hacia la partícula es suficiente para elevar la temperatura en el frente de reacción a aproximadamente 450- 500°C, la pirólisis comienza fuertemente y la evolución de volátiles y carbón procede. Los volátiles se expulsan de la partícula a través de la estructura de poros del combustible y. cuando las presiones internas son suficientes, los volátiles se expulsan de la partícula rompiendo la estructura interna del combustible. El calor también se extrae de la partícula en los gases volátiles, ya que enfrían la capa de carbón que existe entre el frente de reacción y la superficie de la partícula. La energía también se vuelve a irradiar desde la partícula durante el proceso de pirólisis. Estos mecanismos son de particular importancia debido a la presencia significativa de cloro en la materia prima. Los mecanismos de formación y destrucción de dioxinas y furanos dependen en gran medida del grado de mezcla de los reactivos y de la temperatura de combustión. La destrucción de dioxinas y furanos se puede considerar como esencialmente completa en los sistemas de combustión de residuos sólidos, asumiendo una mezcla completa y asumiendo temperaturas superiores a 982°C en el incinerador. Los mecanismos de formación de dioxinas adquieren mayor importancia con condiciones de combustión menos óptimas, como lo indican las temperaturas más bajas del horno y las elevadas emisiones de CO. La región de temperatura entre 260°C - 427 °C hay formación de dioxinas en las partículas de cenizas volantes.

### Figura 3

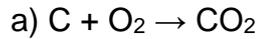
Esquemática de la formación de dioxinas y furanos



Fuente: (Tillman, 1991)

### iii) Oxidación del material carbonizado.

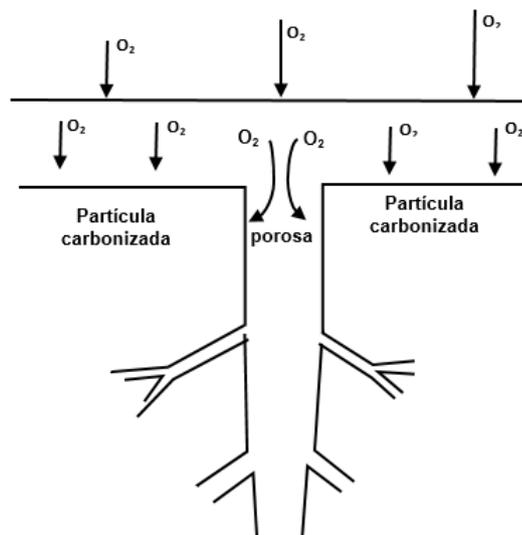
El segmento final del proceso de combustión de residuos sólidos a considerar es la oxidación del carbón. Típicamente, la oxidación del carbón suministra el calor para el secado y calentamiento del combustible, y la pirólisis de sólidos, en la cámara de combustión de residuos sólidos. Además, las reacciones de oxidación del carbón contribuyen al proceso de incineración general.



(Tillman, 1991), a la reacción b, le sigue la oxidación en fase gaseosa de CO a CO<sub>2</sub> en el entorno del horno a granel. Estas reacciones pueden generar temperaturas muy altas en la superficie de las partículas de carbón. Las temperaturas del lecho de combustible a menudo superan las temperaturas generales en la cámara de combustión y por márgenes sustanciales. La oxidación del carbón, entonces, procede en gran parte haciendo reaccionar la molécula de carbono en la superficie de la partícula con oxígeno y produciendo CO; y luego liberar la molécula de CO de la matriz de carbón sólido en la capa límite y el horno a granel. Luego, la molécula de CO se oxida a CO<sub>2</sub>.

#### Figura 4

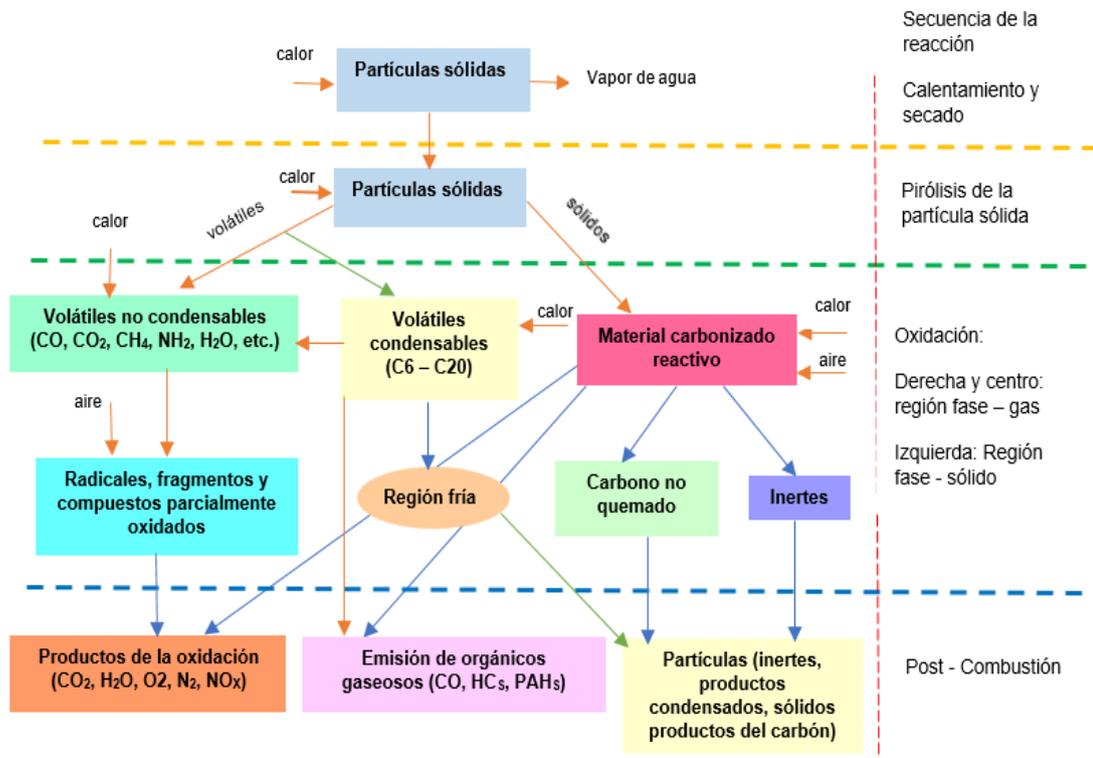
Difusión de moléculas de oxígeno a la superficie de una partícula.



Fuente: (Tillman, 1991)

**Figura 5**

Etapas de la incineración de residuos sólidos



Fuente: (Tillman, 1991)

### 2.2.3. Formación y control de emisiones atmosféricas.

(Tillman et al., 1989), las reacciones de combustión dan como resultado la formación de emisiones en el aire que incluyen partículas, metales pesados, óxidos de nitrógeno, gases ácidos, monóxido de carbono y dioxinas y furanos.

#### i) Formación de emisiones de material particulado.

Hay tres mecanismos que dominan la creación de material particulado a partir de la combustión de residuos sólidos.

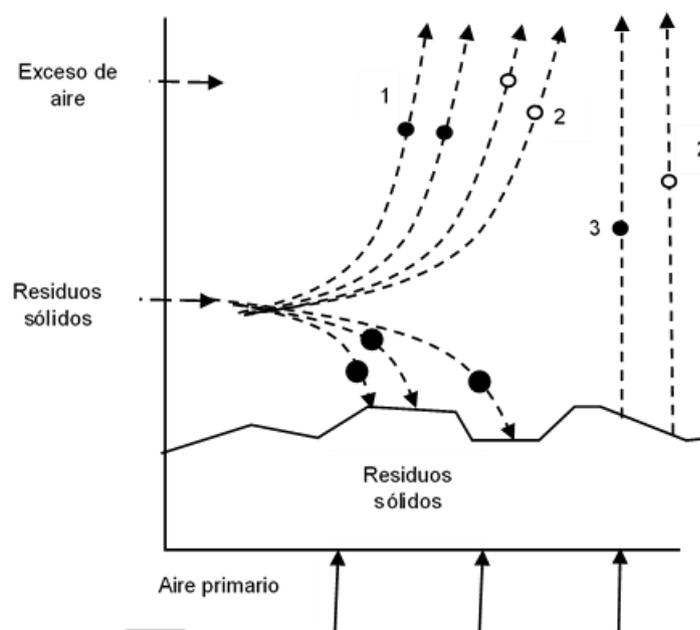
- El primero es el arrastre de partículas finamente divididas y materia inerte en los productos gaseosos de combustión dentro del incinerador.
- El segundo mecanismo es similar al primero, excepto que las partículas finas de combustible que entran en la corriente de gas de combustión se oxidan, dejando solo residuos inertes como cenizas volantes. Estos dos mecanismos

se aplican a todos los sistemas básicos de combustión de combustible sólido:

- c) (Tillman, 1991), el tercer mecanismo para la generación de partículas a partir de la combustión de residuos sólidos implica la pirólisis del combustible en volátiles condensables de cadena larga. Si estos volátiles entran en una región fría del horno incinerador, pueden condensarse, pudiendo ser favorecida por la presencia de una partícula sólida inerte, que sirve como sitio donde se favorece la condensación. Los volátiles pueden ser no solo productos de pirólisis, sino también inertes que se volatilizan y se vuelven a condensar. Tal volatilización inerte y recondensación, son responsable de la acumulación de escoria en las paredes del horno, los tubos de la caldera y en otras partes del sistema de combustión. Las partículas de PM-10 pueden resultar de cualquiera de los mecanismos mostrados anteriormente; sin embargo, el método de formación dominante implica estas reacciones que incluyen la condensación de materiales volátiles (es decir, hidrocarburos condensados) y la condensación de cenizas o materiales inertes.

### Figura 6

Formación de material particulado en la combustión

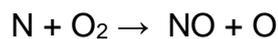
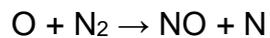


Fuente: (Tillman, 1991)

- 1) Partículas finas arrastradas por corrientes de gas, pero no se quema.
- 2) Partículas finas arrastradas por la corriente de gas se quemaron por completo dejando residuos de cenizas.
- 3) Pirólisis de combustibles volátiles que se condensan.

## ii) Emisiones de óxidos de nitrógeno

(Tillman et al., 1989), hay dos fuentes de NO<sub>x</sub> ambas fuentes son potencialmente importantes en la incineración de desechos peligrosos.: NO<sub>x</sub> térmico y NO<sub>x</sub> de combustible. La importancia relativa de cada fuente varía según la composición del combustible y las condiciones de combustión. El NO<sub>x</sub> térmico, resulta de la disociación del nitrógeno diatómico en el aire y la posterior oxidación de los átomos de nitrógeno. La mecánica dominante para la formación térmica de NO<sub>x</sub> es el mecanismo de Zeldovich que se muestra a continuación.



Según (Tillman et al., 1989), lo importante para la incineración de residuos sólidos peligrosos no es el mecanismo específico per se, sino el hecho de que el NO<sub>x</sub> térmico puede formarse en cantidades apreciables a temperaturas reales de llama que excedan los 1480°C. Tales temperaturas de llama no son comunes en los incineradores de desechos municipales, aunque pueden encontrarse en "puntos calientes" localizados donde existen momentáneamente altas concentraciones de plásticos. Además, podrían experimentarse en algunas cámaras de combustión que utilizan niveles relativamente bajos de exceso de aire.

