

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Estudio de tratamientos secundarios de reducción de NO_x para la implementación en un generador termoeléctrico.

Juan Pablo Pérez Cruz

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Químico.

QUITO, JULIO 2009

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Estudio de tratamientos secundarios de reducción de NOx para la
implementación en un generador termoeléctrico.**

JUAN PABLO PÉREZ CRUZ

Marcelo Albuja, M.Sc.
Director de Tesis

.....

Dr.- Ing. Daniela Almeida
Miembro del Comité de Tesis

.....

Carlos Fabara, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

.....

Gustavo Muñoz, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

.....

Fernando Romo, M.Sc.
Decano del Colegio Politécnico

.....

QUITO, JULIO 2009

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas por su apoyo durante toda mi carrera.

AGRADECIMIENTOS

A Marcelo Albuja por su dirección y asistencia en el desarrollo del presente proyecto.

A Daniela Almeida, Carlos Fabara y Gustavo Muñoz, por su excelente instrucción académica.

A los profesores de la Escuela Politécnica Nacional: Oscar Duran, Ricardo Muñoz, Mario Sánchez y Luis Mera por los valiosos conocimientos impartidos.

RESUMEN

Existen varios tratamientos de reducción de NO_x , sin embargo para su selección se deben considerar los efectos no deseados, condiciones de operación del motor, condiciones de salida del gas, eficiencia, costos, etc. Los principales tratamientos y de mayor eficiencia se centran en los siguientes mecanismos: reducción catalítica selectiva, reducción no catalítica y oxidación para posterior absorción. Este tipo de tratamientos se los conoce como secundarios, por realizarse después de la combustión y son de alta eficiencia en la industria.

El presente proyecto busca implementar un tratamiento de reducción de NO_x para un generador termoeléctrico de 500 kilovatios de potencia. Inicialmente, se realizó un monitoreo de las emisiones del generador, para así conocer las condiciones y características del gas de escape; información que será necesaria para la selección del tratamiento correcto a implementar y posterior diseño del mismo.

Se realizó un estudio completo de los tratamientos secundarios existentes para la reducción de NO_x en emisiones de fuentes fijas de combustión; donde se analizaron aspectos como: condiciones de operación, reactivos utilizados, mecanismo de los procesos, eficiencias, etc; con esta información y los datos experimentales obtenidos anteriormente; se seleccionó el proceso más óptimo a implementarse en el generador.

Finalmente, se procedió a aplicar el tratamiento seleccionado, al generador en estudio, para lo cual se diseñaron equipos acordes a las condiciones de salida del gas. Los resultados obtenidos de los cálculos ofrecen un 85 % de recuperación de NO_x .

ABSTRACT

There are several treatments for NO_x reduction; however some aspects like: secondary effects, motor operation conditions, gas exhaust, efficiency, costs, etc, must be considered before a selection can be taken. The main and most efficient treatments are resumed in the following methods: selective catalitic reduction, selective non catalitic reduction and oxidation for further absorption. These types of treatments are known as secondary treatments, because they are installed after the combustion, and are widely applied in the industry.

The objective of this project is to implement a reduction treatment of NO_x for a thermoelectric generator of 500 kilowatts. Initially, the generator emissions have been monitored, in order to have a better knowledge of the conditions and characteristics of the gas emissions. This data will be necessary to design the correct treatment.

A complete study of the available secondary treatments in emissions of fixed sources of combustion for the reduction of NO_x has been done. The aspects covered by this analysis were: operation conditions, reactive used, processes methods, efficiencies, etc. with these information and resulting data of the experiment, the most suitable process to be applied in the generator has been chosen.

Finally, once the treatment was selected, it was applied to the generator chosen in this study. For this a special equipment in accordance to the conditions of the gas exhaust was designed. Calculations show a recuperation of 85 % NO_x .

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION -----	1
CAPITULO 1 -----	2
1.-FUNDAMENTOS TEORICOS:-----	2
1.1.- GENERADORES ELECTRICOS:-----	2
1.1.1.- CLASIFICACION:-----	2
1.1.2.-FUNCIONAMIENTO: -----	3
1.2.-MOTORES DIESEL:-----	3
1.2.1.- CLASIFICACION:-----	4
1.2.2.- MOTORES DIESEL Y ENERGIA ELECTRICA: -----	5
1.2.3.- COMBUSTIBLE PARA MOTORES DIESEL: -----	5
1.2.3.1- REQUISITOS TECNICOS DEL DIESEL 2: -----	7
1.3.- PROCESO DE COMBUSTION: -----	8
1.3.1.- COMBUSTION EN MOTORES DIESEL -----	9
1.3.2.- FACTORES INCIDENTES EN LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION -----	10
1.3.3.- FORMACION DE NO_x :-----	11
1.3.4.- COMPOSICION Y PROPIEDADES DE LAS EMISIONES:-----	12
HOLLIN:-----	12
1.4.-TRATAMIENTOS DE LOS GASES DE SALIDA DE LA CHIMENEA: -----	18
1.4.1.-PROCESO SCR (Selective Catalytic Reduction):-----	18
1.4.2.-PROCESO SNCR (Selective Noncatalytic Reduction): -----	21
1.4.3.-PROCESOS DE OXIDACION: -----	21
1.4.4.-CUADRO COMPARATIVO DE TRATAMIENTOS:-----	22
1.5.- VALORES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTION: -----	23
1.5.1.- REQUISITOS Y METODOS DE MEDICION DE EMISIONES DESDE FUENTES FIJAS DE COMBUSTION-----	24
CAPITULO 2 -----	27
2.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO:-----	27
2.1.- GENERADOR TERMOELECTRICO DETROIT DIESEL:-----	27
2.2.- MEDICIONES DE LAS EMISIONES DEL GENERADOR TERMOELECTRICO DETROIT DIESEL:-----	29
2.3.- EVALUACION DE DATOS OBTENIDOS: -----	31

2.4.- SELECCION DEL TRATAMIENTO A IMPLEMENTAR: -----	36
CAPITULO 3 -----	38
3.- CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL TRATAMIENTO: -----	38
3.1.- OZONIFICACION: -----	38
3.2.- REDUCCION DE TEMPERATURA:-----	38
3.3.-ABSORCION DEL DIOXIDO DE NITROGENO: -----	38
3.3.1.-ABSORCION GASEOSA:-----	39
3.3.2.-ABSORCION DE GASES COMO METODO DE CONTROL DE CONTAMINACION:--	39
3.3.3.-EQUILIBRIO LIQUIDO-GAS: -----	39
3.3.4.-SOLUBILIDAD EN EL EQUILIBRIO: -----	40
3.3.5.-EQUILIBRIO EN SOLUCIONES IDEALES:-----	41
3.3.6.-SOLUBILIDADES EN SISTEMAS MULTICOMPONENTES:-----	43
3.3.7.-COLUMNAS DE ABSORCION:-----	43
3.3.7.1.-DISEÑO DE COLUMNAS DE ABSORCION: -----	45
3.3.7.2.-CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO:-----	45
3.3.7.3.-PROCESO DE DISEÑO:-----	46
3.3.7.4.-BALANCES DE MASA Y ENERGIA:-----	48
3.3.7.5.-FACTOR DE ABSORCION:-----	51
3.3.7.6.-METODO DE CÁLCULO PARA ABSORCION MULTICOMPONENTE: -----	52
3.3.7.7.-METODO DE EDMISTER:-----	52
3.3.7.8.- PROCEDIMIENTO METODO DE EDMISTER: -----	54
3.3.7.9.- DIAMETRO DE LA COLUMNA: -----	55
3.3.7.9.- ALTURA DE LA COLUMNA:-----	56
CAPITULO 4 -----	59
4.- CALCULOS Y DISEÑO DEL TRATAMIENTO: -----	59
4.1.- DISEÑO DE LA ZONA DE REACCION:-----	59
4.2.- DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR: -----	68
4.3.- DISEÑO DE LA COLUMNA: -----	80
4.3.1.- CALCULO DEL NÚMERO DE PLATOS TEORICOS: -----	80
4.3.2.- CALCULO DEL DIAMETRO DE LA COLUMNA:-----	90
4.3.3.- CALCULO DE LA ALTURA DE COLUMNA:-----	92
4.3.4.- CARACTERISTICAS DE LA COLUMNA: -----	94

CAPITULO 5	95
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFIA	97
ANEXOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO A	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO B	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO C	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO D	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO E	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO F	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

LISTA DE TABLAS

1.1 REQUISITOS TECNICOS DEL DIESEL 2. (11).-----	8
1.2 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL DIOXIDO DE AZUFRE. -----	13
1.3 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL MONOXIDO DE CARBONO. -----	14
1.4 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL OXIDO NITRICO. -----	15
1.5 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL DIOXIDO DE NITROGENO.-----	16
1.6 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL DIOXIDO DE CARBONO. -----	17
1.7 CUADRO COMPARATIVO DE TRATAMIENTOS.-----	23
1.8 VALORES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTION (A CONDICIONES NORMALES). (DMA)-----	24
2.1 CARACTERISTICAS DEL GENERADOR TERMoeLECTRICO DETROIT DIESEL. -----	28
2.2 CARACTERISTICAS ADICIONALES DEL GENERADOR TERMoeLECTRICO DETROIT DIESEL.-----	29
2.3 MEDICIONES DE LAS EMISIONES DEL GENERADOR TERMoeLECTRICO DETROIT DIESEL.-----	30
2.4 CONCENTRACIONES Y PORCENTAJES VOLUMETRICOS -----	31
PROMEDIO GAS DE ESCAPE -----	31
2.5 CONCENTRACION DE COMPONENTES DEL GAS DE ESCAPE EN BASE HUMEDA. -----	34
2.6 FLUJOS MOLARES Y MASICOS DE LOS COMPONENTES DEL GAS DE ESCAPE. -----	36
4.1 CONVERSION DEL OXIDO NITRICO $[O_3]_o = [NO]_o$.-----	64
4.2 CONVERSION DEL OXIDO NITRICO $[O_3]_o = 0.9[NO]_o$. -----	65
4.3 CONVERSION DEL OXIDO NITRICO $[O_3]_o = 0.8[NO]_o$. -----	66
4.4 FLUJOS Y CONCENTRACIONES DE COMPONENTES DE GASES DE ESCAPE -----	68
4.5 CARACTERISTICAS DE TUBOS INTERNOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.-----	69
4.6 PROPIEDADES DEL FLUIDO FRIO (AGUA).-----	69

4.7 PROPIEDADES DEL FLUIDO CALIENTE (GAS DE ESCAPE). -----70

4.8 CARACTERISTICAS FINALES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR. -----78

4.9 CARACTERISTICAS DE LOS TUBOS INTERNOS DEL -----79

4.10 COMPOSICION DEL GAS DE ENTRADA A LA COLUMNA. -----81

4.11 COMPOSICIONPRELIMINAR DEL FLUJO DE GAS Y LIQUIDO DE SALIDA DE LA COLUMNA.-----83

4.12 FLUJOS PRELIMINARES DE LIQUIDO Y GAS DE CADA PLATO. -----84

4.13 PERFIL DE TEMPERATURA DE LA COLUMNA PREELIMINAR. -----84

4.14 CONSTANTES DE EQUILIBRIO Y COEFICIENTES DE ABSORCION -----85

4.15 FRACCIONES DE RECUPERACION PREELIMINARES.-----85

4.16 RESULTADOS FINALES DE COEFICIENTES DE ABSORCION Y FRACCIONES RECUPERADAS PARA $L_s/G_s = 1.6$. -----86

4.17 RESULTADOS FINALES DE FLUJOS DE LIQUIDO Y VAPOR EN CADA PLATO PARA $L_s/G_s = 1.6$. -----87

4.18 RESULTADOS FINALES DE FLUJOS DE LIQUIDO Y VAPOR EN CADA PLATO PARA $L_s/G_s = 1.75$ -----87

4.19 FRACCIONES DE RECUPERACION Y COEFICIENTES DE ABSORCION FINALES PARA $L_s/G_s = 1.75$ -----88

4.20 RESULTADOS FINALES DE FLUJOS DE LIQUIDO Y VAPOR EN CADA PLATO $L_s/G_s = 2.5$ -----89

4.21 FRACCIONES DE RECUPERACION Y COEFICIENTES DE ABSORCION

FINALES	$L_s/G_s = 2.5$	-----	90
----------------	-----------------	-------	-----------

4.22	CARACTERISTICAS DE LA COLUMNA DE ABSORCION.	-----	94
-------------	--	-------	-----------

LISTA DE FIGURAS

2.1 DUCTO DE SALIDA DEL GENERADOR DETROIT DIESEL. -----	27
3.1 GRAFICO DE COLUMNAS DE ABSORCION. -----	44
3.2 BALANCE DE MASA Y ENERGIA EN UNA COLUMNA DE ABSORCION. -----	48
4.1 GRAFICO CONVERSION OXIDO NITRICO VS TIEMPO $[O_3]_o = [NO]_o$. -----	65
4.2 GRAFICO CONVERSION OXIDO NITRICO VS TIEMPO $[O_3]_o = 0.9[NO]_o$. -----	66
4.3 GRAFICO CONVERSION OXIDO NITRICO VS TIEMPO $[O_3]_o = 0.8[NO]_o$. -----	67
4.4 VARIABLES DEL PROCESO DE ABSORCION. -----	80

INTRODUCCION

La cantidad y clase de contaminantes que se generen en los motores diesel, dependen fundamentalmente de las condiciones de operación en las que trabaje el motor, tales como: cantidad de ingreso de aire, carga de combustible, etc; además de las condiciones que se presenten dentro de la cámara de combustión, como son: tiempo de ignición, duración de la combustión, presión, temperatura, etc. Dependiendo de los factores antes mencionados se formaran específicamente NO_x que posteriormente saldrán por los gases de escape del motor.