(Tillman et al., 1989), el NO<sub>x</sub> de combustible. Resulta de la oxidación del nitrógeno contenido en el residuo o como fuente de combustible suplementario. Sin embargo, el nitrógeno puede entrar con los desechos peligrosos, particularmente en compuestos como analina, piridina, compuestos de nitrilo, nitrobenzoceno, pesticidas y materiales relacionados. En consecuencia, los mecanismos NO<sub>x</sub> del combustible no son tan significativos como los mecanismos NO<sub>x</sub> térmicos cuando se incineran residuos sólidos peligrosos, excepto que se queman residuos como los plaguicidas.

#### **2.2.4. Emisiones orgánicas.**

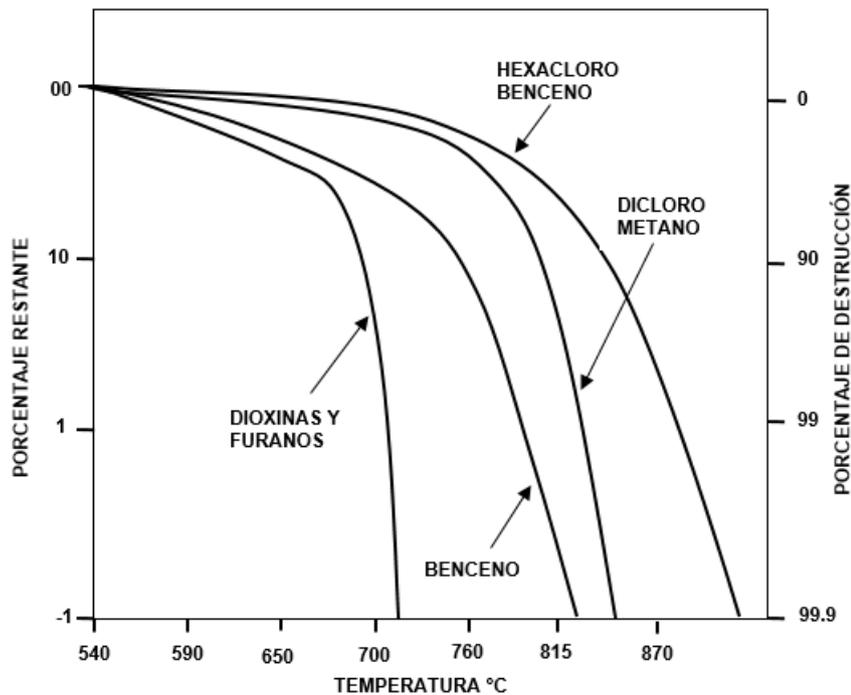
Las emisiones orgánicas incluyen CO, HC, dioxinas y furanos. Se analizan aquí como una sola unidad porque las condiciones que favorecen o minimizan la formación de todos los compuestos orgánicos son idénticas.

- i) (Tillman et al., 1989), el Monóxido de carbono y los hidrocarburos. Son causados por una combustión incompleta, comúnmente como resultado de una disponibilidad insuficiente de oxígeno para los radicales generados por la pirólisis y la desvolatilización, y las reacciones de descomposición en fase gaseosa subsiguientes. Esto puede deberse a un exceso de aire insuficiente en el sistema de combustión. La disponibilidad insuficiente de oxígeno para los radicales y fragmentos de hidrocarburos también puede resultar de una mezcla insuficiente en la cámara de combustión. Las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos pueden formarse mediante una zona de combustión lo suficientemente fría como para que las reacciones de combustión "congelar" y no llegar hasta el final. La temperatura insuficiente para una combustión completa se debe típicamente a grandes cantidades de aire en exceso que enfrían el reactor. El CO y los HC se controlan fácilmente prestando especial atención a la cantidad y distribución del exceso de aire. Los niveles más bajos de exceso de aire dan como resultado una combustión incompleta. Los niveles más altos de exceso de aire dan como resultado un exceso de CO causado por la combustión fría.
- ii) (Tillman et al., 1989), las emisiones de dioxinas y furanos pueden formarse mediante una variedad de mecanismos. Entre estos mecanismos, los dominantes son la formación de 2,3,7,8 TCDD y 2,3,7,8 TCDF a partir de precursores clorados como aceites de PCB, fenoles clorados, hexaclorobenceno y compuestos relacionados. De manera similar, ha demostrado que, si se forman dioxinas durante el proceso de combustión, se destruirán a más del 99,99% a temperaturas superiores a 1093°C, en tiempos de residencia de menos de 0,1 segundos. Es evidente que prácticamente todas las dioxinas y furanos clorados se destruyen fácilmente, si se forman, mediante la incineración de desechos peligrosos a alta temperatura realizada correctamente; sólo quedan pequeñas cantidades. Además, las altas temperaturas y los tiempos de residencia suficientes producirán una

degradación insuficiente de los precursores en fragmentos cada vez más pequeños, que se oxidan fácilmente, de modo que la formación de dioxinas después de la combustión (es decir, por condensación en partículas) es menos probable. Al igual que las emisiones de CO y HC, las emisiones de dioxinas y furanos se minimizan mediante la aplicación de buenas prácticas de combustión.

**Figura 7**

Curvas de degradación para dioxinas y furanos



Fuente: (Tillman, 1991)

### 2.2.5. Incineración de residuos sólidos

(Jacob et al., 2021), definen la incineración como una de las tecnologías más utilizadas para la gestión segura de diversos residuos, es un proceso de oxidación utilizando un rango de alta temperatura, este proceso reduce significativamente el volumen y el peso iniciales de los residuos, la incineración es un proceso selectivo que se utiliza para tratar residuos que no pueden reciclarse o reutilizarse y eliminarse directamente, un incinerador generalmente opera en el rango de temperatura de 900°C-1200°C en el que tiene lugar la

combustión de compuestos orgánicos, la combustión de residuos da como resultado la emisión de sustancias gaseosas como dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor y varios otros compuestos tóxicos en forma de cenizas, durante la combustión, se deben controlar adecuadamente varias condiciones de operación de lo contrario, resultarían niveles elevados de gases tóxicos que impactarían al medio ambiente, generadas al final del proceso estos contienen algunos compuestos tóxicos que es necesario tratar para evitar efectos al medio ambiente. Sin embargo, cualquiera que sea la tecnología de control que se aplique, todos los tipos de incineración dan como resultado la emisión de sustancias tóxicas en cenizas y en forma de gases.

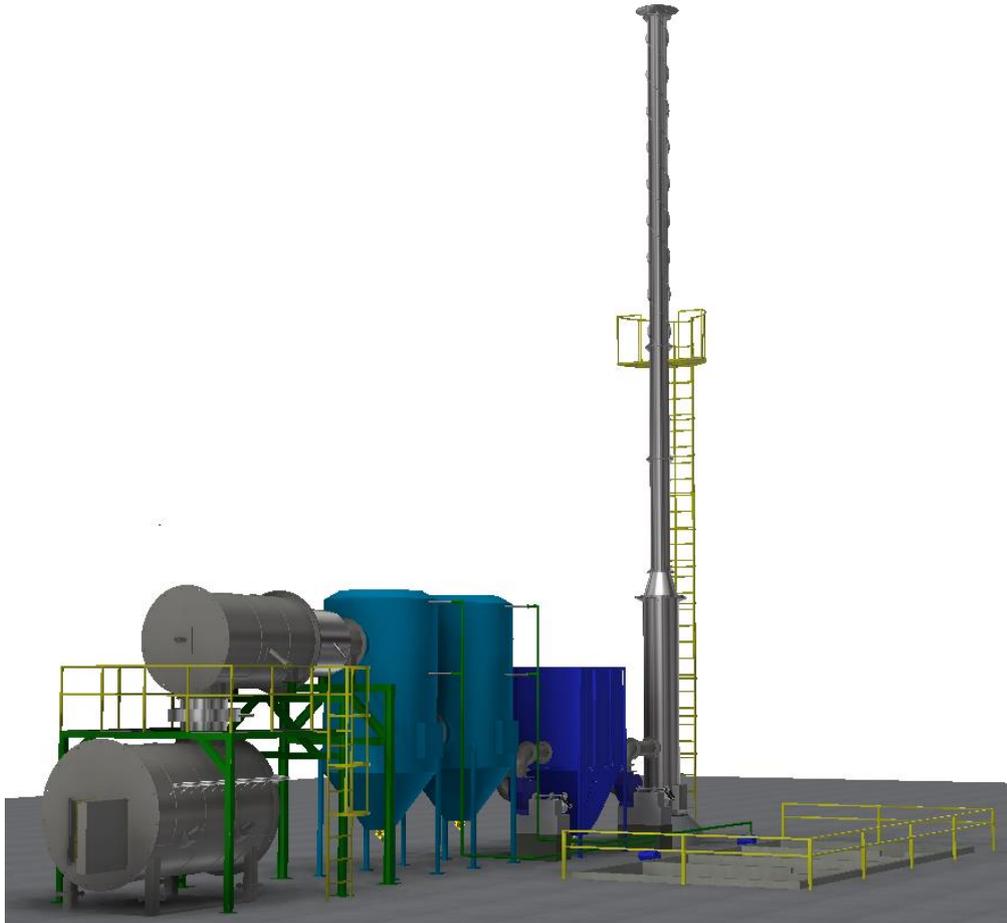
según (Moharir et al., 2019), la incineración es un proceso térmico para el tratamiento de residuos, puede entenderse como un proceso de combustión controlada y que tiene como objetivo principal la reducción de volumen y peso, así como también la recuperación de energía a partir de los residuos. Los productos finales de la incineración incluyen cenizas, gases de combustión y aguas residuales. La mayoría de los incineradores están diseñados para trabajar en el rango de 900 a 1100°C.

Según (Baharun et al., 2005) la incineración es un proceso en el que los residuos se queman en condiciones controladas para oxidar el carbono y el hidrógeno presentes en los residuos. También señala que es la mejor opción disponible para el tratamiento de dichos residuos, en particular para los residuos hospitalarios. La incineración tiene la ventaja de convertir los residuos en materia inerte y al mismo tiempo reduce su volumen hasta en un 95% de su tamaño original.

(Lee & Huffman, 1989), la principal ventaja de la incineración es que reduce significativamente el volumen de material, puede destruir patógenos y sustancias orgánicas peligrosas y hace que los residuos sean irreconocibles y en forma de cenizas. La desventaja es que la incineración puede emitir trazas de contaminantes no deseados, como dioxinas policloradas y furanos (PCDD y PCDF) y partículas metálicas si los incineradores no están bien diseñados y operados.

### Figura 8

Vista 3D de un incinerador de doble cámara.



Fuente: elaboración propia- inventor 2021

## **2.3. Marco Conceptual**

### **2.3.1. Eficiencia de combustión**

(Santolero, 2003), afirma que en 1976, la Ley de Control y Sustancias Tóxicas prohibió la fabricación adicional de bifenilos policlorados (PCB) después del 2 de julio de 1979, estableció límites sobre el uso de PCB en el comercio y estableció regulaciones para la eliminación adecuada de PCB. En la eliminación de residuos que contienen PCB, se aplican la Ley de conservación y recuperación de recursos (RCRA) y Ley de control de sustancias tóxicas (TSCA). Los estándares TSCA se pueden resumir de la siguiente manera: El horno incinerador debe funcionar con al menos un 99,9% de eficiencia de combustión. Según (Rickman, 1991), cuando la concentración supere las 500 ppm, los PCB deben eliminarse en incineradores que logren una eficiencia de combustión (CE) del 99,9% y cumplan una serie de condiciones operativas específicas del incinerador (temperatura de combustión, tiempo de residencia, concentración de oxígeno en la chimenea).

(Saxena & Jotshi, 1994) describe un método muy comúnmente empleado para el cálculo del porcentaje de utilización de carbono o eficiencia de combustión. Este procedimiento de cálculo de la eficiencia se basa únicamente en el conocimiento de la composición de los gases de combustión y asume que no hay pérdidas de carbono y que toda la alimentación de carbono presente en los residuos se convierte completamente en monóxido de carbono y dióxido de carbono únicamente.

(Brunner, 1985) afirma que la incineración debe cumplir una estricta condición operativa en la que los residuos que se procesan dentro del incinerador, para alcanzar el máximo rendimiento de un incinerador se debe regularse a través de su eficiencia de combustión, y medirse a través de las concentraciones del monóxido de carbono y dióxido de carbono gaseoso, para garantizar la combustión completa de los residuos.

(Niessen, 1991), considera que en algunos permisos, la "eficiencia de combustión" debe ser monitoreada y mantenida en todo momento por encima de algún punto de ajuste, como el 99,9%. La eficiencia de combustión está relacionada con las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

(Patumsawad & Cliffe, 2002) define que la eficiencia de combustión se calcula mediante la siguiente ecuación  $CE = \%CO_2 / (\%CO + \%CO_2)$ . Donde  $\%CO_2$  es el porcentaje de dióxido de carbono de la chimenea y  $\%CO$  es el porcentaje de monóxido de carbono de la chimenea.

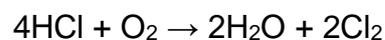
### 2.3.2. Gases de combustión y sus controles.

- **Monóxido de carbono**

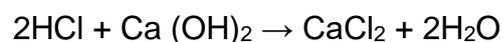
Según (Documento BREF, 2014), el monóxido de carbono es un gas que se puede encontrar en los gases de combustión como producto de la combustión incompleta de compuestos orgánicos se usa generalmente para verificar la eficiencia de la incineración. El CO surge en las cámaras de combustión cuando no hay suficiente  $O_2$  para la oxidación total o si la temperatura no es lo suficientemente alta como para garantizar una reacción completa al  $CO_2$ .

- **Cloruro de hidrogeno**

Como señala (Documento BREF, 2014), el cloro puede estar presentes en los residuos sólidos en forma plásticos PVC. En las condiciones del horno, el cloro se convierte principalmente HCl y parte de estos pueden reaccionar para formar cloruros metálicos. A las temperaturas alcanzadas durante la incineración, es importante considerar el equilibrio.

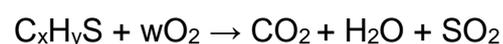


El HCl se eliminan añadiendo agentes neutralizantes, por ejemplo, cal hidratada  $Ca(OH)_2$ , hidróxido de sodio NaOH o carbonato de calcio,  $CaCO_3$ . La siguiente reacción muestra la neutralización de contaminantes ácidos con  $Ca(OH)_2$ :

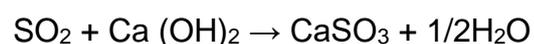


- **Dióxido de azufre**

Según (Documento BREF, 2014), se formará principalmente  $SO_2$  durante la incineración, si los residuos contienen compuestos de azufre.



La mayoría de los óxidos de azufre terminan en los gases de chimenea como  $SO_2$ . Este contaminante puede eliminarse mediante las reacciones de:



- **Dióxidos nitrosos**

(Documento BREF, 2014), el óxido nítrico NO y el dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> son emitidos de plantas incineradoras se originan de la conversión del nitrógeno contenido en los residuos cuando se incineran (denominado NO<sub>x</sub>). Los compuestos NO<sub>x</sub> pueden reducirse mediante la tecnología del SNCR está basada en la reducción química de la molécula de NO<sub>x</sub> a nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Un agente reductor con base en nitrógeno (reactivo), tal como amoníaco o urea, es inyectado en el gas después de la combustión. El reactivo puede reaccionar con un número de componentes del gas de combustión. Sin embargo, la reacción de reducción de NO<sub>x</sub> se favorece sobre otros procesos de reacción química en un rango específico de temperatura y en presencia de oxígeno, por lo tanto, se considera un proceso químico selectivo. La representación global de estas reacciones está dada a continuación. Nótese que los NO<sub>x</sub> están representados como NO, puesto que es la forma predominante de NO<sub>x</sub> dentro de la caldera.

La ecuación de la reacción con amoníaco está dada por:



La ecuación de la reacción con urea está dada por:



El principal subproducto formado durante la SNCR es el óxido nitroso N<sub>2</sub>O.

- **Material particulado**

(Documento BREF, 2014), describe que las emisiones de material partículas formados en las plantas incineradoras están conformados ceniza fina. La captura de y separación de partículas del gas de combustión, se realiza mediante equipos de control de la contaminación, estos eliminan la mayor parte de las partículas y sustancias inorgánicas y orgánicas arrastradas como cloruros metálicos, PCDD/F. El equipo de control de la contaminación atmosférica reduce mucho las emisiones de partículas totales de las plantas incineradoras de residuos.

Según (Mohamed, 2015), la determinación de aquellas partículas de menos de 10 μm de diámetro, denominadas PM10, que son las que presentan una mayor

capacidad de acceso a las vías respiratorias. Dentro de la fracción PM10, las partículas más pequeñas menores de 2,5  $\mu\text{m}$ , PM2,5.

### 2.3.3. Límites máximos permisibles

Según la (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004) y (Ministerio del Medio Ambiente de la Republica de Chile, 2007) establecen los límites máximos permisibles de emisión de gases de combustión para las instalaciones de incineración de residuos que se muestran en la tabla 2

**Tabla 2**

Límites Máximos Permisibles de Emisiones Provenientes de Incineración.

<b>Contaminante</b>	<b><sup>a</sup>Límite máximo permisible-México</b>	<b><sup>b</sup>Límite máximo permisible-Chile</b>
CO (mg/m <sup>3</sup> )	63	50
HCl (mg/m <sup>3</sup> )	15	20
NOx (mg/m <sup>3</sup> )	300	300
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	80	50
Material Particulado (mg/m <sup>3</sup> )	50	30
Dioxinas- Furanos (ng/m <sup>3</sup> )	0.2	0.2

Fuente: <sup>a</sup>(Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales México, 2004)

<sup>b</sup>(Ministerio del Medio Ambiente de la Republica de Chile, 2007)

### 2.3.3. Tecnología de análisis de gases de combustión.

Según (Testo, 2018), la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (comúnmente conocida como EPA por sus siglas en inglés, algunas veces USEPA) es una agencia del gobierno federal de Estados Unidos encargada de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente: aire, agua y suelo. El CTM significa "Conditional Test Methods" porque la EPA define métodos de ensayo que describen el uso de equipos de determinada tecnología para ciertas tareas de medición. Su Aplicabilidad, de este método es aplicable a la determinación de concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O<sub>2</sub>). Este método está designado para

proporcionar un alto grado de seguridad en el cumplimiento de normativas mediante la monitorización o comprobación periódicas.

Y tienen por Principio, extraer una muestra de gas de la chimenea mediante un analizador de portátil para la determinación de concentraciones de NO, NO<sub>2</sub>, CO y O<sub>2</sub>. Se deben conocer con exactitud las especificaciones técnicas y el manejo del analizador, así como los procedimientos de comprobación para obtener datos fiables.

**Tabla 3**

Metodología de muestreo y análisis de Emisiones Gaseosas

Parámetro	Muestreo	Norma	Análisis
Dióxido de azufre	Celda		
Monóxido de Carbono	electroquímica	CTM-034	Medición directa
Dióxido de carbono	(equipo testo )		
Óxido de Nitrógeno			

Fuentes: (Testo, 2018)

#### 2.4. Definición de términos básicos

- **Cámara de combustión**

Compartimiento en donde se realiza la ignición y se lleva a cabo la combustión de los desechos: peligrosos, no peligrosos y especiales.

- **Cámara de postcombustión**

Compartimiento en donde son tratados los gases de combustión generados por la incineración de desechos.(Ministerio del Ambiente y Agua de la República del Ecuador, 2021)

- **Dióxido de azufre**

Es un gas incoloro e irritante formado principalmente por la oxidación del azufre contenido especialmente en los combustibles fósiles.(Ministerio del Ambiente y Agua de la República del Ecuador, 2021)

- **Incineración.**

Proceso térmico en presencia de oxígeno en el cual se realiza la oxidación térmica de los materiales combustibles contenidos en los residuos, transformándolos en bióxido de carbono, agua, escorias, calor y gases. La

incineración se utiliza para reducir el volumen, la peligrosidad y descomponer o cambiar la composición física, química o biológica de un residuo sólido, líquido, o gaseoso. (Ministerio del Ambiente y Agua de la República del Ecuador, 2021)

- **Monitoreo de emisión.**

Proceso programado de recolectar y analizar muestras representativas de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos, efectuar mediciones, y realizar el subsiguiente registro, de varias características de los contaminantes recolectados y del ambiente, a menudo con el fin de evaluar la conformidad respecto a los límites máximos permisibles.(Ministerio del Ambiente y Agua de la República del Ecuador, 2021)

- **Monóxido de carbono**

Es un gas incoloro, inodoro y toxico, producto de la combustión incompleta de los combustibles.(Ministerio del Ambiente y Agua de la República del Ecuador, 2021)

- **Residuos Hospitalarios.**

son un subconjunto de los desechos sólidos y se definen como cualquier desecho sólido que se genera en el diagnóstico, tratamiento (p. Ej., Prestación de servicios médicos) o inmunización de seres humanos o animales, en investigaciones relacionadas con los mismos, o en la producción o pruebas de biológicos(Lee & Huffman, 1996)

- **Óxidos de nitrógeno (NOx)**

Es la suma del óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) principalmente. El NO es un gas incoloro que se genera por la combinación del nitrógeno (N<sub>2</sub>) y del oxígeno (O<sub>2</sub>) de la atmosfera durante los procesos de combustión, así como por la oxidación del nitrógeno contenido en los combustibles. El NO<sub>2</sub>, que se forma a partir de la oxidación del NO, es un gas toxico, de color pardo rojizo.

(Ministerio del Medio Ambiente de la Republica de Chile, 2007)

### **III. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1. Hipótesis**

##### **3.1.1. Hipótesis general**

- Optimizando las condiciones de operación del incinerador (Cantidad de residuos alimentados, la temperatura de cámaras de combustión y temperatura de la cámara de postcombustión), entonces se logrará una mejora en la eficiencia de combustión.