En la actualidad se afrontan graves problemas de contaminación por NO_x debido al gran número de fuentes fijas de combustión que están en funcionamiento, las cuales son una de las mayores responsables de este tipo de contaminación. Frente a estos problemas, se han desarrollado varios métodos de tratamiento cuyo objetivo es reducir o eliminar la emisión de dichos contaminantes, siendo los tratamientos de mayor eficiencia los llamados: tratamientos secundarios.

La implementación de dichos métodos de tratamiento dependerá fundamentalmente del contaminante que se desee reducir o eliminar; de las características del gas de salida (temperatura, flujo, concentración de los contaminantes, etc) y del tipo de generador. En este proyecto se busca implementar un sistema de reducción de NO_x , para un generador termoeléctrico utilizado en la Universidad San Francisco de Quito, de 500 kilovatios de potencia y que utiliza diesel como combustible.

Para realizar dicha implementación se monitoreo el gas de escape del generador, para así conocer sus condiciones de salida y así poder seleccionar el método adecuado de tratamiento y posterior diseño del mismo.

CAPITULO 1

1.-FUNDAMENTOS TEORICOS:

1.1.- GENERADORES ELECTRICOS:

Un generador eléctrico se lo puede definir como un equipo que se encarga de mantener y generar un potencial eléctrico entre sus terminales. Los generadores eléctricos tienen la propiedad de transformar energía mecánica en eléctrica, para lo cual estos generan un campo magnético, el cual es responsable de generar fuerzas llamadas, electromotrices (FEM), las cuales actuarán sobre sus conductores eléctricos. Estas fuerzas electromotrices se las cataloga como el trabajo que hace el generador para mover las cargas de un polo a otro.¹

1.1.1.- CLASIFICACION: Se tienen dos tipos de generadores:

- Primarios
- Secundarios

Primarios: Se caracterizan por transformar en energía eléctrica, alguna otra forma de energía que tienen o reciben inicialmente.²

Secundarios: Se caracterizan por entregar una parte de energía eléctrica que han recibido inicialmente.³

¹ www.maquinariapro.com

² www.maquinariapro.com

³ www.maquinariapro.com

1.1.2.-FUNCIONAMIENTO:

Los generadores eléctricos transforman energía mecánica en eléctrica, para lo cual cuentan con una bobina que está conformada por un núcleo de hierro envuelto con un cable conductor, y todo esto rodeado de un gran imán. El motor se encarga de mover la bobina, con lo cual el campo magnético generado por el imán comenzará su trabajo, el cual consiste en mover los electrones presentes en el conductor mediante las fuerzas magnéticas generadas por este, y así generar corriente eléctrica.

1.2.-MOTORES DIESEL:

Los motores Diesel presentan las siguientes características:

- Son motores de combustión interna, es decir la combustión se lleva a cabo dentro de los cilindros del motor. La mayoría de los motores Diesel son motores de cuatro tiempos, es decir el pistón realiza una carrera de aspiración, una de compresión, una motriz y una de escape.⁴
- Carecen de bujías, lo que quiere decir que no es necesario una bobina que produzca corriente para el encendido, este se enciende por el simple contacto de aire caliente y combustible a grandes presiones.⁵
- No mezclan el aire y el combustible dentro de sus cilindros, sino que primero aspiran el aire, lo comprimen y luego ingresa el combustible para que se inicie la combustión.⁶

⁴ Kates J. Edgar.

⁵ Kates J. Edgar.

⁶ Kates J. Edgar.

- En cuanto a la compresión, es mucho más alta que un motor a gasolina, ya que este solamente comprime al aire y así se evitan problemas de preencendido. En los motores diesel la compresión no se ve limitada por el preencendido, lo que da una relación de compresión de 16 a 1, a diferencia de los motores a gasolina en los cuales la relación de compresión es de 9 a 1, lo que quiere decir que los motores a diesel obtienen un mayor rendimiento del combustible.⁷
- Se caracterizan por transformar energía química en energía mecánica. Esta energía química la obtienen del combustible que se esté empleando, en este caso el diesel. En el interior del motor, el combustible que es inyectado a presión se mezcla con el aire entrante, para que así se genere la combustión del mismo.⁸
- Finalmente, los motores Diesel poseen una bomba de inyección para el combustible, la cual ingresa el combustible al cilindro en forma pulverizada.⁹

1.2.1.- CLASIFICACION:

Esta clasificación es en base al funcionamiento del motor, y es la siguiente:

Motores de cuatro tiempos: Los motores de cuatro tiempos se caracterizan por necesitar de cuatro carreras del pistón para completar un ciclo completo, es decir: admisión, compresión, combustión y escape. Por cada ciclo completo, el cigüeñal realiza dos carreras, así, se necesitan dos revoluciones para completar un ciclo y hay una sola carrera motriz por cada dos vueltas del cigüeñal.¹⁰

⁷ Kates J. Edgar.

⁸ Kates J. Edgar.

⁹ Kates J. Edgar.

¹⁰ Kates J. Edgar.

Motores de dos tiempos: Los motores de dos tiempos se caracterizan por completar un ciclo con únicamente dos carreras del pistón, lo que quiere decir que se necesita una sola vuelta del cigüeñal y por tanto producirá el doble de carreras motrices que el motor de cuatro tiempos, lo que hace a este motor más eficiente.

En una forma más clara, las dos carreras básicas en un motor diesel, son las de combustión y compresión, las otras dos se las considera como perdida ya que únicamente actúan como una bomba de aire, esta es la razón por la cual los motores de dos tiempos son mas eficientes. Para esto los motores de dos tiempos constan de una bomba de aire independiente, que aspira el aire de la atmósfera y lo comprime en cada cilindro.¹¹

1.2.2.- MOTORES DIESEL Y ENERGIA ELECTRICA:

Los motores Diesel son utilizados en una gran cantidad de centrales eléctricas, debido a que presentan grandes ventajas, como son las siguientes:

- Ahorro en el gasto de combustible.
- Independencia de un suministro de agua
- Poco peso y espacio reducido
- Ausencia de peligro de incendio
- Capacidad para arrancar rápidamente

1.2.3.- COMBUSTIBLE PARA MOTORES DIESEL:

Los combustibles para motores diesel generalmente provienen del fraccionamiento de aceites pesados, es por esto también que a estos motores también se los conoce como motores de aceite pesado, en el caso del generador en estudio se emplea el Diesel 2.

¹¹ Kates J. Edgar.

El funcionamiento de un motor diesel, va a depender fuertemente de las propiedades que tenga el combustible que se este empleando, de ahí la importancia de hacer una selección minuciosa para tener el máximo rendimiento de nuestro motor, para esto se tienen que analizar detalladamente las características del combustible.¹² Generalmente las características que tienen mayor importancia son las siguientes:

- 1) Calidad de encendido
- 2) Poder calorífico
- 3) Volatilidad
- 4) Punto de inflamabilidad
- 5) Viscosidad
- 6) Contenido de azufre
- 7) Densidad específica

Calidad de encendido: Esta propiedad se refiere a la capacidad que tiene un combustible de auto encenderse, es decir hablamos de un punto de ignición, con lo cual un combustible tiene una buena calidad de encendido si es capaz de auto encenderse sin necesidad de tener altas temperaturas. Una buena calidad de encendido nos significa en el motor una mayor facilidad de arranque y menor detonación. Cabe mencionar que el índice de cetano es una medida de la calidad de encendido, en base a esto elegimos el combustible.¹³

Poder Calorífico: Esta propiedad se refiere a la cantidad de energía que posee un combustible y en base a esto el motor va a generar una cantidad de trabajo determinada.¹⁴

Volatilidad: El grado de volatilidad se refiere a la facilidad de un combustible de pasar del estado líquido a vapor, un alto grado de volatilidad se traduce en un menor consumo de combustible y en una menor cantidad de emisiones.¹⁵

¹² Kates J. Edgar.

¹³ Kates J. Edgar.

¹⁴ Kates J. Edgar.

¹⁵ Kates J. Edgar.

Punto de inflamabilidad: Esta propiedad se refiere a la temperatura mas baja a la cual un combustible produce vapores inflamables, un bajo punto de inflamabilidad tiene una baja calidad de autoencendido.¹⁶

Viscosidad: Esta propiedad se refiere a la resistencia que tiene una sustancia a fluir, en lo que se refiere a la influencia de esta propiedad en un motor, un combustible con baja viscosidad nos da un alto pulverizado de combustible al ingresar al pistón, lo que favorece la combustión.
17

Densidad especifica: Esta propiedad es importante en el sentido de que hay una relación directa con el poder calorífico, una alta densidad representa un bajo poder calorífico.¹⁸

1.2.3.1- REQUISITOS TECNICOS DEL DIESEL 2:

Los requisitos impuestos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización en relación a las propiedades del Diesel 2 son las siguientes:

¹⁶ Kates J. Edgar.

¹⁷ Kates J. Edgar.

¹⁸ Kates J. Edgar.

1.1 REQUISITOS TECNICOS DEL DIESEL 2. (11).

REQUISITOS	UNIDAD	MINIMO	MAXIMO	METODO DE ENSAYO
Punto de inflamación.	°C	51	-	NTE INEN 1047
Agua y sedimento.	% en volumen	-	0,05	NTE INEN 1494
Residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación.	% en peso	-	0,15	NTE INEN 1491
Cenizas.	% en peso	-	0,01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%.	°C		360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 37.8 C	cSt	2,5	6,0	NTE INEN 810
Azufre.	% en peso	-	0,7	NTE INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre.	-	-	No. 3	NTE INEN 927
Índice de cetano.	-	45	-	NTE INEN 1495

1.3.- PROCESO DE COMBUSTION:

La combustión se la define como una reacción termoquímica entre el oxígeno del aire y un combustible, cuyos productos son dióxido de carbono y agua; pero en la realidad se

forman otros productos contaminantes que salen junto con el dióxido de carbono y agua a la atmósfera.¹⁹

El proceso de combustión ocurre rápidamente, en un orden de milisegundos, para que este sea eficiente deben ocurrir dos eventos:

- Inyección del combustible en estado gaseoso.
- Buena mezcla entre el aire y el combustible.