##### **3.1.2. Hipótesis específicas**

- Los factores significativos del incinerador, que influyen en la eficiencia de combustión son: los residuos alimentados y las temperaturas de las cámaras del incinerador.
- Mediante la optimización de las condiciones de operación del incinerador, se logrará la eficiencia de combustión mayor a 99%
- Mediante la optimización de las condiciones del incinerador, las concentraciones de los gases de combustión por debajo de los límites máximos permisibles.

##### **3.2.3. Definición conceptual de variables.**

###### **i) Variables dependientes**

###### **$Y_1$ =Eficiencia de combustión.**

(W.E.Lee, 2014), la eficiencia de combustión CE, se determina midiendo las concentraciones de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> y monóxido de carbono, CO en los gases de escape del incinerador.

La eficiencia de combustión (CE) se calculó mediante la siguiente ecuación (Patumsawad & Cliffe, 2002):  $CE = \%CO_2 / (\%CO + \%CO_2)$

(Ferdowsi et al., 2012), Debido a las regulaciones de gestión administrativa de desechos médicos de la ley de gestión de desechos de Irán, la eficiencia de combustión (CE) de la incineración debe ser de al menos 99,50%.

###### **ii) Variables independientes**

###### **$X_1$ : Residuos sólidos alimentados, kg**

(DIGESA, 2018). Son aquellos residuos generados y en las actividades para la atención e investigación médica en hospitales. Se caracterizan por estar contaminados con agentes infecciosos.

**X<sub>2</sub>: Temperatura de la cámara de combustión, °C**

DIGESA,(2018). En la primera cámara debe alcanzar temperaturas entre 650°C y 850°C

**X<sub>3</sub>: Temperatura de la cámara de postcombustión, °C**

(DIGESA, 2018). Cámara secundaria debe alcanzar temperaturas superiores a 1200°C donde los gases provenientes de la cámara primaria con contenido de gases tóxicos logrando un efluente con un mínimo de emanaciones peligrosas.

### 3.2.4. Operacionalización de variable

**Tabla 4**

Operacionalización de variables

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍNDICE	MÉTODO
$Y_1 =$ optimización de las condiciones del incinerador	- Cantidad de residuos alimentados al incinerador	- Kg/lote	INTERVALO	- Pruebas experimentales y diseño estadístico Box- Behnken
	- Temperaturas de las cámaras del incinerador	- °C		
$X_1 =$ Cantidad de Residuos sólidos alimentados	- Cantidad de residuos alimentados al incinerador	- Lote/Kg		- Medición con Balanza electrónica
$X_2 =$ Temperatura de la cámara de combustión.	- Temperatura.	- °C	INTERVALO	- Medición con Sensor de temperatura tipo k
$X_3 =$ Temperatura de la cámara de postcombustión.				
$X_4 =$ Eficiencia de combustión	- Eficiencia de combustión	%CE		- (Método Instrumental vía Celda Electroquímica)
$X_5 =$ Gases de combustión	- Concentración de los gases de combustión	- mg/m <sup>3</sup>		

## **V. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1 Tipo y diseño de investigación.**

La presente investigación de tipo como experimental.

### **4.2. Método de investigación.**

Se aplicó el siguiente método experimental considerándose las consideraron las siguientes etapas:

#### **Primera etapa: Pesaje de residuos sólidos residuos hospitalarios.**

Para este experimento se pesaron tres cantidades de carga de 300kg, 350kg y 400kg. Estos residuos se componían principalmente de una mezcla de pañales, guantes, agujas, trajes protectores, mascarillas, restos alimentos, muestras biológicas, materiales de empaque, jeringas, bolsa de sangre, papel y restos de medicamentos.

#### **Segunda etapa: Condiciones de operación de las variables del proceso de Incineración.**

Antes de ser introducidos los residuos se estableció las condiciones para el precalentamiento al incinerador en 300°C y 500°C respectivamente en la cámara de combustión y postcombustión. A continuación, se estableció rangos de temperaturas a 650°C, 700°C y 750°C contra 1000°C, 1100°C y 1200°C, para la cámara de combustión y postcombustión respectivamente. Seguido se activa el aireador centrifugo secundario a razón de 15m<sup>3</sup>/min. Las temperaturas de las cámaras del incinerador, se miden a través del sensor de termocupla tipo K y un registrador de temperatura digital (pirómetro). Luego se cerró herméticamente la puerta de carga y se inicia la incineración. Finalmente, el producto del proceso de incineración son las cenizas que se procedió a retirar y registrar la reducción del peso.

#### **Tercera etapa: Determinación de la eficiencia y concentración de los gases.**

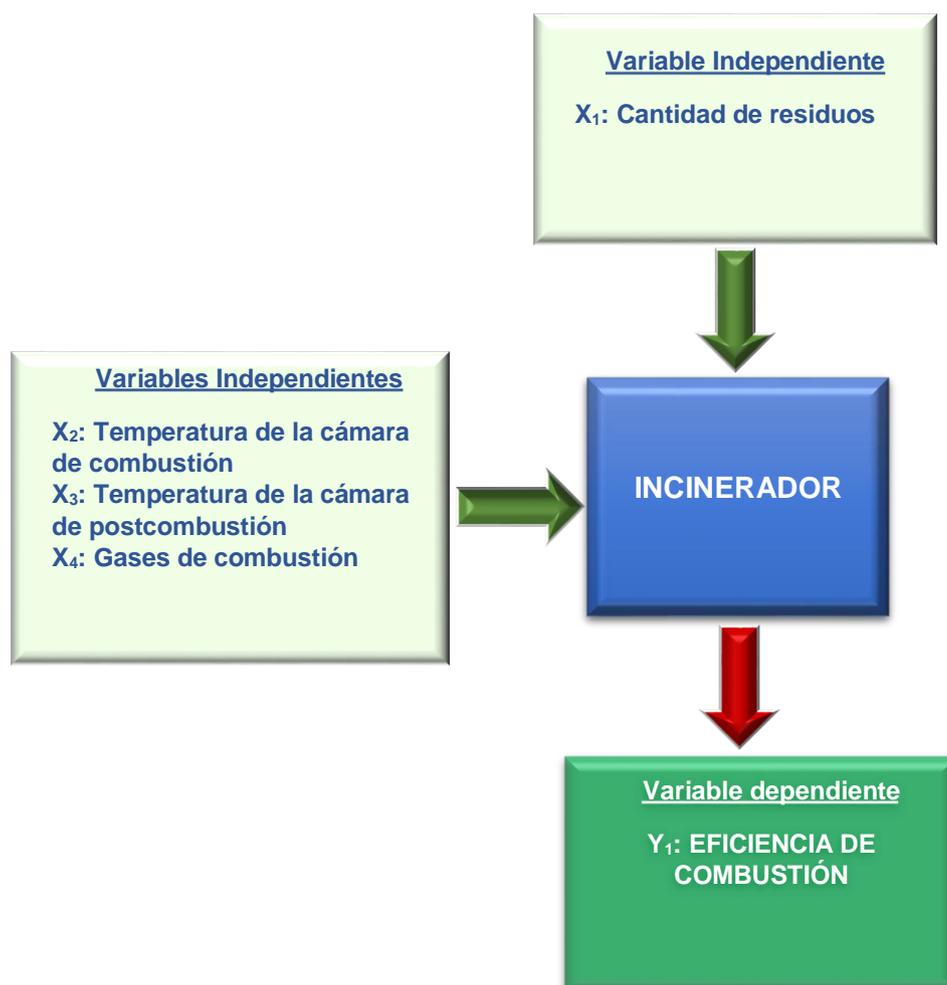
Durante el proceso de incineración los gases de combustión pasaron por columnas de enfriamiento, lavado y filtros de carbón activado, para eliminar el material particulado y luego se tomaron en el orificio de muestreo de la chimenea en línea utilizando un analizador de gases de combustión, mediante este equipo se puede registrar las concentraciones monóxido de carbono %CO, %CO<sub>2</sub>, y %O<sub>2</sub>. En este estudio, la eficiencia de combustión (CE) se calculó mediante la siguiente ecuación:  $CE = \%CO_2 / (\%CO + \%CO_2)$

**Cuarta Etapa: Metodología de superficie de respuesta – Diseño Box-Behnken ( $\alpha=0.05$ ).**

Se utilizó el diseño Box-Behnken con tres factores ( $X_1, X_2, X_3$ ) y tres niveles (-1, 0, +1), considerando la cantidad de residuo sólido (300kg, 350kg, 400kg), temperatura de la cámara (650°C, 700°C, 750°C) de combustión y temperatura de la cámara de postcombustión (1000°C, 1100°C, 1200°C) como variables independientes y la eficiencia de combustión ( $Y_1$ ) como la variable de respuesta fue la eficiencia de combustión ( $Y_1$ ), (%CE). La tabla 6 se presenta la codificación de las variables independientes. Un total de quince ensayos experimentales, incluyendo tres réplicas en el punto central, fueron llevados a cabo de forma aleatoria tabla 6.

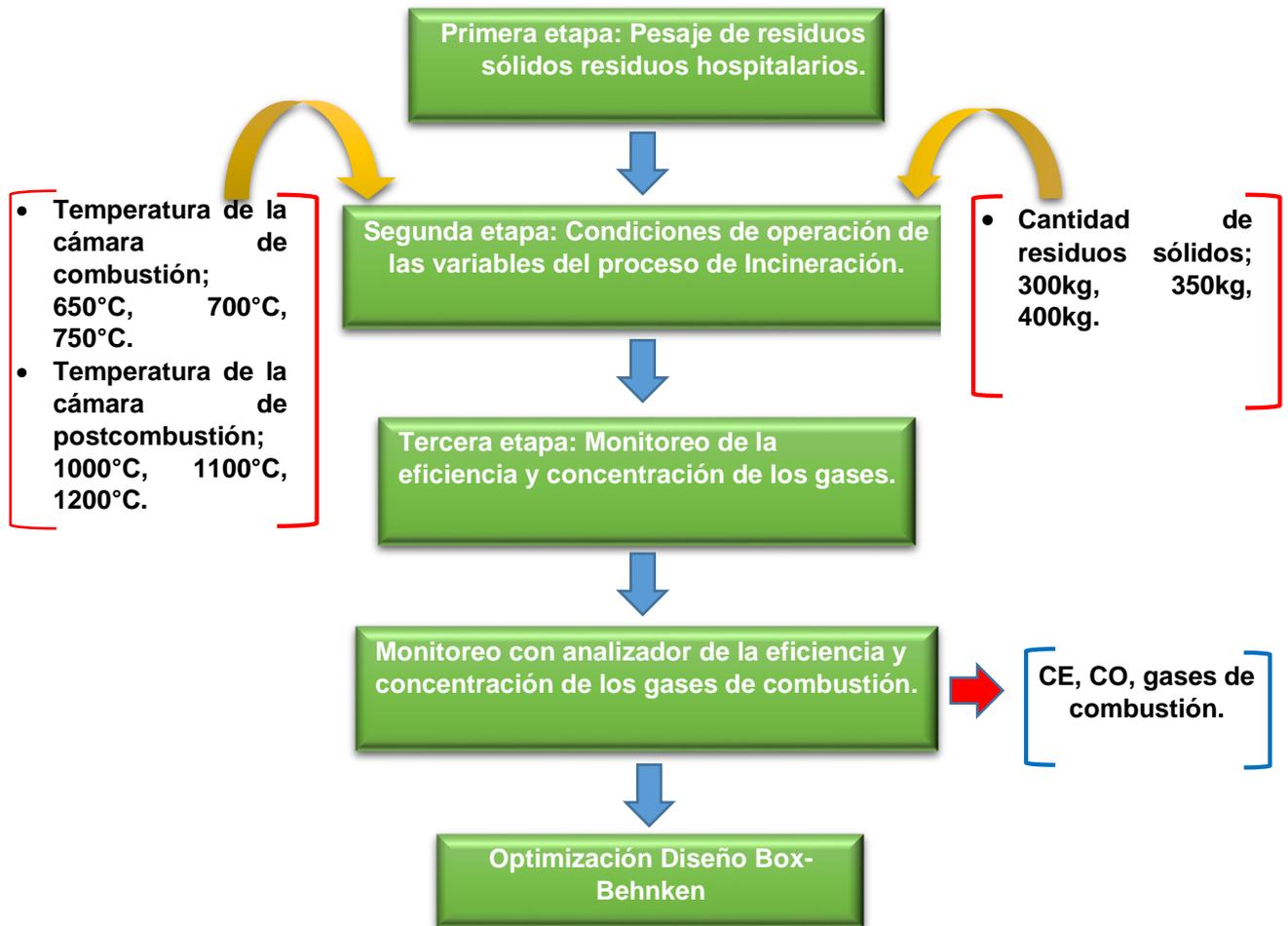
**Figura 9**

Diseño experimental



**Figura 10**

Etapas de la investigación



**Tabla 5**

Factores y sus niveles para el diseño experimental.

Variables independientes	-1	0	1
X <sub>1</sub> : residuos sólidos, lote/Kg	300	350	400
X <sub>2</sub> : Temperatura cámara de combustión, °C	650	700	750
X <sub>3</sub> : Temperatura cámara de postcombustión, °C	1000	1100	1200
<b>VARIABLE RESPUESTA Y1</b>	Eficiencia de combustión %CE		

**Tabla 6**

Matriz de diseño experimental utilizando el diseño de Box- Behnken.

Tratamientos	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Valores reales de las variables independientes		
				Lote/kg	T1 (°C)	T2(°C)
1	+1	+1	0	400	750	1100
2	0	-1	-1	350	650	1000
3	0	0	0	350	700	1100
4	0	+1	-1	350	750	1000
5	0	+1	+1	350	750	1200
6	+1	0	-1	400	700	1000
7	-1	-1	0	300	650	1100
8	0	0	0	350	700	1100
9	0	-1	+1	350	650	1200
10	0	0	0	350	700	1100
11	+1	-1	0	400	650	1100
12	-1	+1	0	300	750	1100
13	-1	0	+1	300	700	1200
14	-1	0	-1	300	700	1000
15	+1	0	+1	400	700	1200

### **4.3. Población y muestra.**

#### **4.3.1. Población**

La población está compuesta por el horno incinerador y sus dispositivos de control de gases de combustión de la empresa Incineragas EIRL.

#### **4.3.2. Muestra**

La muestra en estudio fue el horno incinerador de la empresa Incineragas EIRL

### **4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado.**

El presente trabajo de investigación tiene como escenario de estudio es en la planta Incineragas en el distrito de Lurín

### **4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.**

#### **4.5.1. Técnicas**

La técnica de prueba utilizado es US EPA CTM 034 "Conditional Test Methods" de acuerdo a los procedimientos CFR40. Determinación de emisiones de oxígeno y/o monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno en fuentes fijas (Método Instrumental vía Celda Electroquímica)

#### **4.5.2. Instrumentos**

- Horno incinerador de residuos solidos
- Analizador electroquímico portátil marca TESTO
- Balanza digital capacidad de 300kg
- Termocuplas tipo k
- Pirómetro

### **4.6. Análisis y procesamiento de datos.**

Para establecer las condiciones óptimas del proceso de incineración se llevó a cabo el diseño experimental de superficie Box-Behnken, con tres factores y tres variables: cantidad de residuos sólidos (lotes), temperatura de la cámara de combustión y temperatura de la cámara de postcombustión, y como variable respuesta la eficiencia de combustión %CE. La elaboración y análisis de los diseños experimentales fueron realizados con el programa minitab-19.

## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos.

Luego de realizadas las pruebas experimentales, se obtuvieron los siguientes resultados.

En la tabla 7 se encuentra los tratamientos que se realizaron durante el periodo de ejecución del trabajo de investigación donde se muestran los resultados del %CE y CO.

**Tabla 7**

Resultados experimentales %CE.

Orden Corrida	Lote	T1	T2	% CE	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	CO ppm	CO mg/m <sup>3</sup>
1	400	750	1100	99.85	4.94	13.44%	74.0	92.96
2	350	650	1000	99.39	1.50	18.60%	91.8	115.61
3	350 <sup>a</sup>	700	1100	99.94	3.70	15.89%	24.0	28.93
4	350	750	1000	99.45	1.58	18.50%	88.0	110.82
5	350	750	1200	99.90	3.50	16.29%	34.0	42.77
6	400	700	1000	99.38	1.49	16.93%	93.3	44.04
7	300	650	1100	99.88	13.60	6.10%	38.0	47.57
8	350 <sup>a</sup>	700	1100	99.94	3.79	15.89%	23.0	28.93
9	350	650	1200	99.97	12.20	6.30%	40.0	50.08
10	350 <sup>a</sup>	700	1100	99.98	12.70	6.20%	25.0	31.30
11	400	650	1100	99.86	5.58	13.48%	52.0	65.33
12	300	750	1100	99.88	4.56	16.93%	40.0	44.04
13	300	700	1200	99.97	12.10	6.10%	31.0	38.81
14	300	700	1000	99.59	2.00	18.20%	82.0	103.25
15	400	700	1200	99.97	13.60	6.10%	38	53.83

<sup>a</sup>Repeticiones en el punto central para calcular el error experimental.

## 5.2. Resultados inferenciales.

**Figura 11**

Análisis de varianza - diseño Box Behnken.

Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	0.717552	0.079728	126.89	0.000
Lineal	3	0.516825	0.172275	274.18	0.000
Lote	1	0.015312	0.015312	24.37	0.004
T1	1	0.001513	0.001513	2.41	0.181
T2	1	0.500000	0.500000	795.76	0.000
Cuadrado	3	0.183877	0.061292	97.55	0.000
Lote*Lote	1	0.000164	0.000164	0.26	0.631
T1*T1	1	0.011856	0.011856	18.87	0.007
T2*T2	1	0.177356	0.177356	282.26	0.000
Interacción de 2 factores	3	0.016850	0.005617	8.94	0.019
Lote*T1	1	0.001600	0.001600	2.55	0.171
Lote*T2	1	0.011025	0.011025	17.55	0.009
T1*T2	1	0.004225	0.004225	6.72	0.049
Error	5	0.003142	0.000628		
Falta de ajuste	3	0.002075	0.000692	1.30	0.463
Error puro	2	0.001067	0.000533		
Total	14	0.720693			

p\*(<0.05) = estadísticamente significativo; A: Lote; T2: Temperatura de la cámara de postcombustión y BB: T1\*T1, CC: T2\*T2, AC: Lote\*T2 y BC: T1\*T2 interacción entre los lotes de residuos sólidos. R2: 99.56%; R2(ajustado):98.78%

**Figura 12**

Ecuación de regresión.

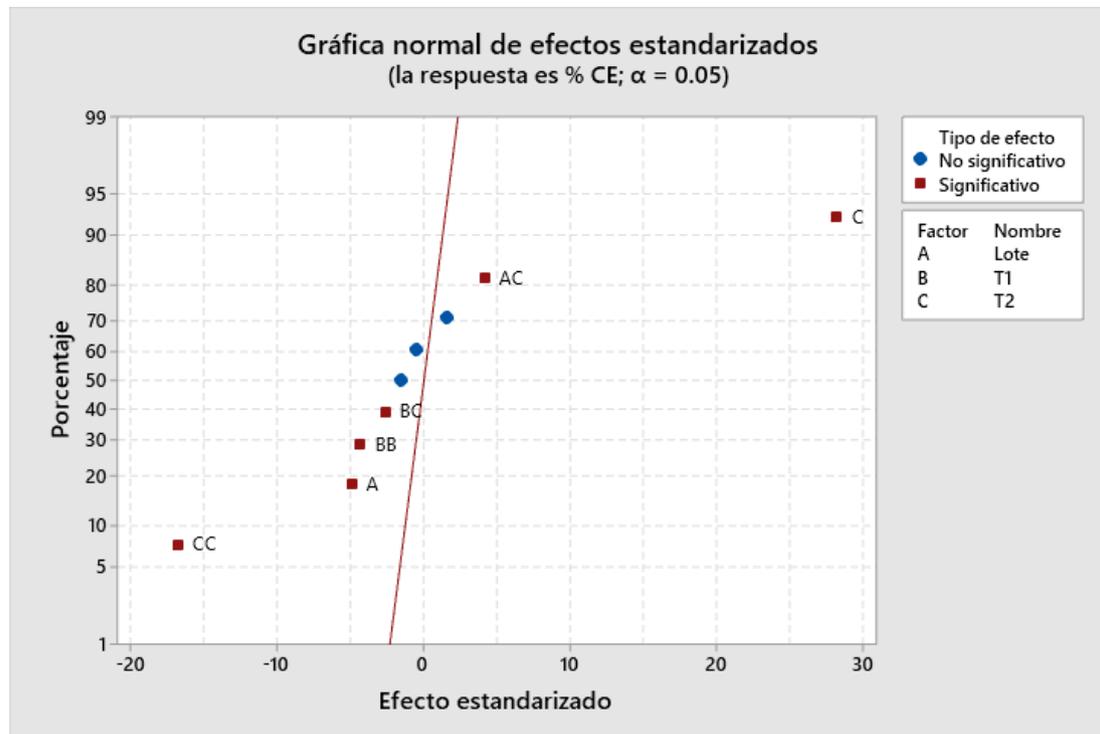
$$\% \text{ CE} = 60.75 - 0.01616 \text{ Lote} + 0.03581 \text{ T1} + 0.05159 \text{ T2} - 0.000003 \text{ Lote*Lote} - 0.000023 \text{ T1*T1} - 0.000022 \text{ T2*T2} + 0.000008 \text{ Lote*T1} + 0.000011 \text{ Lote*T2} - 0.000006 \text{ T1*T2}$$

El valor de R<sup>2</sup> ajustado fue de 98.78%, por lo que implica que la variabilidad obtenida puede ser explicada correctamente mediante el modelo. De acuerdo con estos resultados, el análisis ANOVA proporciona un modelo (ecuación de regresión) de segundo orden.

A continuación, se muestra la ecuación de regresión con los parámetros operacionales los cuales mostraron un valor de  $p < 0,05$ , que indican un efecto significativo sobre las variables respuesta.