Seguidamente, la ignición del combustible se la realiza si en la cámara de combustión se cumplen las condiciones que a continuación se mencionan:

- Gotas del combustible finamente formadas.
- Suficiente cantidad de oxígeno
- Temperatura adecuada

De no cumplirse estas condiciones, el combustible se quemara parcialmente y dará lugar a la formación de residuos carbonosos y mayor cantidad de compuestos contaminantes.²⁰

1.3.1.- COMBUSTION EN MOTORES DIESEL

El combustible es inyectado a la cámara de combustión en forma de gotas pequeñas (spray), en una atmósfera de aire a elevada temperatura y presión (final del periodo de compresión), donde la temperatura del aire esta sobre la temperatura de ignición del combustible, por lo que la ignición ocurre en una forma muy rápida, sin embargo hay un periodo de tiempo en el cual parte del combustible se evapora y se mezcla con el aire,

¹⁹ Jachiyán A.S.

²⁰ Jachiyán A.S.

provocando reacciones paralelas; por esto es importante que el tiempo de ignición sea muy corto y el combustible se auto inflame fácilmente (índice de cetano).²¹

Cabe mencionar que en el momento de la inyección del combustible se da lugar a la formación de dos zonas: una rica y una pobre. Las zonas ricas se caracterizan por tener una mayor cantidad de combustible y por esto son responsables de formar mayor cantidad de monóxido de carbono, hidrocarburos no combustionados y residuos carbonosos.

Por otro lado, en las zonas pobres se generan mayor cantidad de NO_x , debido a la menor presencia de combustible, sin embargo cabe recalcar que los hidrocarburos no combustionados y el monóxido de carbono generado en las zonas ricas generalmente se queman en las zonas pobres.²²

A continuación, ocurre el proceso de combustión, que se define como el tiempo que transcurre en quemarse del 10 al 90 por ciento de la fracción de masa.

El combustible se va quemando según se va inyectando en la cámara de combustión, para lo cual el combustible se va rompiendo, por la alta temperatura y va reaccionando con el aire que ingresa.²³

1.3.2.- FACTORES INCIDENTES EN LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION

Dependiendo de cómo se desarrolle el proceso de combustión dentro de los cilindros de cada motor se obtendrán en mayor o menor cantidad cierto tipo de contaminantes, así

- Baja temperatura y presión: Estas condiciones de operación favorecerán la presencia de hidrocarburos no combustionados y monóxido de carbono en las emisiones de salida

²¹ Jachiyán A.S.

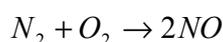
²² Jachiyán A.S.

²³ Jachiyán A.S.

del motor, ya que no hay la suficiente temperatura para que se realice la ignición del combustible y por tanto saldrá sin combustionarse.²⁴

- Alta temperatura y presión: Estas condiciones de operación favorecerán la formación de NO_x , sobretodo en las zonas pobres, ya que el exceso de oxígeno comienza a reaccionar con el nitrógeno del aire²⁵:

Ec. [1.1]:



- Tiempo de combustión: Si el tiempo de combustión es prolongado favorecerá la disminución de hidrocarburos no combustionados y material particulado.

1.3.3.- FORMACION DE NO_x :

Durante el proceso de combustión se presentan 3 situaciones para la generación de NO_x , y son las siguientes:

- **NO_x combustibles:** Estos NO_x son generados por los combustibles que contienen nitrógeno y resultan de la oxidación del nitrógeno, que está ionizado en el combustible.²⁶
- **NO_x termales:** Este tipo de NO_x es generado por las concentraciones de nitrógeno y oxígeno presentes, además de la temperatura dentro de la cámara.²⁷

²⁴ Jachiyán A.S.

²⁵ Parreno María Lorena.

²⁶ Parreno María Lorena.

²⁷ Parreno María Lorena.

- **NO_x inmediatos:** Son generados por la reacción del nitrógeno del aire con el combustible presente en las zonas ricas, este nitrógeno a su vez se oxida, formando NO_x .²⁸

1.3.4.- COMPOSICION Y PROPIEDADES DE LAS EMISIONES:

HOLLIN:

Las partículas comúnmente conocidas como hollín, constituyen entre el 60 y 80 % de las emisiones que produce el diesel. Estas partículas están constituidas por un núcleo de carbono puro, al cual le rodean sulfatos, agua, hidrocarburos aromáticos, azufre y algunos óxidos metálicos.²⁹

Efectos Ambientales:³⁰

- El hollín absorbe gran cantidad de radiación solar, lo que produce un incremento en la temperatura media de la atmósfera baja.

Efectos en la salud:³¹

- Irritación de ojos y nariz.
- La exposición prolongada puede generar un riesgo de muerte por cáncer de pulmón.

²⁸Parreno Maria Lorena.

²⁹ Enviromental Protection Agency.

³⁰ Enviromental Protection Agency.

³¹ Enviromental Protection Agency.

DIOXIDO DE AZUFRE (SO_2):**Propiedades físicas y químicas:**

1.2 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL DIOXIDO DE AZUFRE.

Masa molecular	$64 \left[\frac{g}{mol} \right]$
Gravedad específica	1.53 a 21 [°C]
Punto de ebullición:	-10 [°C]
Punto de fusión:	-75,5 [°C]
Solubilidad en el agua	112,7[g/l] a 20 [°C]

Datos adicionales:³²

- Es un gas incoloro que posee un olor característico sofocante.
- En condiciones normales de presión y temperatura es capaz de transformarse en anhídrido sulfúrico (SO_3), cabe resaltar que la velocidad de esta reacción es muy baja.
- Forma disoluciones acidas.

Efectos Ambientales:³³

- Es uno de los principales responsables de la lluvia acida, ya que cuando esta presente en la atmósfera es capaz de transformarse en acido sulfúrico.
- Se encuentra presente en la mayoría de combustibles, por tanto se encuentra en grandes cantidades en la atmósfera terrestre.

³² Enviromental Protection Agency.

³³ Enviromental Protection Agency.

Efectos en la salud:³⁴

- Es un gas extremadamente tóxico.
- Ataca principalmente al sistema respiratorio, pulmones, bronquios e irritación del tracto respiratorio.

MONOXIDO DE CARBONO (CO):**Propiedades físicas y químicas:**1.3 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL MONOXIDO DE CARBONO.³⁵

Masa molecular	$28 \left[\frac{g}{mol} \right]$
Punto de ebullición	$-191 [^{\circ}C]$
Punto de fusión	$-205 [^{\circ}C]$
Solubilidad en el agua	$2.3 [ml]$ a $20 [^{\circ}C]$

Datos adicionales:³⁶

- Se caracteriza por ser un gas inodoro, incoloro e inodoro, además de ser muy inflamable.
- Es producido por la combustión incompleta de combustibles a base de hidrocarburos.

³⁴ Enviromental Protection Agency.

³⁵ Perry Robert.

³⁶ Enviromental Protection Agency.

Efectos Ambientales:³⁷

- El monóxido de carbono es una molécula estable que no afecta directamente a la vegetación, pero si a la salud del ser humano.

Efectos en la salud:³⁸

- Es un gas extremadamente tóxico.
- El monóxido de carbono tiene la capacidad de unirse fuertemente a la hemoglobina, que es la encargada de transportar oxígeno a las células y tejidos a través de la sangre, al combinarse con esta, forma carboxihemoglobina, reduciendo así, la oxigenación de nuestro organismo.
- En concentraciones elevadas puede causar la muerte.

OXIDOS DE NITROGENO (NO_x):**Propiedades físicas y químicas:****OXIDO NITRICO: (NO)**1.4 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL OXIDO NITRICO.³⁹

Estado Físico	Gas
Masa molecular	$30 \left[\frac{g}{mol} \right]$
Punto de Fusión	$-164 [^{\circ}C]$
Punto de ebullición	$-152 [^{\circ}C]$
Solubilidad en agua	$67 \left[\frac{mg}{l} \right]$

³⁷ Enviromental Protection Agency.³⁸ Enviromental Protection Agency.³⁹ Perry Robert.

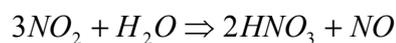
DIOXIDO DE NITROGENO:1.5 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL DIOXIDO DE NITROGENO.⁴⁰

Estado físico	Gas licuado, pardo-rojizo
Masa Molecular	$46 \left[\frac{g}{mol} \right]$
Punto de Fusión	$-9.3 [^{\circ}C]$
Punto de Ebullición	$21 [^{\circ}C]$
Solubilidad en agua	reacciona

Datos adicionales:⁴¹

- Se forman en las combustiones a altas temperaturas y con exceso de oxígeno, al hablar de estos óxidos se puede tener; óxidos nítricos, óxidos nitrosos u dióxido de nitrógeno.
- Tanto el óxido nitroso como el dióxido de nitrógeno no son inflamables.
- El dióxido de nitrógeno es líquido a temperatura ambiente y a temperaturas superiores es un gas rojizo con olor desagradable.
- El dióxido de nitrógeno presenta una alta solubilidad en agua, formando ácido nítrico:

Ec. [1.2]:



⁴⁰ Perry Robert.

⁴¹ Enviromental Protection Agency.

Efectos Ambientales:⁴²

- Son producidos mayormente por la combustión de diesel.
- Son formadores de contaminantes secundarios peligrosos.
- Generan lluvias acidas

Efectos en la salud:⁴³

- Afecta al sistema respiratorio, específicamente a los pulmones.

DIOXIDO DE CARBONO (CO₂):1.6 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL DIOXIDO DE CARBONO.⁴⁴

Masa molecular	44 $\left[\frac{g}{mol} \right]$
Punto de ebullición:	-78 [°C]
Punto de fusión:	-57 [°C]
Solubilidad en el agua	1,45 [Kg/m] a 20 [°C]

Efectos ambientales:

- Pertenece al grupo de gases de efecto invernadero, los cuales contribuyen a que la temperatura de la tierra sea la adecuada para que esta sea habitable, pero un exceso de dióxido de carbono, se ve reflejado en una reducción de emisión de calor al espacio lo cual provoca un mayor calentamiento del planeta.

⁴² Enviromental Protection Agency.

⁴³ Enviromental Protection Agency.

⁴⁴ Robert Perry.

Efectos en la salud:⁴⁵

- Puede causar vómito, náusea e irritación del sistema digestivo.
- Ataca a ojos y piel
- Puede producir asfixia.

1.4.-TRATAMIENTOS DE LOS GASES DE SALIDA DE LA CHIMENEA:

A este tipo de tratamientos se los conoce como tratamientos secundarios debido a que ocurren después de la combustión. Actualmente, hay algunos tratamientos que se están aplicando en diferentes industrias, siendo los de mayor eficiencia tanto económica como operacionalmente los siguientes:⁴⁶

- Sistemas de Reducción Catalítica Selectiva (SCR)
- Sistemas de Reducción No Catalítica (SNCR)
- Tratamientos de Oxidación (LoTox, Thermalonox)

1.4.1.-PROCESO SCR (Selective Catalytic Reduction):

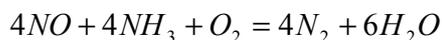
Este proceso se basa en la reducción de los NO_x con amoníaco, en presencia de oxígeno y un catalizador. Los productos finales de este proceso son nitrógeno y agua. Este proceso involucra las siguientes reacciones:⁴⁷

⁴⁵ Environmental Protection Agency.

⁴⁶ Environmental Protection Agency.

⁴⁷ Environmental Protection Agency.

Ec. [1.3]:



Ec. [1.4]:

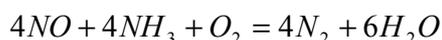


Ec. [1.5]:

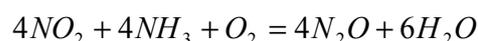


El amoníaco se inyecta en la corriente gaseosa en forma de hidróxido de amonio (vaporizado), diluido con aire, la relación NH_3/NO_x debe ser menor a la unidad. Un factor importante en la efectividad de este proceso es la temperatura, los catalizadores utilizados operan entre 300 y 400 °C. Por otro lado, se debe mencionar que la primera reacción es la predominante, sin embargo se producen dos reacciones indeseables que dan la formación de óxido nítrico y son las siguientes:⁴⁸

Ec. [1.6]:



Ec. [1.7]:



Los catalizadores comúnmente utilizados son a base de óxidos metálicos, ya que tienen menor tendencia a oxidar el amoníaco, siendo los comúnmente utilizados los que se componen de una mezcla de pentóxido de vanadio, dióxido de titanio y óxido de tungsteno.