**Figura 13**

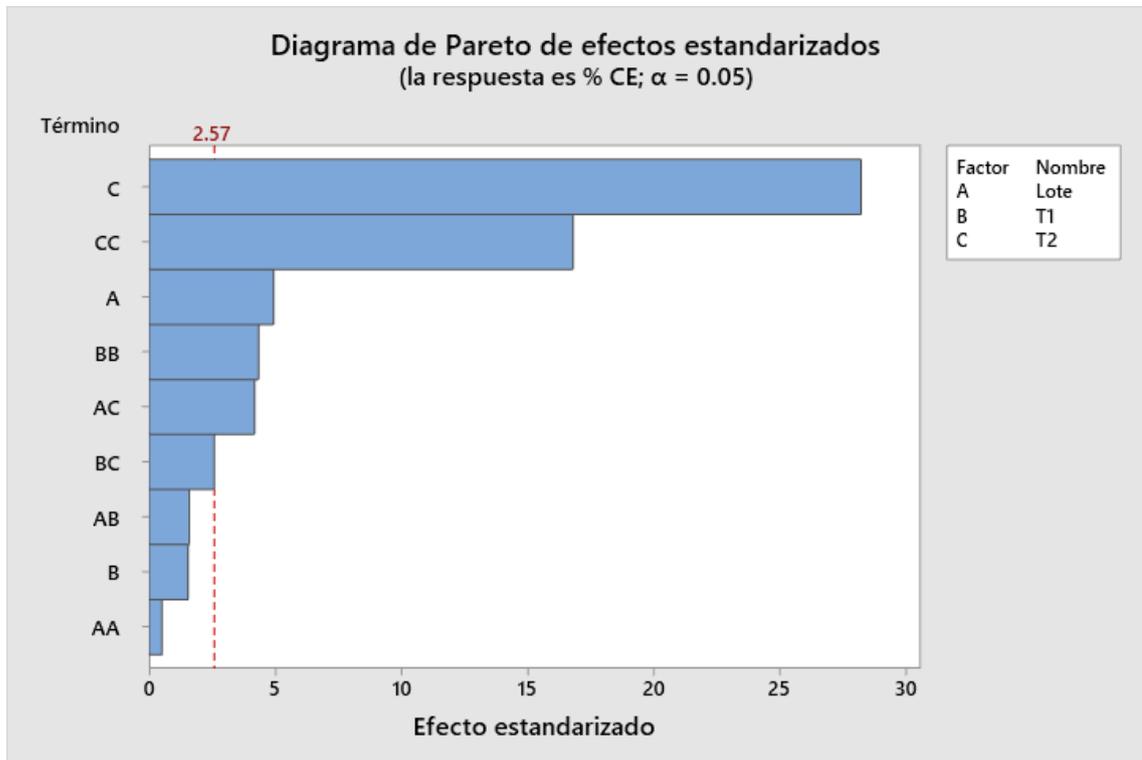
Probabilidad Normal de los efectos estandarizados con  $p=0.05$



Esta figura 8, puede dividirse en dos regiones, la región debajo del 50%, donde los factores y sus interrelaciones negativas (A, BB, BC y CC), y la región sobre el 50% donde los factores presentan coeficientes positivos (A y AC), los factores e interrelaciones que se encuentran alejados de la línea son significativos, mientras que los factores e interrelaciones sobre la línea, corresponden a un estimado de errores de los efectos, siendo no significativos. Los valores positivos de los efectos indican que un incremento en sus niveles conlleva a un incremento en el porcentaje de eficiencia de la incineración (%CE). Por el contrario, los valores negativos de los efectos, conducen a una disminución de la respuesta (%CE), cuando sus niveles son aumentados.

**Figura 14**

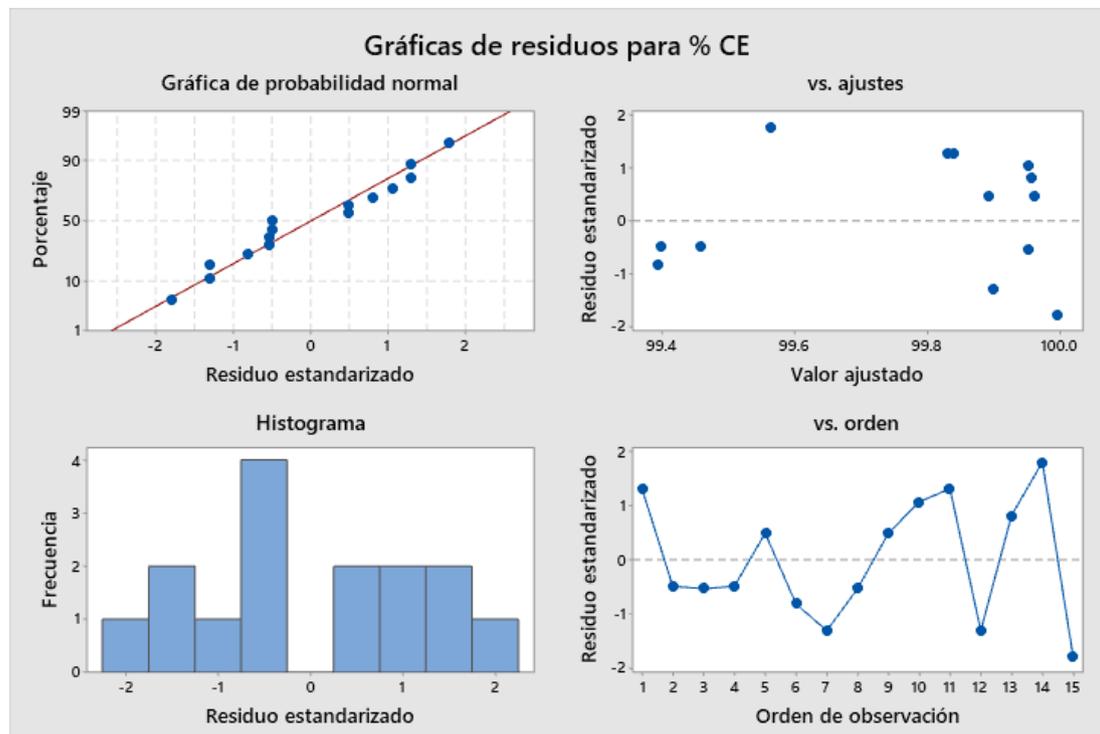
Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados con  $p=0.05$



EL diagrama de Pareto figura 14, se muestra los factores que afectan la variable respuesta CE, ordenados de mayor a menor, con línea de referencia de 2,57 de efecto estandarizado, observándose Los significativos fueron los siguientes factores: C, CC, A, BB, AC, BC. Los otros efectos son poco influyentes en la variable respuesta con valores que no superan la valla, por lo que no serán considerados.

**Figura 15**

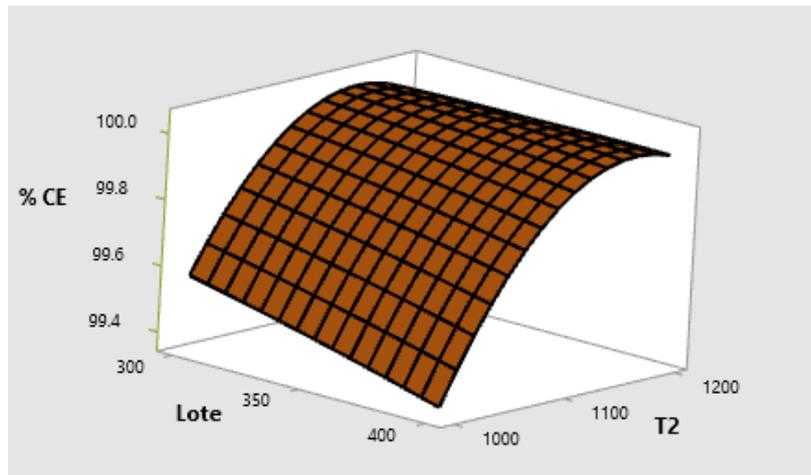
Gráfico de Residuos estandarizados



- a) En la figura 15, grafica de probabilidad normal, se puede observar que los residuos siguen una distribución normal, porque estos tienen una tendencia lineal. Donde la mitad toma valores positivos (sobre el 50%) y la otra mitad toma valores negativos (bajo el 50%). Asimismo, la desviación máxima y mínima de estos valores es de solo  $\pm 2.0$ , lo cual señala que el modelo presenta una desviación mínima entre el valor ajustado y el valor observado.
- b) Con la gráfica de residuos vs. Ajustes se verifico que los residuos están distribuidos aleatoriamente y tienen una varianza constante. Lo ideal es que los puntos se ubiquen aleatoriamente a ambos lados del 0, con patrones no detectables en puntos.

**Figura 16**

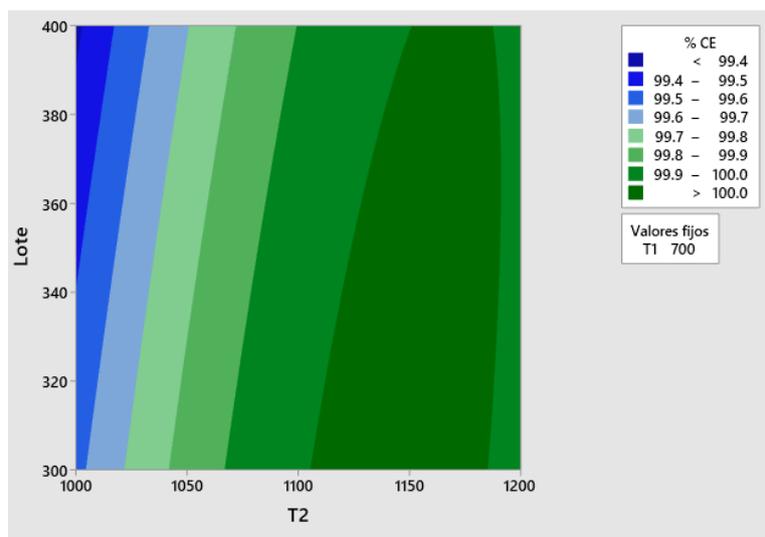
Grafica Superficie de respuesta del porcentaje de eficiencia vs T2, Lote.



La figura 16, se expone que 300kg de residuos sólidos y 1147°C de temperatura de la cámara de postcombustión, son las condiciones óptimas para la mejora de la eficiencia de combustión alcanzando presumidamente una eficiencia de combustión mayor de 99%.

**Figura 17**

Gráficas de contorno de %CE vs T2; Lote.



A continuación, se muestra en el diagrama de contorno de superficie de repuesta figura 17 el cual muestra que el valor mal alto para el porcentaje de eficiencia de combustión se encuentra en la parte derecha de la gráfica, coincide con los valores altos de T1 y valores de lote.

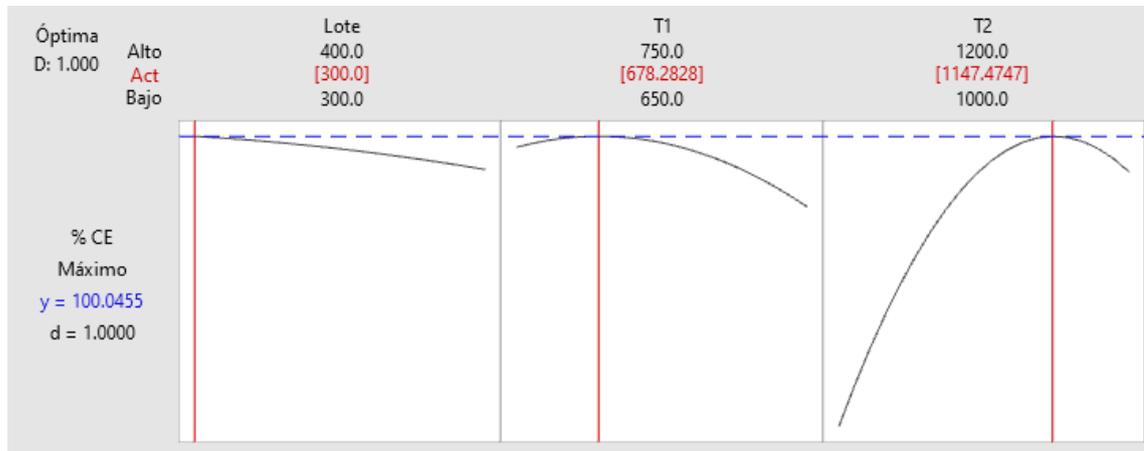
**Figura 18**

Precisión de optimización de respuesta del diseño Box Behnken.

Valor de	
Variable configuración	
Lote	300
T1	678.283
T2	1147.47
EE de	
Respuesta	Ajuste ajuste
IC de 95%	
IP de 95%	
% CE	100.045 0.017 (100.001; 100.089) (99.967; 100.123)

**Figura 19**

Gráfica de optimización de las condiciones de operación de la incineración.



En la Figura 19 se presentan las gráficas de respuestas contra los niveles empleados para cada uno de los factores en el diseño experimental Box-Behnken, las líneas rectas verticales para cada factor reflejan el nivel de factor seleccionado y las líneas horizontales punteadas reflejan los valores de respuesta de predicción.

### 5.3. Otro tipo de resultados estadísticos, de acuerdo a la naturaleza del problema y la Hipótesis.

Como se observa en los datos obtenidos del ANOVA figura 11, las variables que afectan significativamente la eficiencia de combustión corresponden a la cantidad de residuos y temperatura de la cámara de postcombustión. En comparación con la investigación por (Baharun et al., 2005), las variables que afectan la eficiencia de la combustión, teniendo como variable independiente fue el CO, se analizó

por ANOVA, donde los que los valores más significativos fueron alimentación de residuos sólidos, temperatura de la cámara combustión y temperatura de postcombustión. Esto significa que hubo tres valores están contribuyendo significativamente al valor del CO para el proceso de incineración de residuos. Esto a su vez implica que estas tres variables contribuyen a la eficiencia de combustión.

## **VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.**

Con relación a la hipótesis general, en el cual Optimizando las condiciones de operación del incinerador se obtendrá una mejora en la eficiencia de combustión, de acuerdo a la tabla 7 la CE osciló entre el 99,38% y el 99,98%, asimismo utilizando condiciones óptimas se logró una eficiencia de combustión CE de 99.96%, una mayor a lo planteado en la hipótesis, quedando de esta manera demostrada esta hipótesis.

Con respecto a la hipótesis específica relacionada con los factores operativos del incinerador, para la mejora su eficiencia son la Cantidad de residuos alimentados, temperaturas de cámaras de combustión, temperatura de la cámara de postcombustión. Se comparó el valor-P de los respectivos experimentos con un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , donde se observó que los factores A (lote) y C (Temperatura de la cámara de postcombustión), rechazan la hipótesis nula debido a que presentan un valor-P menor a 0.05, lo cual indica que son significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95%, es decir que los efectos A y C si presentan influencia sobre la eficiencia de combustión CE. El factor B presenta un valor mayor a 0.05 por lo tanto acepta la hipótesis nula y se concluye que no tiene efecto significativo sobre la eficiencia de combustión CE.

### **6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.**

De acuerdo con las investigaciones realizadas por (Honest et al., 2020), ha logrado determinar la CE en diferentes incineradores de los hospitales de Egipto, el cual obtuvo la eficiencia de combustión el más bajo 51.4% y más alto en CE=65.9%. mientras en esta investigación se obtuvo la CE 99,38% y 99,98%,

en cuanto a las condiciones óptimas se logró una eficiencia de combustión CE de 99.96%.

En la investigación de (Finney et al., 2009), se realizaron pruebas de combustión en un reactor de lecho fluidizado a escala de laboratorio donde para lograr altas eficiencias de combustión de alrededor del 97%, utilizando en las condiciones óptimas de funcionamiento para la cámara de combustión del reactor de lecho fluidizado donde se empleó una velocidad de alimentación de pellets de y un caudal de aire, la eficiencia de combustión resultante osciló entre el 86,93 y el 97,98%, mientras en la presente investigación trabajando en condiciones óptimas se logró una eficiencia de combustión CE de 99.96%.

Según el (Ministerio del Medio Ambiente de la Republica de Chile, 2007) establece los límites máximos permisibles de los gases de incineración son los siguientes: CO:50mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub>:300mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>:50mg/m<sup>3</sup> y MP:30mg/m<sup>3</sup>. Mientras que los valores obtenidos en la presente investigación son los siguientes: CO:32.93mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub>:27.99mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>:2.9mg/m<sup>3</sup> y MP:0.0017mg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, las concentraciones de los gases de combustión, no superaron los límites máximos permisibles establecidos en la normativa chilena.

Según el (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales México, 2004), establece los límites máximos permisibles de los gases de incineración son los siguientes: CO:63mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub>:300mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>:50mg/m<sup>3</sup> y MP:30mg/m<sup>3</sup>. Mientras que los valores obtenidos en la presente investigación son los siguientes: CO:32.93mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub>:27.99mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub>:2.9mg/m<sup>3</sup> y MP: 0.0017mg/m<sup>3</sup>. Por lo tanto, las concentraciones de los gases de combustión, no superaron los límites máximos permisibles establecidas en la normativa mexicana.

### **6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes**

El trabajo realizado cumple con lo estipulado en el código de ética de investigación de la universidad nacional del Callao, resolución de Consejo Universitario N° 210- 2017-CU.

## CONCLUSIONES

- Las condiciones óptimas de operación son: cantidad de Residuos sólidos alimentados  $X_1=300\text{kg}$ ; Temperatura de la cámara de combustión,  $X_2= 678^\circ\text{C}$  y Temperatura de la cámara de postcombustión,  $X_3=1147^\circ\text{C}$
- Se determinó los factores operativos significativos del incinerador, que influyen en la eficiencia de combustión: Cantidad de residuos sólidos (lote) y Temperatura de la cámara de postcombustión influyen significativamente en la eficiencia de combustión, en cambio la Temperatura de la cámara de combustión no resulto ser significativo.
- Utilizando condiciones óptimas de operación en el incinerador, se logró una eficiencia de combustión CE de 99.96%, esto implica que las se logró una eficiencia optima
- Utilizando las condiciones óptimas de operación en el incinerador, las concentraciones de los gases de combustión, se analizaron por el método instrumental vía celda electroquímica, los cuales se han obtenido los siguientes resultados:  $\text{CO}:32.93\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_x:27.99\text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{SO}_2:2.9\text{mg}/\text{m}^3$  y  $\text{MP}: 0.0017\text{mg}/\text{m}^3$ , estas concentraciones gaseosas fueron analizados por el ALAB inscrito en INACAL.

## **RECOMENDACIONES**

- Actualmente los funcionamientos de los quemadores funcionan por medio de suministros de glp, Para ahorrar costos operativos, se recomienda que esta planta de incineración de la empresa Incineragas EIRL, se pueda contar con sistemas de recuperación de energía para diversos fines como, por ejemplo, producción de vapor para el tratamiento de residuos como bolsas de sangre.
- Finalmente, se recomiendan realizar experimentos adicionales para comprender mejor los aspectos fundamentales de la combustión heterogénea de residuos hospitalarios y sus emisiones gaseosas y sólidas bajo diferentes condiciones de operación. Así mismo se proponen estudios para favorecer el mezclado de residuos hospitalarios, que son empleados en los hornos incineradores y la trituración previa a la incineración de los residuos.
- Se recomienda realizar análisis de metales pesados y dioxinas y furanos.
- Se recomienda realizar este método a otros incineradores con el fin de optimizar.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Baharun, S., Adnan, R., Mohamad, I., Arshad, K., Ahmad, T., Rashid, M., & Zamri, I. (2005). Variables affecting the combustion efficiency of a clinical waste incineration process. *Jurnal Teknologi*, 42(January), 11–24.
- Brunner, C. R. (1985). Hazardous Air Emissions From Incineration. In *Hazard Air Emiss from Incineration*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2539-0>
- DIGESA. (2018). NTS N°144-MINSA/2018. “Gestión Integral y Manejo de residuos sólidos en establecimientos de salud, servicios médicos de apoyo y centros de Investigación.” *NTS N°144-MINSA/2018.*, 1–85.
- Documento BREF. (2014). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos*.
- Encyclopedia.com. (2018). *Incineration*. <https://www.encyclopedia.com/history/historians-and-chronicles/historians-miscellaneous-biographies/incineration>
- Ferdowsi, A., Ferdosi, M., Mehrani, Z., & Narenjkar, P. (2012). Running title: Hospital waste management in Isfahan: Certain hospital waste management practices in Isfahan, Iran. *International Journal of Preventive Medicine*, 3(4).
- Finney, K. N., Sharifi, V. N., & Swithenbank, J. (2009). Combustion of spent mushroom compost and coal tailing pellets in a fluidised-bed. *Renewable Energy*, 34(3), 860–868. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.012>
- Honest, A., Manyele, S., Saria, J., & Mbuna, J. (2020). Assessment of air pollutant emissions from healthcare waste incinerators of different design features. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 14(October), 311–328. <https://doi.org/10.5897/AJEST2020.2882>
- Jacob, S., Nithianandam, S., Rastogi, S., Sakhuja, S., & Sri Laxma Alankar, S. N. (2021). Handling and treatment strategies of biomedical wastes and biosolids contaminated with SARS-CoV-2 in waste environment. In *Environmental and Health Management of Novel Coronavirus Disease (COVID-19)* ). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85780-2.00012-3>

- Lee, C. C., & Huffman, G. L. (1989). Incineration of solid waste. *Environmental Progress*, 8(3), 143–151. <https://doi.org/10.1002/ep.3300080312>
- Lee, C. C., & Huffman, G. L. (1996). Medical waste management/incineration. *Journal of Hazardous Materials*, 48(1–3), 1–30. [https://doi.org/10.1016/0304-3894\(95\)00153-0](https://doi.org/10.1016/0304-3894(95)00153-0)
- Ministerio del Ambiente y Agua de la República del Ecuador. (2021). Propuesta para la Norma de Incineración de Desechos. *Dirección de Sustancias Químicas, Residuos, Desechos Peligrosos y No Peligrosos*, 9, 1–71.
- Ministerio del Medio Ambiente de la Republica de Chile. (2007). *Norma de emisión para incineración*. Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile/BCN. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1054148>
- Mohamed, F. M. (2015). *Tesis Doctoral: Evaluación de los Impactos ambientales de una incineradora de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía mediante el análisis de ciclo de vida*. [http://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/11922/TD\\_MIMUN\\_MOHAMED\\_Fauzi.pdf?sequence=1](http://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/11922/TD_MIMUN_MOHAMED_Fauzi.pdf?sequence=1)
- Moharir, R. V., Gautam, P., & Kumar, S. (2019). Waste Treatment Processes for Energy Generation. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00004-X>
- Niessen, W. R. (1991). *Combustion and incineration processes* (C. Press (ed.); Fourth edi).
- Patumsawad, S., & Cliffe, K. R. (2002). Experimental study on fluidised bed combustion of high moisture municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, 43(17), 2329–2340. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00179-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00179-0)
- Periche, E. L. C. (2019). Evaluación del proceso de Incineración de residuos sólidos hospitalarios peligrosos de la provincia de Lima. *Universidad Nacional Federico Villarreal*.
- Prakash, S. S. & V. (2007). Toxic Environmental Releases from Medical Waste