El pentóxido de vanadio es el mayor responsable de la actividad del catalizador, siendo el responsable de la reducción de los óxidos de nitrógeno, pero a la vez de la oxidación del dióxido de azufre.⁴⁹

⁴⁸ Environmental Protection Agency.

⁴⁹ Environmental Protection Agency.

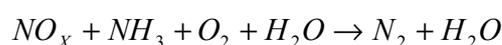
En conclusión se puede decir que:

- La selectividad y eficiencia de este proceso radica en la capacidad del amoníaco de reaccionar selectivamente con el óxido nítrico y no permitir ser oxidado por el oxígeno.
- La temperatura a la que se realice el proceso influye en la eficiencia del mismo.
- Parte importante de este proceso es la utilización de un catalizador, para así poder reducir los NO_x , por lo cual se debe acotar que en emisiones con alta cantidad de material particulado, no es conveniente aplicar este sistema ya que deteriora rápidamente al catalizador.
- Otro problema que presenta este proceso es que no es conveniente en sistemas con alto contenido de azufre, ya que destruye al catalizador.
- Este sistema únicamente reduce la emisión de NO_x , e inclusive según el tipo de catalizador utilizado puede llegar a favorecer la oxidación del dióxido de azufre en trióxido de azufre, lo cual no es conveniente, ya que este es uno de los responsables de la generación de lluvia ácida.

1.4.2.-PROCESO SNCR (Selective Noncatalytic Reduction):

Este proceso al igual que el anterior reduce los óxidos de nitrógeno a nitrógeno, inyectando amonio o urea, pero la diferencia radica en que no utiliza catalizador y en que su temperatura de operación es mucho más alta. Las temperaturas a las cuales se realiza este proceso están dentro del rango de 870 y 1200 °C , ocurriendo las siguientes reacciones:⁵⁰

Ec. [1.8]:



En conclusión se puede decir que:

- El problema de este proceso son las altas temperaturas que se requieren para que sea efectivo, pero por otro lado es muy económico.
- Si se trabaja fuera del rango de temperatura se producen reacciones no deseadas. Al trabajar por debajo del rango de temperatura el amoníaco inyectado no reacciona completamente y por ende no reduce todo el óxido nítrico presente; además el amoníaco sobrante sale en conjunto con los gases de emisión. Por otro lado, al trabajar sobre el rango de temperatura, el amoníaco se oxida en óxido nítrico, generando mas cantidad de contaminante.

1.4.3.-PROCESOS DE OXIDACION:

Actualmente se disponen de dos procesos de oxidación: Thermalonox y Lotox, ambos procesos basan su procedimiento en la oxidación del NO para posteriormente absorberlo en agua, utilizando una torre de absorción. La oxidación se la realiza empleando ozono,

⁵⁰ Enviromental Protection Agency.

esta reacción ocurre en el ducto de salida de las emisiones sin necesidad de emplear ningún tipo de catalizador.⁵¹

Las temperaturas donde se adquiere la mayor eficiencia están entre los 66 y 121 °C, las eficiencias obtenidas en estos procesos son las mas altas de todas las tecnologías disponibles.⁵²

En cuanto al costo del proceso, el factor mas decisivo es la cantidad de ozono requerida, Thermalonox propone oxidar al oxígeno presente en los gases de salida mediante la inyección de fósforo elemental.

Por otro lado esta tecnología permite eliminar otro tipo de contaminantes, además de los NO_x , ya sea el dióxido de azufre y dióxido de carbono.

1.4.4.-CUADRO COMPARATIVO DE TRATAMIENTOS:

A continuación se presenta un cuadro comparativo, donde podemos visualizar claramente las diferencias que existen entre cada uno de los tratamientos:

⁵¹ California Air Sources Borrad Innovative Clean Air Technology.

⁵² California Air Sources Borrad Innovative Clean Air Technology.

1.7 CUADRO COMPARATIVO DE TRATAMIENTOS.⁵³

	SNCR	SCR	LoTox
Reactivos necesarios	Amoniaco y Urea	Amoniaco y Urea	Ozono
Tratamiento	Reducción	Reducción	Oxidación
Temperatura requerida (°C)	900-1090	260-400	66-121
Ubicación	Cerca a la combustión		Salida
Catalizador	No	Si	No
Reacción en la fase gaseosa	Si	No	Si
Absorbedor	Opcional	Opcional	Si
Reducción de Nox	40-70%	60-95%	90-98%
Concentración de CO después del tratamiento	Aumenta	Aumenta	Sin efecto
Concentración de los SOx después del tratamiento	Generación de H_2S	Generación de H_2S	Sin efecto

1.5.- VALORES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTION:

Según las normas ambientales establecidas por la Dirección de Medio Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, los límites para contaminantes emitidos por fuentes fijas de combustión son los siguientes:

⁵³ California Air Sources Board Innovative Clean Air Technology.

1.8 VALORES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTION (A CONDICIONES NORMALES). (DMA)

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	UNIDADES	VALORES MAXIMOS
Partículas	Diesel	$\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	150
Óxidos de Nitrógeno	Diesel	$\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	500
Dióxido de Azufre	Diesel	$\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	1650
Monóxido de Carbono	Diesel	$\left[\frac{mg}{m^3} \right]$	250

1.5.1.- REQUISITOS Y METODOS DE MEDICION DE EMISIONES DESDE FUENTES FIJAS DE COMBUSTION

La medición de emisiones de contaminantes del aire desde fuentes fijas de combustión, deben contar con los siguientes requisitos mínimos.⁵⁴

- Plataforma de trabajo
- Escalera de acceso a la plataforma de trabajo
- Suministro de energía eléctrica cercano a la plataforma de trabajo.

⁵⁴ Norma TULAS

Método 1: Definición de puertos de muestreo y de puntos de medición en las chimeneas:

Número de puertos de muestreo: Los puertos de muestreo se definen como los puntos donde se realizaran las medidas; el número de puertos de muestreo se determinara según el siguiente criterio:⁵⁵

- Dos puertos de muestreo para chimeneas de diámetro menor a 3 metros.
- Cuatro puertos para chimeneas de diámetro mayor a 3 metros.

Ubicación de puertos de muestreo: Los puertos de muestreo se ubicarán al menos a una distancia de ocho diámetros de chimenea corriente abajo y dos diámetros de chimenea corriente arriba de una perturbación al flujo normal del gas.⁵⁶

Numero de puntos de medición: El número de puntos de medición dependerá de lo siguiente.⁵⁷

- 12 puntos de medición para chimeneas con diámetro mayor a 0.61 metros.
- 8 puntos de medición para chimeneas con diámetro entre 0.3 y 0.6 metros.

Método 2: Determinación de velocidad y gasto volumétrico de gases de escape.⁵⁸

- Uso de un tubo pitot para medir la presión de la corriente de gases de escape.
- Medición de la temperatura del gas dentro de la chimenea.
- Calculo de la velocidad del gas.

Para el cálculo de la velocidad promedio en la chimenea, se utiliza el tubo pitot, para lo cual en cada punto de la medición se miden las presiones dinámicas y luego mediante una ecuación establecida, se calcula la velocidad promedio.

⁵⁵ Norma TULAS

⁵⁶ Norma TULAS

⁵⁷ Norma TULAS

⁵⁸ Norma TULAS

Método 3: Determinación del peso molecular seco de gases de escape: Se lo calcula mediante la ecuación.⁵⁹

Ec. [1.9]:

$$Md = 0.44\%CO_2 + 0.32\%O_2 + 0.28\%CO + X\%N_2$$

El porcentaje de nitrógeno se lo obtendrá restando del 100%, los porcentajes de dióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno.⁶⁰

Método 4: Medición de material particulado: Para esta medición se emplea un tren isocinético, el cual coleccionará las partículas en cada uno de los puntos de medición. Esta medición se la debe hacer durante 5 minutos en cada punto.⁶¹

Método 5: Determinación de emisión de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno: Para este tipo de medición se utilizan analizadores portátiles, los cuales utilizan técnicas tales como fluorescencia, ultravioleta o infrarrojo, en lo que se refiere a medición del dióxido de azufre y técnicas como quimiluminiscencia para el caso de óxidos de nitrógeno.⁶²

⁵⁹ Norma TULAS

⁶⁰ Norma TULAS

⁶¹ Norma TULAS

⁶² Norma TULAS

CAPITULO 2

2.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO:

2.1.- GENERADOR TERMOELECTRICO DETROIT DIESEL:

El generador termoeléctrico de emergencia que se dispone en la Universidad San Francisco de Quito pertenece a la marca Detroit Diesel 81237405, el cual utiliza para su funcionamiento un motor de combustión interna de 2 tiempos. Este motor se caracteriza principalmente por no poseer bomba para el combustible, los inyectores son los encargados de realizar el trabajo de la bomba, por lo que si se daña uno, no se para el funcionamiento del motor, lo que le da una ventaja sobre otros motores de igual uso.



2.1 DUCTO DE SALIDA DEL GENERADOR DETROIT DIESEL.

El combustible junto con el aire, son inyectados a la cámara de combustión y por presión se enciende el combustible e inicia el funcionamiento del motor. Este motor tiene como objetivo producir el movimiento en el alternador para generar corriente. Se empieza a generar corriente a partir de las 1800 revoluciones por minuto. Este generador utiliza como combustible Diesel 2, teniendo un promedio de consumo de 20 galones por hora, tomando en cuenta que este consumo es calculado si el generador esta trabajando a su máxima potencia. A continuación se detallan las características de este generador:

2.1 CARACTERISTICAS DEL GENERADOR TERMoeLECTRICO DETROIT DIESEL.

GENERADOR SINCRONICO DE CORRIENTE ALTERNA	
Marca	KOHLER
Modelo	500R0ZD71
Serial No.	356301
Spec	PA-132539
Hz	60
Part.	A-328102
Mod.	572RSL4027
Rpm	1800
Potencia real	500 KW
Potencia aparente	625 KVA
Factor de potencia	0.8
MOTOR	
Marca	Detroit Diesel
Modelo	81237405
Serial No.	7A42779
Spec.	A274273

2.2 CARACTERISTICAS ADICIONALES DEL GENERADOR TERMOELECTRICO DETROIT DIESEL.

Perdidas por altura	15-18% (Cumbayá)
Perdidas por altura	20% (Quito)
Aceite de motor	Ursa 40 LA3

2.2.- MEDICIONES DE LAS EMISIONES DEL GENERADOR TERMOELECTRICO DETROIT DIESEL:

El día 30 de junio de 2008, se procedió a realizar la medición de las emisiones procedentes del generador termoeléctrico Detroit Diesel, ubicado en la Universidad San Francisco de Quito, con la colaboración de la Dirección de Medio Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito (Técnico Gustavo Rodríguez). Se realizaron 15 mediciones, para lo cual se utilizó el equipo “Testo 350”, el cual determinó la concentración de los gases de salida, temperatura y flujo de salida del gas. El equipo consta de las siguientes partes:

- Sonda 1: Concentraciones.
- Sonda 2: Flujo de gas.
- Termocupla: Temperatura.
- Condensador.
- Celda electrolítica.
- Control digital.
- Equipo para imprimir.

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

(las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono se presentan en porcentaje volumétrico)

Tabla 2.3 MEDICIONES DE LAS EMISIONES DEL GENERADOR TERMOELECTRICO DETROIT DIESEL.

CONTAMINANTE	NUMERO DE MEDICION														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
O_2 [%]	14.3	14.3	14.3	14.0	14.0	14.1	14.2	14.2	14.1	14.0	14.0	14.0	13.9	13.9	13.9
CO_2 [%]	5.1	5.1	5.1	5.3	5.3	5.2	5.1	5.1	5.2	5.3	5.3	5.3	5.4	5.4	5.4
CO [ppm]	147	158	157	167	165	165	160	154	157	160	161	160	163	162	162
NO [ppm]	392	400	404	436	445	440	428	422	431	441	444	439	455	455	449
NO_2 [ppm]	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SO_2 [ppm]	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
%Humedad Relativa	---	---	2.6	0.6	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Temperatura [°C]	202.9	212.1	213.1	209.7	211.6	209.4	211.3	210.9	209.6	209.9	212.2	211.2	209.1	211.1	211.5

2.3.- EVALUACION DE DATOS OBTENIDOS:

A continuación, con los datos de las 15 mediciones realizadas, se obtiene un promedio de las concentraciones de cada contaminante y de la temperatura del gas:

2.4 CONCENTRACIONES Y PORCENTAJES VOLUMETRICOS
PROMEDIO GAS DE ESCAPE
TEMPERATURA PROMEDIO: 210.37 [°C]

Contaminante	Concentración Promedio	% Volumétrico
O_2	14.08 [%]	14.08
CO_2	5.24 [%]	5.24
CO	159.87 [ppm]	1.59E - 2
NO	432.07 [ppm]	4.32E - 2
NO_2	0.93 [ppm]	9.3E - 5
SO_2	0.07 [ppm]	7E - 6
%Humedad Relativa	0.269	0.269

El flujo de gas seco medido por el equipo TESTO 350 fue el siguiente:

$$F_{GS} = 1115.41 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Los datos generados por el equipo de medición son referidos a base seca, por tanto la cantidad de nitrógeno presente sería:

$$C_{N_2} = 80.68\% \text{ (Base seca)}$$

Donde:

C_{N_2} = Porcentaje de nitrógeno presente en el gas. (Base seca)

Transformados a base húmeda:

Ec. [2.1]:

$$\%HR = \frac{p_a}{p_{av}} \times 100 = 0.269$$

Donde:

$\%HR$ = Porcentaje de Humedad Relativa.

p_a = Presión parcial del vapor de agua en la mezcla. [atm]

p_{av} = Presión de vapor del agua a la temperatura de la mezcla. [atm]

Despejando p_a tenemos:

Ec. [2.2]:

$$p_a = 0.00269 \times p_{av}(T = 210.37^\circ C)$$

El valor de p_{av} a $210.37^\circ C$ lo obtenemos de las tablas de vapor, el cual es:

$$p_{av}(T) = 18.81[atm]$$

Por tanto reemplazando en la ecuación 2.2 tenemos:

$$p_a = 0.051[atm]$$

Por tanto, para determinar la fracción molar de agua presente en la mezcla, empleamos la ley de Dalton la cual relaciona la presión parcial y la presión total:

Ec. [2.3]:

$$y_a = \frac{p_a}{p_T} = \frac{0.051}{0.755} = 0.067$$

y_a = Fracción molar de vapor de agua (mol de vapor de agua (mva)/ por mol de gas húmedo(mgh)).

Se toma una base de 100 moles de gas seco (mgs), y se tiene:

$$y_a = 0.067 \frac{mva}{mgh} \rightarrow 0.933 \frac{mgs}{mgh} = y_s$$

Al dividir estas relaciones, se obtiene la cantidad de moles de vapor de agua presentes en el gas seco:

$$\frac{0.067 \frac{mva}{mgh}}{0.933 \frac{mgs}{mgh}} = 0.072 \frac{mva}{mgs}$$

En 100 moles de gas seco se tiene:

Ec. [2.4]:

$$0.072 \frac{mva}{mgs} \times 100mgs = 7.2[mva]$$

Realizando el mismo procedimiento para cada componente:

$$O_2 = 14.08[mol]$$

$$CO_2 = 5.24[mol]$$

$$CO = 1.59E - 2[mol]$$

$$NO = 4.32E - 2[mol]$$

$$NO_2 = 9.3E - 5[mol]$$

$$SO_2 = 7E - 6[mol]$$

$$N_2 = 80.68[mol]$$

Por lo tanto el número total de moles de la mezcla sería:

$$N_m = 107.26[mol]$$

Obtenidos estos resultados, la composición en base húmeda sería la siguiente:

2.5 CONCENTRACION DE COMPONENTES DEL GAS DE ESCAPE EN BASE HUMEDA.

Componente	% Molar o Volumétrico
N_2	75.22
O_2	13.13
H_2O	6.71
CO_2	4.89
CO	1.482E - 2
NO	4.03E - 2
NO_2	8.67E - 5
SO_2	6.53E - 6

Por tanto el flujo volumétrico de gas húmedo sería:

$$F_{VGH} = 1195.77 \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

Cálculo de la masa Molecular del gas húmedo (M_{GH}):

Ec. [2.5]:

$$M_{GH} = M_{N_2} \cdot y_{N_2} + M_{O_2} \cdot y_{O_2} + M_{H_2O} \cdot y_{H_2O} + M_{CO_2} \cdot y_{CO_2} + M_{CO} \cdot y_{CO} \\ + M_{NO} \cdot y_{NO} + M_{NO_2} \cdot y_{NO_2} + M_{SO_2} \cdot y_{SO_2}$$

Ec. [2.6]:

$$M_{GH} = 28 \times (0.7526) + 32 \times (0.1313) + 18 \times (0.0672) + 44 \times (0.0489) + 28 \times (1.483E - 4) \\ + 30 \times (4.03E - 4) + 46 \times (8.67E - 7) + 64 \times (6.53E - 8) \\ M_{GH} = 28.652 \left[\frac{g}{mol} \right]$$

Calculo de la densidad del gas húmedo (ρ_{GH}):

Ec. [2.7]:

$$\rho_{GH} = \frac{P \times M_{GH}}{R \times T} = \frac{0.755 \times 28.652}{0.082 \times 483.37} = 0.546 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Donde:

P = Presión del sistema. (Atmosférica local) [atm]

R = Constante universal de los gases $\left[\frac{l \cdot atm}{mol \cdot K} \right]$

T = Temperatura del sistema. [K]

A continuación, se detallan los flujos molares, másicos y concentraciones de cada uno de los componentes presentes en el gas de salida del generador:

2.6 FLUJOS MOLARES Y MASICOS DE LOS COMPONENTES DEL GAS DE ESCAPE.

Componente	Flujo molar $\left[\frac{mol}{h}\right]$	Flujo másico $\left[\frac{kg}{h}\right]$	Concentración Molar $\left[\frac{mol}{l}\right]$
N_2	17144.2	480.04	0.014
O_2	2991.01	95.71	0.0025
H_2O	1529.9	27.54	0.00128
CO_2	1111.66	48.91	0.00093
CO	3.37	0.094	2.82E – 6
NO	9.18	0.275	7.67E – 6
NO_2	0.0198	0.00091	1.655E – 8
SO_2	0.0015	0.000096	1.25E – 9
Total	22780	652.89	-----

2.4.- SELECCION DEL TRATAMIENTO A IMPLEMENTAR:

Basados en la teoría mencionada anteriormente sobre los tres tratamientos propuestos, se generan las siguientes conclusiones:

- Los tratamientos de oxidación nos ofrecen la posibilidad de eliminar otro tipo de contaminantes además de los NO_x .

- Presentan la más alta eficiencia de eliminación de NO_x , con un rango entre el 90 y 98 %.
- En cuanto al reactivo utilizado (ozono), se puede utilizar un ozonificador que simplemente toma el oxígeno del medio y lo oxida, a diferencia de los dos otros tratamientos, en los cuales se requiere de amoníaco, con el cual se tendrían problemas de almacenamiento y peligro de inflamación.
- No requiere la utilización de un catalizador, el cual tiene un alto costo y además se necesitaría reemplazarlo continuamente por el daño de material particulado y emisión de dióxido de azufre.
- La reacción de oxidación se la puede llevar a cabo en el ducto de salida de las emisiones, inyectando ozono.
- Rango de temperaturas de trabajo: La temperatura de salida de las emisiones del generador en estudio es de $(210.37^{\circ}C)$, cercano tanto al rango de temperaturas del sistema SCR como el tratamiento de oxidación. Sin embargo, por aspectos económicos, es más conveniente retirar energía a un proceso que aportarla. En este caso el rango de temperatura de trabajo de los procesos de oxidación contempla temperaturas bajas ($66-121^{\circ}C$), que son cercanas a nuestra temperatura de salida.

Consecuentemente, el tratamiento que se implementará estará basado en un proceso de oxidación, empleando ozono como agente oxidante, cuyas etapas serán las siguientes:

- Oxidación empleando ozono.
- Reducción de temperatura.
- Absorción en fase líquida.

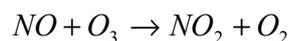
CAPITULO 3

3.- CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL TRATAMIENTO

3.1.- OZONIFICACION:

Debido a la baja solubilidad del óxido nítrico en agua, se hace necesario oxidarlo a dióxido de nitrógeno, el cual es soluble en agua. Para esta oxidación se utilizara ozono, el cual es un fuerte oxidante, ocurriendo la siguiente reacción:

Ec. [3.1]:



3.2.- REDUCCION DE TEMPERATURA:

La reducción de temperatura a la cual se la debe someter al gas de escape, es necesaria para mejorar la absorción del gas en el solvente, ya que a menor temperatura, mejora la transferencia de materia entre la fase gaseosa y líquida.

3.3.- ABSORCIÓN DEL DIOXIDO DE NITROGENO:

Posteriormente el flujo de gas debe ser tratado en una torre de absorción, por tanto previo a su diseño es importante plantear todos los conceptos generales sobre absorción y métodos de cálculo para el diseño de columnas de absorción multicomponente.

3.3.1.-ABSORCION GASEOSA:

La absorción de gases se la define como una operación de transferencia de masa, en la cual componentes presentes en una mezcla gaseosa van a ser disueltos en un líquido en el cual son altamente solubles. La eficiencia de la absorción gaseosa va a depender en gran parte del contacto que tengan estas dos fases, para lo cual se han desarrollado métodos y equipos que promueven este contacto.⁶³

3.3.2.-ABSORCION DE GASES COMO METODO DE CONTROL DE CONTAMINACION:

La absorción de gases es un proceso muy utilizado en lo que se refiere a contaminación por emisiones gaseosas. La aplicación de este método va a depender de ciertos factores como son los siguientes:⁶⁴

1. Disponibilidad del solvente adecuado para absorber los compuestos requeridos.
2. Grado de eficiencia requerido.
3. Concentración del contaminante presente en el flujo a tratar.
4. Costo de desecho del solvente irrecuperable.

3.3.3.-EQUILIBRIO LIQUIDO-GAS:

El equilibrio liquido-gas se lo puede definir como un estado en el cual los solutos presentes en el gas pasan a la fase líquida (se disuelven) y al mismo tiempo los solutos que se encuentran presentes en el solvente pasan a formar parte de la fase gaseosa.

⁶³ Treybal Robert.

⁶⁴ Treybal Robert.

3.3.4.-SOLUBILIDAD EN EL EQUILIBRIO:

Al momento de hablar de absorción de gases en un líquido es importante definir las propiedades en el equilibrio entre dichas fases, ya que de esto dependerá la velocidad con la cual el gas se disuelve en el líquido, algunas de estas propiedades son; la presión parcial de los solutos en el gas, el tipo de soluto, temperatura, y la concentración de los solutos en las dos fases.

Existen varias ecuaciones que definen estas propiedades de equilibrio, todo dependerá de las consideraciones que se tomen en cuenta, es decir si hablamos de condiciones ideales o reales, en el presente proyecto todas las consideraciones de diseño parten de condiciones ideales.⁶⁵

Comportamiento ideal:

Si consideramos que la fase líquida se comporta idealmente, sus propiedades se pueden determinar matemáticamente con el uso de ecuaciones que predicen su comportamiento, sin necesidad de recurrir a la experimentación. Para esto se realizan algunas consideraciones sobre las características de la fase líquida, como son:⁶⁶

- Las moléculas que constituyen la fase líquida son de igual tamaño, estructura y naturaleza química
- Las fuerzas intermoleculares presentes en la fase líquida no varían mayormente entre los constituyentes del líquido.
- En lo que se refiere a la fase gaseosa, la presión parcial de un componente gaseoso es igual al producto de su presión de vapor y su fracción molar en la solución.

⁶⁵ Treybal Robert.

⁶⁶ Calero Natali

3.3.5.-EQUILIBRIO EN SOLUCIONES IDEALES:

El comportamiento de sistemas que comprenden dos fases, en este caso líquido y gas puede ser claramente descrito por las constantes de equilibrio propias del sistema. La constante de equilibrio K_{eq} se la puede definir de la siguiente manera:⁶⁷

Ec. [3.2]:

$$K_{eq,i} = \frac{y_i}{x_i}$$

Donde:

y_i = Fracción molar del componente i en la fase gaseosa.

x_i = Fracción molar del componente i en la fase líquida.

Estas constantes de equilibrio se las puede obtener de dos leyes que son las siguientes:

- Ley de Raoult
- Ley de Dalton

Ley de Raoult: Esta ley propone que “ la presión de vapor de un componente de una mezcla es proporcional a la concentración de dicho componente y a la presión de vapor del mismo componente puro”.⁶⁸ Esta ley se interpreta por la siguiente ecuación:

Ec. [3.3]:

$$P_{vi} = P_{vi}^o \times x_i$$

⁶⁷ Calero Natali

⁶⁸ Chang Raymond.

Donde:

P_{vi} = Presión de vapor del componente en la mezcla.

P_{vi}^o = Presión de vapor del componente puro.

x_i = Fracción del componente i en la fase líquida.

Ley de Dalton: Esta ley postula lo siguiente: “La presión parcial de un componente en una mezcla gaseosa es proporcional a la fracción molar de dicho componente por la presión total del sistema”.⁶⁹ Esta ley se interpreta por la siguiente ecuación:

Ec. [3.4]:

$$P_i = P \times y_i$$

Donde:

P_i = Presión parcial del componente i en la mezcla gaseosa.

P = Presión Total del sistema.

y_i = Fracción del componente i en la mezcla gaseosa.

Seguidamente, cuando el gas y el líquido están en equilibrio, la presión de vapor del componente i (P_{vi}) es igual a la presión parcial del componente i en el gas (P_i), ya que se refieren al mismo valor, por lo tanto igualando estas ecuaciones se tiene que:⁷⁰

Ec. [3.5]:

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{P_{vi}^o}{P}$$

⁶⁹ Chang Raymond.

⁷⁰ Chang Raymond.

Por lo tanto:

Ec. [3.6]:

$$K_{eq,i} = \frac{P_{vi}^o}{P}$$

3.3.6.-SOLUBILIDADES EN SISTEMAS MULTICOMPONENTES:

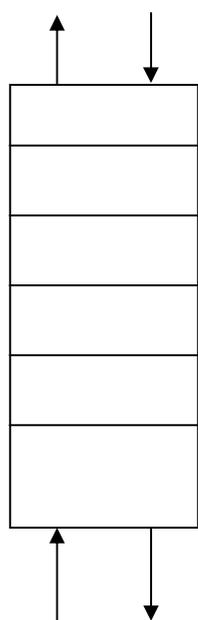
En lo que se refiere a sistemas multicomponentes, el análisis de las solubilidades en el equilibrio es independiente para cada uno de los componentes gaseosos, claro se debe tener en cuenta sus presiones parciales dentro de la mezcla.⁷¹

3.3.7.-COLUMNAS DE ABSORCION:

Los equipos utilizados en este tipo de operaciones son torres o columnas, en las cuales el flujo de gas ingresara por la parte inferior, mientras que el flujo de líquido lo hará por la parte superior; dichos flujos pueden ser paralelos o en contracorriente, como se ilustra en la figura:⁷²

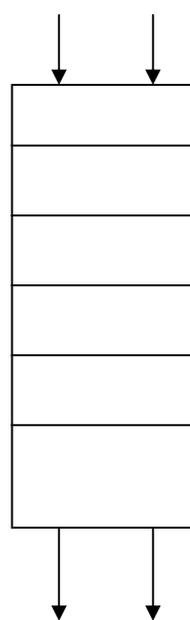
⁷¹ Calero Natali.

⁷² Treybal Robert



GAS LIQUIDO

FLUJO EN CONTRACORRIENTE



GAS LIQUIDO

FLUJO PARALELO

3.1 GRÁFICA DE COLUMNAS DE ABSORCIÓN.

En su interior podemos encontrar instrumentos que ayudan a que se realice un contacto más íntimo entre las dos fases, y además incrementan el tiempo de contacto entre las dos fases, estos pueden ser rellenos como: anillos Raschig, Intalox, monturas bandejas, etc.; o a su vez el interior puede estar formado por platos, que están a una distancia determinada, además de tener un diámetro preestablecido.⁷³

⁷³ Treybal Robert.

3.3.7.1.-DISEÑO DE COLUMNAS DE ABSORCIÓN:

El diseño de columnas de absorción involucra varios aspectos y parámetros a analizar, los cuales serán mencionados a continuación:

3.3.7.2.-CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO:

Usualmente las cantidades que se pueden tener definidas previamente al diseño de una columna son las siguientes:⁷⁴

- Flujo, composición y temperatura del gas entrante
- Presión de operación de la columna
- Composición y temperatura de la fase líquida entrante.

Posteriormente los factores a determinarse son:⁷⁵

- El flujo de la fase líquida.
- El tipo de relleno a emplearse.
- La fracción absorbida por el líquido

En cuanto al tercer factor, se debe mencionar que se lo puede determinar previamente, según sea el objetivo de la operación, es decir si se desea que el gas salga con un tipo de composición.⁷⁶

⁷⁴ Richardson Coulson.

⁷⁵ Richardson Coulson.

⁷⁶ Richardson Coulson.

3.3.7.3.-PROCESO DE DISEÑO:

Como ya se menciona antes, generalmente al inicio se cuentan con datos como: flujo de gas, flujo de líquido, composición de entrada del gas, presión de la operación, pérdida de carga, disolvente a utilizarse, y finalmente la composición de salida que se desea obtener. A continuación se explicaran los pasos que se deben seguir para el diseño de una columna de absorción:

PASO 1:

Selección del solvente: Evidentemente el principal criterio determinante en la selección del solvente es el grado de solubilidad que tenga el gas en el mismo. Por otro lado es conveniente que el solvente cumpla con las siguientes características:⁷⁷

- Baja volatilidad: es decir el solvente a elegir deberá tener una baja presión de vapor.
- Baja viscosidad: por facilidades de bombeo hacia la columna y mejor velocidad de absorción.
- No sea corrosivo los materiales de la torre estarían altamente afectados, reduciendo su vida útil.
- Preferiblemente de bajo precio: reducción de costos.

PASO 2:

Análisis de los datos de solubilidad (equilibrio liquido vapor):

- Estos datos son importantes para la determinación del flujo del solvente, con lo cual se podrá calcular la cantidad de soluto que va a ser recuperada.⁷⁸

⁷⁷ Richardson Coulson.

PASO 3:**Cálculo del flujo de líquido y gas:**

- Determinar el flujo mínimo de solvente que ingresa a la columna para que se realice la absorción.⁷⁹

PASO 4:⁸⁰**Selección del equipo a utilizar:**

- Una de los principales factores es la elección del tipo de columna, es decir columna de platos o columna de relleno, esto dependerá de la utilización que se le vaya a dar a la columna:

Columnas de platos: son escogidas en caso de flujos de solventes bajos, o para operaciones de escala grande, ya que estas columnas son más económicas que las columnas de relleno.

Columnas de relleno: son adecuadas para materiales corrosivos, para caídas de presiones bajas y para operaciones pequeñas.

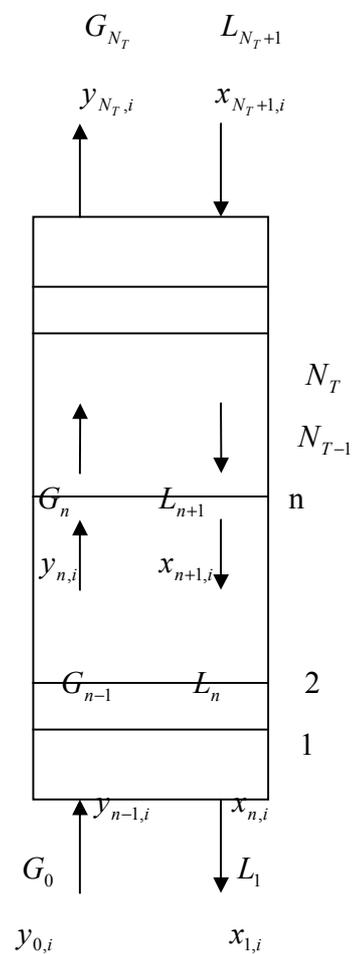
⁷⁸ Richardson Coulson.

⁷⁹ Richardson Coulson.

⁸⁰ Richardson Coulson.

PASO 5:⁸¹

- Cálculo de altura de la columna: dependerá de la cantidad deseada de soluto a recuperarse. (calculo del número de platos y espacio entre ellos).
- Cálculo del diámetro de la columna.

3.3.7.4.-BALANCES DE MASA Y ENERGIA:**3.2 BALANCE DE MASA Y ENERGIA EN UNA COLUMNA DE ABSORCION.**

⁸¹Richardson Coulson.

G_{N_T} = Flujo de gas total proveniente del plato N_T

$y_{N_T,i}$ = Fracción del componente i en la fase gaseosa proveniente del plato N_T

L_{N_T+1} = Flujo de líquido total de entrada

$x_{N_T+1,i}$ = Fracción del componente i en la fase líquida (entrada)

N_T = Numero total de platos en la columna (plato superior)

G_n = Flujo de gas total proveniente del plato n

$y_{n,i}$ = Fracción del componente i proveniente del plato n

L_{n+1} = Flujo de líquido total proveniente del plato n+1

$x_{n+1,i}$ = Fracción del componente i en la fase líquida, proveniente del plato n+1

G_{n-1} = Flujo de gas total proveniente del plato n-1

$y_{n-1,i}$ = Fracción del componente i en la fase gaseosa proveniente del plato n-1

L_n = Flujo de líquido total proveniente del plato n

$x_{n,i}$ = Fracción del componente i proveniente del plato n

G_0 = Flujo de gas total de entrada

$y_{0,i}$ = Fracción del componente i en la fase gaseosa (entrada)

L_1 = Flujo de líquido total de salida

$x_{1,i}$ = Fracción del componente i en la fase líquida (salida)

Balance de masa del componente i en el plato n:

Ec. [3.7]:

$$L_{n+1} * x_{n+1,i} + G_{n-1} * y_{n-1,i} = G_n * y_{n,i} + L_n * x_{n,i}$$

Balance de masa total del componente i:

Ec. [3.8]:

$$G_0 * y_{0,i} + L_{N_T+1} * x_{N_T+1,i} = L_1 * x_{1,i} + G_{N_T} * y_{N_T,i}$$

Balance de masa total de la columna:

Ec. [3.9]:

$$G_0 + L_{N_T+1} = L_1 + G_{N_T}$$

Balance de energía del componente i en el plato n:

Ec. [3.10]:

$$h_{n+1,l,i} * L_{n+1} * x_{n+1,i} + h_{n-1,g,i} * G_{n-1} * y_{n-1,i} = h_{n,g,i} * G_n * y_{n,i} + h_{n,l,i} * L_n * x_{n,i}$$

Balance de energía total del componente i:

Ec. [3.11]:

$$h_{o,g,i} * G_0 * y_{0,i} + L_{N_T+1} * x_{N_T+1,i} * h_{N_T+1,l,i} = L_1 * x_{1,i} * h_{1,l,i} + G_{N_T} * y_{N_T,i} * h_{N_T,g,i}$$

Para el caso de sistemas multicomponentes se necesitan plantear ecuaciones en las que se involucren a todos los componentes presentes en el sistema, por tanto se muestra continuación las siguientes ecuaciones, considerando un número m de componentes presentes en el sistema:

Balance en el plato n:

Ec. [3.12]:

$$\sum_{i=1}^m L_{n+1} * x_{n+1,i} + \sum_{i=1}^m G_{n-1} * y_{n-1,i} = \sum_{i=1}^m G_n * y_{n,i} + \sum_{i=1}^m L_n * x_{n,i}$$

Balance de masa total de la columna:

Ec. [3.13]:

$$\sum_{i=1}^m G_0 * y_{0,i} + \sum_{i=1}^m L_{N_T+1} * x_{N_T+1,i} = \sum_{i=1}^m L_1 * x_{1,i} + \sum_{i=1}^m G_{N_T} * y_{N_T,i}$$

Balance de energía en el plato n:

Ec. [3.14]:

$$\sum_{i=1}^m L_{n+1} * x_{n+1,i} * h_{n+1,l,i} + \sum_{i=1}^m G_{n-1} * y_{n-1,i} * h_{n-1,g,i} = \sum_{i=1}^m G_n * y_{n,i} * h_{n,g,i} + \sum_{i=1}^m L_n * x_{n,i} * h_{n,l,i}$$

Balance de energía total de la columna:

Ec. [3.15]:

$$\sum_{i=1}^m G_0 * y_{0,i} * h_{0,g,i} + \sum_{i=1}^m L_{N_T+1} * x_{N_T+1,i} * h_{N_T+1,l,i} = \sum_{i=1}^m L_1 * x_{1,i} * h_{1,l,i} + \sum_{i=1}^m G_{N_T} * y_{N_T,i} * h_{N_T,g,i}$$

$h_{0,g,i}$ = Entalpía del componente i a la temperatura de la entrada a la columna. (fase gaseosa).

$h_{n,g,i}$ = Entalpía del componente i a la temperatura de el plato n. (fase gaseosa).

$h_{n,l,i}$ = Entalpía del componente i a la temperatura del plato n (fase liquida).

3.3.7.5.-FACTOR DE ABSORCION:

El factor de absorción se lo puede definir como una relación entre el flujo de liquido y gas entrante, este nos indica la cantidad de soluto absorbido. Está representado por la siguiente ecuación⁸²:

⁸² Treybal Robert.

Ec. [3.16]:

$$A = \frac{L_n}{K_n G_n}$$

3.3.7.6-METODO DE CÁLCULO PARA ABSORCION MULTICOMPONENTE:

Existen varios métodos de cálculo para el caso de absorción multicomponente, que permiten calcular el número de etapas teóricas de una columna, además de los flujos y perfiles de temperatura de cada plato. Algunos de ellos son: el Método de Horton-Franklin, Método de Edmister, Método de Sujata, etc. Para el diseño de esta torre se empleara el Método de Edmister, que presenta resultados muy confiables para este tipo de procesos.⁸³

3.3.7.7.-METODO DE EDMISTER:

Para la determinación del factor de absorción, este método considera que la columna esta constituida de dos platos teóricos, uno en la base y otro en la parte superior de la columna, basado en esto Edmister formuló una ecuación que determina un factor de absorción, independientemente del número de platos que tenga la columna(Treybal); esta ecuación esta basada en el tope y base de su columna, de la siguiente forma:⁸⁴

Ec. [3.17]:

$$A_{E,i} = \sqrt{A_{1,i}(A_{N,i} + 1) + 0.25} - 0.5$$

⁸³ Calero Natali.

⁸⁴ Calero Natali.

Donde:

$A_{N,i}$ = Factor de absorción en el tope de la columna.

$A_{1,i}$ = Factor de absorción en la base de la columna.

Las consideraciones antes mencionadas son las que caracterizan a este método, pero además utiliza otras ecuaciones y consideraciones de otros métodos para sus cálculos, que se las plantea a continuación.

Horton-Franklin: Considera que la variación de cantidad de vapor, del plato n al $n+1$ es constante y cumple la siguiente relación:⁸⁵

Ec. [3.18]:

$$\left(\frac{V_N}{V_O}\right)^{\frac{1}{N}} = \frac{V_{n+1}}{V_n}$$

N = Número total de platos de la columna.

Además, plantea que el cambio de temperatura es proporcional a la cantidad de materia transferida, esto es representado por la siguiente ecuación:⁸⁶

Ec. [3.19]:

$$\frac{V_O - V_n}{V_O - V_N} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{t_1 - t_{N+1}}$$

t_{N+1} = Temperatura del líquido que entra a la columna.

t_1 = Temperatura del líquido que sale del plato 1.

V_N = Flujo de vapor que sale de la columna.

⁸⁵ Calero Natali.

⁸⁶ Calero Natali.

3.3.7.8.- PROCEDIMIENTO METODO DE EDMISTER:⁸⁷

1. Inicialmente se deben contar con los siguientes datos: Flujos de entrada: composición, caudal, temperatura, condiciones en que opera la columna, la fracción de recuperación del componente de interés y el número de platos supuestos.
2. Plantear los porcentajes de recuperación supuestos y así poder obtener L_1 y V_N .
3. Suponer la temperatura de salida del gas V_N .
4. Determinar las entalpías de los fluidos de entrada (V_o, L_{N+1}) y salida V_N .
5. Mediante un balance general de energía determinar la entalpía de L_1 .
6. Determinar la temperatura de L_1 , con la ayuda de la entalpía calculada en el paso anterior, probando con diferentes valores de temperatura, hasta que se obtenga un valor cercano.
7. Obtener los flujos y temperaturas de cada plato, tanto de líquido como de vapor, mediante el uso de las ecuaciones planteadas por Horton Franklin.
8. Calcular los valores de k_i y A_i en los platos del tope y fondo de la columna.
9. Calcular el factor efectivo de Edmister.
10. Determinar con la ayuda del factor efectivo de Edmister, las fracciones recuperadas en el líquido y calcular L_1 .

⁸⁷ Calero Natali.

11. Si L_1 calculado es igual al supuesto anteriormente, se termina el proceso, de lo contrario, continuar iterando hasta que se igualen los flujos.
12. En caso de que sean iguales, verificar si se alcanza el porcentaje de recuperación deseado, de lo contrario se vuelve a iniciar el proceso, con un número superior de platos.

3.3.7.9.- DIAMETRO DE LA COLUMNA:⁸⁸

Primeramente, tenemos que determinar el flujo de gas por área, para lo cual utilizamos el diagrama de caída de presión mostrado en el anexo D. Iniciamos calculando el valor del eje X representado por la siguiente relación:

Ec. [3.20]:

$$X = \frac{L}{G} \times \left(\frac{\delta_g}{\delta_l - \delta_g} \right)^{1/2}$$

Seguidamente obtenemos un valor de Y, dependiendo de la caída de presión seleccionada, el eje Y está representado por la siguiente relación:

Ec. [3.21]:

$$Y = \frac{G^2 \times F \times \mu^{0.1}}{\delta_g \times (\delta_l - \delta_g) \times g}$$

El valor de Y obtenido nos servirá para determinar el flujo másico G por área, el valor de F (factor de empaque) depende del tipo de relleno a seleccionar, en el anexo E se encuentra

⁸⁸ Coulson Richardson.

una tabla con características de algunos rellenos. Finalmente, con el valor de flujo másico podemos calcular el diámetro de la columna.

3.3.7.9.- ALTURA DE LA COLUMNA:⁸⁹

Para el cálculo de la altura de la columna, se parte de la siguiente ecuación:

Ec. [3.22]:

$$Z = HTU \times NTU$$

Donde:

Ec. [3.23]:

$$HTU = \frac{G_s}{K_y a}$$

$HTU =$

Ec. [3.24]:

$$NTU = \frac{\ln\left(\frac{1}{A}\right)}{\left(\frac{1}{A} - 1\right)} \times N_t$$

$NTU =$

$A =$ Factor de absorción.

$N_t =$ Numero de platos teóricos.

$Z =$ Altura del relleno

⁸⁹ Coulson Richardson.

Para poder determinar la altura de la columna debemos generar el coeficiente de transferencia de masa, para lo cual empleamos el grafico planteado en el anexo F:

En el cual:

X=Numero de Reynolds.

$$Y = \frac{k_y}{G_M} Sc^{2/3} \cdot 10^{-1} \quad (\text{Para flujo de gases a trav\u00e9s de cuerpos de relleno})$$

Por tanto, debemos calcular el n\u00famero de Reynolds y el n\u00famero de Schmidt:

Ec [3.25]:

$$Re = \frac{v \times \delta \times l^*}{\mu}$$

Ec [3.26]

$$Sc = \frac{\mu}{\delta \cdot D_{AB}}$$

El numero de Schmidt esta relacionado con el coeficiente de difusi\u00f3n, el cual esta definido por la siguiente formula:

Ec[3.27]:

$$D_{AB} = \frac{1.013E^{-7} \times T^{1.75} \times \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{0.5}}{P \left((\Sigma V_i)_{NO_2}^{1/3} + (\Sigma V_i)_{aire}^{1/3} \right)^2}$$

Donde:

T = Temperatura del sistema. [K]

V_i = Volumen at\u00f3mico del componente i. []

M_A = Peso molecular del componente A. $\left[\frac{g}{mol} \right]$

M_B = Peso molecular del componente B. $\left[\frac{g}{mol} \right]$

P = Presión del sistema. $[atm]$

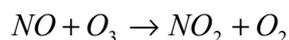
CAPITULO 4

4.- CALCULOS Y DISEÑO DEL TRATAMIENTO:

4.1.- DISEÑO DE LA ZONA DE REACCIÓN:

Se inicia el tratamiento con la oxidación del óxido nítrico, para lo cual se realiza una inyección de ozono en el ducto de salida del gas, esta oxidación es necesaria para la posterior absorción del mismo. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:⁹⁰

Ec. [4.1]:



Energía libre de Gibbs de la reacción calculada a la temperatura de salida del gas:

$$T = 483.37^\circ C .(5)$$

$$\Delta G_{rx} = -97.24 \left[\frac{KJ}{mol} \right]$$

Lo que indica claramente que la reacción a estas condiciones es espontánea.

La velocidad a la que ocurre esta reacción está dada por la siguiente ecuación:⁹¹

Ec. [4.2]:

$$r_{NO} = K_{NO} \times [NO] \times [O_3]$$

$$r_{NO} = \text{Velocidad de reacción.} \left[\frac{M^2}{s} \right]$$

⁹⁰ Chang Raymond.

⁹¹ Chang Raymond.

K_{NO} = Constante de la velocidad de reacción. $[s^{-1}]$

$[NO]$ = Concentración de óxido nítrico. $\left[\frac{mol}{l}\right]$

$[O_3]$ = Concentración de ozono. $\left[\frac{mol}{l}\right]$

Por tanto para determinar su velocidad se debe calcular la constante de reacción a las condiciones de salida del gas, utilizando la ecuación de Arrhenius:⁹²

Ec. [4.3]:

$$K = A \cdot e^{\left(\frac{-Ea}{RT}\right)}$$

Donde:

A = Factor de frecuencia de colisión.

Ea = Energía de activación.

Seguidamente, los valores experimentales determinados para esta reacción son los siguientes⁹³:

$$A = 8.7 \times 10^{12} [s^{-1}]$$

$$Ea = 63 \left[\frac{KJ}{mol}\right]$$

Por tanto la constante de velocidad sería:

$$K_{NO} = 1.35 \times 10^6 [s^{-1}]$$

⁹² Chang Raymond.

⁹³ Chang Raymond

Las concentraciones a cualquier tiempo t de los reaccionantes estarían dadas por:

Ec. [4.4]:

$$[NO]_t = [NO]_o - [NO]_o \times X_{NO}$$

Ec. [4.5]:

$$[O_3]_t = [O_3]_o - [NO]_o \times X_{NO}$$

Donde:

$$[NO]_o = \text{Concentración inicial de óxido nítrico} \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right]$$

$$[O_3]_o = \text{Concentración inicial de ozono} \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}} \right]$$

$$X_{NO} = \text{Fracción de óxido nítrico convertida}$$

Por tanto la velocidad de reacción dependería de la concentración inicial de ozono y de la fracción de óxido nítrico a ser convertida, y posteriormente afectara al tiempo de duración de la reacción.

Ec. [4.6]:

$$r_{NO} = \left((1 - X_{NO}) \times 7.67 \times 10E^{-6} \right) \left([O_3]_o - 7.67 \times 10^{-6} X_{NO} \right) \times K_{NO}$$

La reacción se da en el ducto de salida de los gases, por lo que se utilizara las ecuaciones para dimensionar un reactor PFTR y así se pueda tener un panorama claro de que volumen se necesita para que se realice la reacción. Realizamos inicialmente un balance de masa de óxido nítrico:

F_{NOe} = Flujo de entrada de oxido nítrico.

F_{NOs} = Flujo de salida de oxido nítrico.

V_r = Volumen de la zona de reacción.

Ec. [4.7]:

$$F_{NOe} - F_{NOs} = -r_{NO} * V_r$$

Integrando la diferencial anterior se obtiene la ecuación para el cálculo del volumen del reactor:

Ec. [4.8]:

$$V_r = F_{NOe_0} \int_0^{X_{NO}} \frac{dX_{NO}}{-r_{NO}}$$

El tiempo de reacción estaría dado por:

Ec. [4.9]:

$$\tau = C_{NO_0} \int_0^{X_{NO}} \frac{dX_{NO}}{-r_{NO}}$$

Donde:

C_{NO_0} = Concentración inicial de oxido nítrico.

τ = Tiempo de reacción.

Por tanto reemplazando los datos que se tienen en las anteriores ecuaciones quedarían:

Ec. [4.10]:

$$V = 2.55 \times 10^{-3} \int_0^{X_{NO}} \frac{dX_{NO}}{\left((1 - X_{NO}) \times 7.67 \times 10^{-6} \right) \left([O_3]_o - 7.67 \times 10^{-6} X_{NO} \right) \times 1.35 \times 10^6}$$

Igualmente, reemplazamos en la ecuación del tiempo:

Ec. [4.11]:

$$\tau = 7.67 \times 10^{-6} \int_0^{X_{NO}} \frac{dX_{NO}}{\left((1 - X_{NO}) \times 7.67 \times 10^{-6} \right) \left([O_3]_o - 7.67 \times 10^{-6} X_{NO} \right) \times 4138.6}$$

El volumen y tiempo necesario para que se realice la reacción, dependerá de la conversión que se requiera y en este caso de la concentración inicial de ozono, por tanto son dos variables con las que se puede trabajar para analizar cuando es más eficiente el proceso. La concentración de NO es fija, ya que es la concentración de salida de las emisiones.

Alternativas para la concentración de ozono inicial:

1. $[O_3]_o = [NO]_o$
2. $[O_3]_o = 0.9[NO]_o$
3. $[O_3]_o = 0.8[NO]_o$

Las razones para la selección de estas alternativas son las siguientes:

- Una concentración de ozono mayor a la concentración de óxido nítrico existente, no es recomendable por razones ambientales, ya que un exceso de ozono se traduciría en una liberación de ozono al medio ambiente, lo cual generaría contaminación.

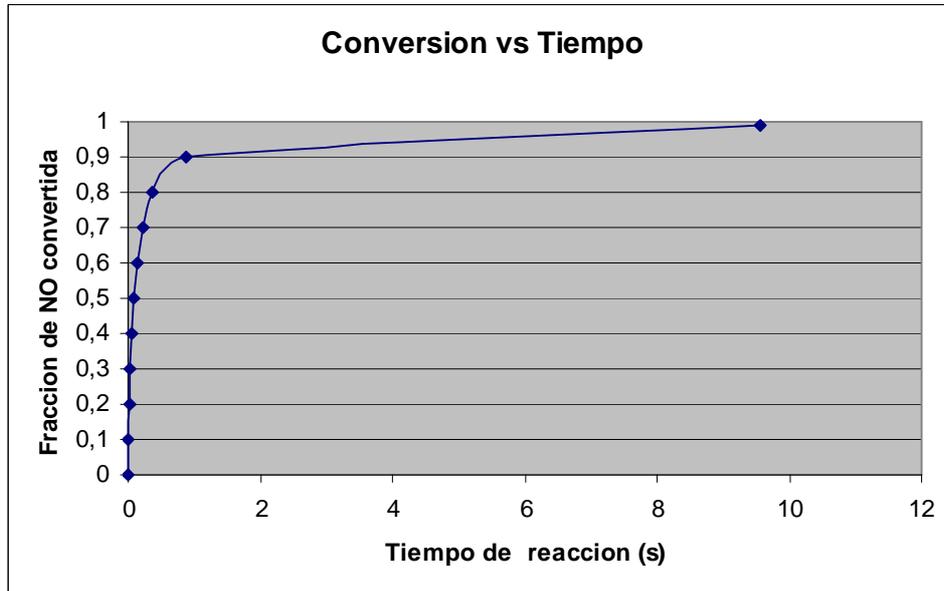
- Una concentración menor a $0.8[NO]_o$ no sería lo adecuado ya que nuestro objetivo es reducir las concentraciones de NO al menos en un 80 %.

En consecuencia, se analizarán estas tres alternativas, para seleccionar la más conveniente.

- Si $[O_3]_o = [NO]_o$:

4.1 CONVERSION DEL OXIDO NITRICO $[O_3]_o = [NO]_o$.

Conversión	Tiempo(s)	Volumen(l)
0,99	9,56	3178,71
0,9	0,87	288,97
0,8	0,38	128,43
0,7	0,23	74,92
0,6	0,14	48,16
0,5	0,097	32,11
0,4	0,064	21,41
0,3	0,041	13,76
0,2	0,024	8,03
0,1	0,01	3,57
0	0	0

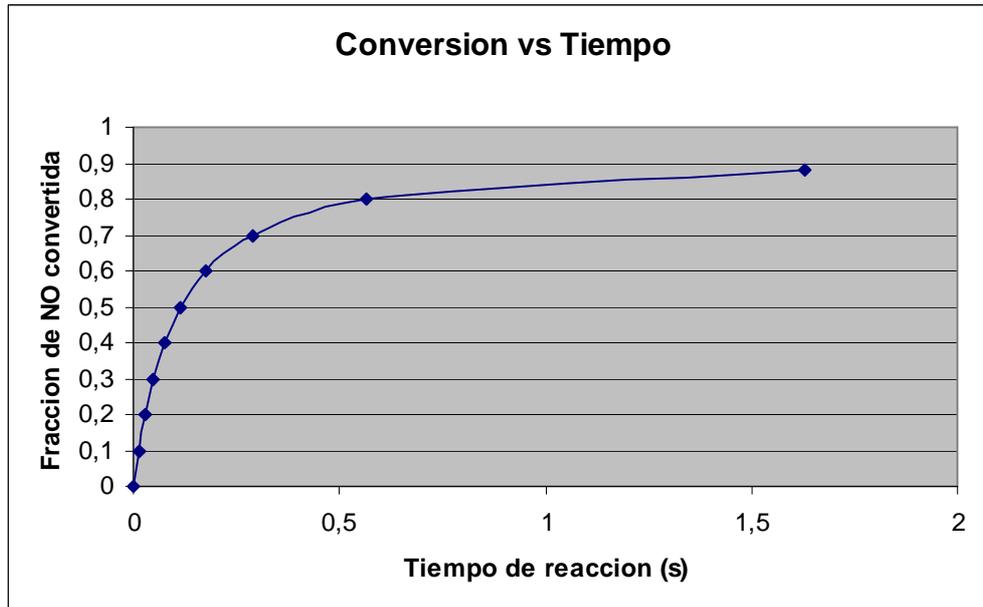


4.1 GRAFICO CONVERSION OXIDO NITRICO VS TIEMPO $[O_3]_o = [NO]_o$.

- Si $[O_3]_o = 0.9[NO]_o$:

4.2 CONVERSION DEL OXIDO NITRICO $[O_3]_o = 0.9[NO]_o$.

Conversión	Tiempo(s)	Volumen(l)
0,88	1,63	541,47
0,8	0,567	188,73
0,7	0,289	96,36
0,6	0,176	58,54
0,5	0,114	37,82
0,4	0,074	24,71
0,3	0,047	15,66
0,2	0,027	9,05
0,1	0,012	3,99
0	0	0

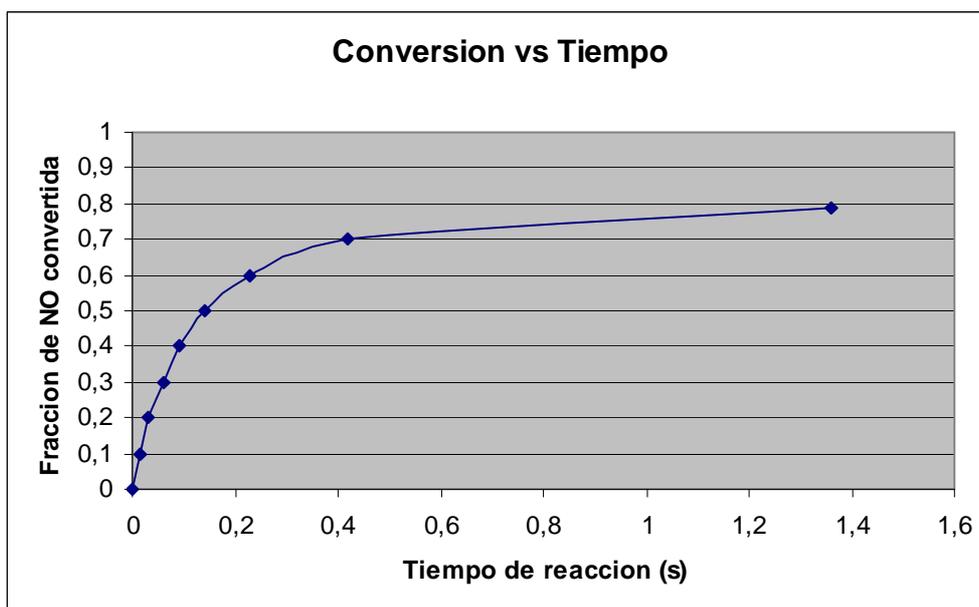


4.2 GRAFICO CONVERSION OXIDO NITRICO VS TIEMPO $[O_3]_o = 0.9[NO]_o$.

- Si $[O_3]_o = 0.8[NO]_o$:

4.3 CONVERSION DEL OXIDO NITRICO $[O_3]_o = 0.8[NO]_o$.

Conversión	Tiempo(s)	Volumen
0.799	2.45	815.57
0,79	1,36	452,94
0,7	0,42	140,54
0,6	0,23	75,45
0,5	0,14	46,18
0,4	0,09	29,27
0,3	0,06	18,19
0,2	0,031	10,36
0,1	0,014	4,52
0	0	0



4.3 GRAFICO CONVERSION OXIDO NITRICO VS TIEMPO $[O_3]_o = 0.8[NO]_o$.

La reacción ocurre en forma rápida, evitando el problema de que otros contaminantes como el dióxido de azufre también se oxiden. El problema radica en el aspecto económico, ya que la generación de ozono tiene altos costos. Analizando estos aspectos se escogió una concentración inicial de ozono del 80% respecto a la del óxido nítrico, teniendo una conversión del NO del 79.9%:

Por tanto el volumen del reactor necesario para que ocurra la reacción es:

$$V_r = 0.83[m^3]$$

$$R = 0.32[m]$$

$$L = 2.6[m]$$

Con un 79.9% de conversión de Óxido Nítrico, se tendrían las siguientes composiciones y flujos de salida del reactor:

4.4 FLUJOS Y CONCENTRACIONES DE COMPONENTES DE GASES DE ESCAPE

Componente	Flujo $\left[\frac{mol}{h}\right]$	Flujo $\left[\frac{kg}{h}\right]$	Concentración Molar $\left[\frac{mol}{l}\right]$	% Molar o Volumétrico
N_2	17144.2	480.04	0.014	75.26
O_2	2998.34	95.95	0.0025	13.16
H_2O	1529.9	27.54	0.00128	6.71
CO_2	1111.66	48.91	0.00093	4.88
CO	3.37	0.094	2.82E-6	1.483E-2
NO	1.845	0.055	1.54E-6	8.09E-3
NO_2	7.355	0.338	6.15E-6	3.23E-2
SO_2	0.0015	0.000096	1.25E-9	6.53