- Incineration: A Review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132(1–3), 67–81. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9503-3>
- Rickman, W. S. (1991). *Handbook of Incineration of Hazardous Wastes*.
- Romero, E. Á. (2017). Estudio de prefactibilidad para la ampliación y mejoramiento de la planta de tratamiento térmico en una empresa de gestión de residuos industriales. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 140.
- Santoleri, J. J. (2003). Hazardous waste incineration research. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, 7(1), 223–244. [https://doi.org/10.1016/0191-815x\(87\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0191-815x(87)90036-2)
- Saxena, S. C., & Jotshi, C. K. (1994). Fluidized-bed incineration of waste materials. *Pergamon*, 20, 281–324.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales México. (2004). Nom-098-Semarnat-2002, Protección Ambiental-Incineración De Residuos, Especificaciones De Operación Y Límites De Emisión De Contaminantes. *Diario Oficial de La Federación*, 10, 10–36. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- Swithenbank, J., Nassezadeh, V., Goh, R., & Siddall, R. G. (1999). Fundamental principles of incineration design. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, 7(5), 623–640. <https://doi.org/10.1002/apj.5500070514>
- Testo, A. (2018). Tecnología de análisis de gases (1). *Academia Testo Argentina SA*. <http://www.academiatesto.com.ar/cms/tecnologia-de-analisis-de-gases-1>
- Tillman, D. A. (1991). The Combustion of Solid Fuels and Wastes. In *The Combustion of Solid Fuels and Wastes*.
- Tillman, D. A., Rossi, A. J., & Vick, K. M. (1989). Fundamentals of Municipal Solid Waste Combustion. *Incineration of Municipal and Hazardous Solid Wastes*, 19–58. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-691245-6.50006-7>
- W.E.Lee, M. I. O. (2014). *Treatment of Radioactive Wastes*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099392-8.00014-0>

- Wahid, S. S. (2013). Operation and performance testing of the hazardous (biomedical) waste incineration plant for hospitals. *International Journal of Applied Engineering Research and Development (IJAERD)*, 3(1), 11–24. [http://www.tjprc.org/view\\_archives.php?year=2013&jtype=2&id=1&details=archives](http://www.tjprc.org/view_archives.php?year=2013&jtype=2&id=1&details=archives)
- Wikström, E., Tysklind, M., & Marklund, S. (1999). Influence of variation in combustion conditions on the primary formation of chlorinated organic micropollutants during municipal solid waste combustion. *Environmental Science and Technology*, 33(23), 4263–4269. <https://doi.org/10.1021/es990568b>
- World Health Organisation, Emmanuel, J., Pieper, U., Rushbrook, P., Stringer, R., Townend, W., Wilburn, S., & Zghondi, R. (2014). *Safe management of wastes from health-care activities*. 329. [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/85349/1/9789241548564\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/85349/1/9789241548564_eng.pdf)

## ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles serán las condiciones óptimas de operación de un incinerador, para la mejora de su eficiencia, en la empresa Incineragas EIRL?	Determinar las condiciones óptimas de operación de un incinerador, para la mejora de su eficiencia, en la empresa Incineragas EIRL	Optimizando las condiciones de operación del incinerador (Cantidad de residuos alimentados, la temperatura de cámaras de combustión y temperatura de la cámara de postcombustión), entonces se logrará una mejora en la eficiencia de combustión.	$Y_1 =$ Condiciones óptimas de operación del incinerador	- Cantidad de residuos - Temperaturas de las cámaras del incinerador	- Kg/lote - °C	Pruebas experimentales y diseño estadístico Box-Behnken
<b>ESPECÍFICO</b>	<b>ESPECÍFICO</b>	<b>ESPECÍFICO</b>	<b>INDEPENDIENTES</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>
¿Cuáles serán los factores significativos del incinerador, que influyen en la eficiencia de combustión?	Determinar los factores significativos del incinerador, que influyen en la eficiencia de combustión	Los factores significativos del incinerador, que influyen en la eficiencia de combustión son: los residuos alimentados y la temperaturas de las cámaras del incinerador	$X_1=$ Cantidad de residuos alimentación	- Cantidad de residuos	- Kg/lote	Medición con Balanza electrónica
			$X_2=$ Temperatura de la cámara de combustión	- Temperatura	- °C	Medición con Sensor de temperatura tipo k
			$X_3=$ Temperatura de la cámara de postcombustión	- Temperatura	- °C	Medición con Sensor de temperatura tipo k
¿Cuál será el porcentaje de eficiencia de combustión del incinerador en sus condiciones óptimas de operación?	Determinar el porcentaje de eficiencia de combustión del incinerador en sus condiciones óptimas	Mediante la optimización de las condiciones de operación del incinerador, se logrará la eficiencia de combustión mayor a 99%	$X_4=$ Eficiencia de Combustión	- Concentración del monóxido de carbono y el dióxido de carbono	- %CE	Método Instrumental vía Celda Electroquímica
¿Cuáles serán las concentraciones de los gases de combustión, del incinerador, en sus condiciones óptimas?	Determinar las concentraciones de los gases de combustión, del incinerador, en sus condiciones óptimas	Mediante la optimización de las condiciones del incinerador, las concentraciones de los gases de combustión por debajo de los límites máximos permisibles.	$X_5 =$ Concentración de los gases de combustión	- Monóxido de carbono - dióxido de carbono - Oxido nitrosos - Dióxido de azufre	- mg/m <sup>3</sup>	
<b><math>Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4)</math></b>						

## ANEXO 2: INFORME DE ENSAYO.



LABORATORIO DE ENSAYO  
ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO DE  
ACREDITACION INACAL-DA  
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

### INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-8224

#### I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL : G Y J CONSULTING ASOCIADOS E.I.R.L. - G Y J CONSULTING E.I.R.L  
2.-DIRECCIÓN : CAL.TUMBES NRO. 3956 URB. PERU (CDRA 39 DE LA AV. PERU) LIMA - LIMA - SAN MARTIN DE PORRES  
3.-PROYECTO : MONITOREO AMBIENTAL PRIMER SEMESTRE DE LA PLANTA DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS  
4.-PROCEDENCIA : INDUSTRIALES Y HOSPITALARIOS - INCINERAGAS E.I.R.L.  
5.-SOLICITANTE : LURÍN  
6.-ORDEN DE SERVICIO N° : G Y J CONSULTING ASOCIADOS E.I.R.L. - G Y J CONSULTING E.I.R.L  
: 000003164-2021-0001  
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : P-OPE-1 MUESTREO  
8.-MUESTREADO POR : ANALYTICAL LABORATORY E.I.R.L.  
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2021-08-04

#### II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO : Emisiones  
2.-NÚMERO DE MUESTRAS : 1  
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA : 2021-07-08  
4.-PERÍODO DE ENSAYO : 2021-07-08 al 2021-08-04

**Gaby Moreno Muñoz**  
Jefe de Laboratorio  
CIP N° 191207

**Marco Valencia Huerta**  
Ingeniero Químico  
CIP N° 152207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.  
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R. L  
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-8224**

**III. MÉTODOS Y REFERENCIAS**

TIPO DE ENSAYO	NORMAL REFERENCIA	TÍTULO
CTM 034 <sup>2 (c)</sup>	CTM-034 - 1999	Draft Method for the Determination of O <sub>2</sub> , CO, & (NO and NO <sub>2</sub> ) for Periodic Monitoring
Dióxido de Azufre <sup>(*) (c)</sup>	EPA-40 CFR, Appendix A-4 to Part 60. Method 6C.-2017	DETERMINATION OF SULFUR DIOXIDE EMISSIONS FROM STATIONARY
Hidrocarburos Totales(HT)-Emisiones-Rev. 0 <sup>(**) (c)</sup>	CTM-022 / CTM-030-1997	Determination of Nitric Oxide, Nitrogen Dioxide and NO <sub>x</sub> Emissions from Stationary Combustion Sources by Electrochemical Analyzer. / Determination of Nitrogen Oxides, Carbon Monoxide, and Oxygen Emissions from Natural Gas-Fired Engines, Boilers and Process Heaters using Portable Analyzers.
Material Particulado Calculo <sup>(***) (c)</sup>	EPA AP-42	Material Particulado

"EPA" : U. S. Environmental Protection Agency. Methods for Chemicals Analysis

"CTM" : Conditional Test Method

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

<sup>2</sup> Ensayo acreditado por el IAS

(\*\*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

<sup>c</sup> Ensayo realizado en campo (medido in situ)

**INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-8224**
**IV. RESULTADOS**

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-21-28267
CÓDIGO DEL CLIENTE:				EM-01
COORDENADAS:				E:0300051
UTM WGS 84:				N:8639220
PRODUCTO:				EMISIONES
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				I-OPE-1.3
INICIO DE MUESTREO (FECHA y HORA):				08-07-2021 13.00
FIN DE MUESTREO (FECHA y HORA):				08-07-2021 14.00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Dióxido de Azufre (*)	mg/m3	NA	2,9	<2,9
Hidrocarburos Totales(HT)-Emisiones-Rev.0 (**)	mg/m3	NA	0,000001	0,730000
Material Particulado Calculo (**)	mg/m3	NA	NA	0,001700
<b>CTM 034 <sup>2</sup></b>				
Dioxido de Carbono	%	NA	1,14	5,69
Dióxido de Nitrógeno	mg/Nm3	NA	0,01	1,64
Eficiencia	%	NA	0,10	89,26
Exceso de Aire	%	NA	0,10	93,41
Flujo másico	Kg/h	NA	0,10	<0,10
Monóxido de Carbono	mg/Nm3	NA	0,19	32,93
Monoxido de Nitrógeno	mg/Nm3	NA	0,01	26,35
Oxidos de Nitrógeno	mg/Nm3	NA	0,01	27,99
Oxígeno	%	NA	0,01	10,76
Temperatura Ambiente	(°C)	NA	1,88	22,10
Temperatura de gases	°K	NA	1,23	313,45
Tiempo de emisión	h/d	NA	0,01	24,00
Velocidad	m/s	NA	NA	1,70

(\*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(\*\*) El Ensayo indicado no ha sido acreditado

<sup>2</sup> Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

"-": No ensayado

NA: No Aplica

**"FIN DE DOCUMENTO"**

### ANEXO 3. ANÁLISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN

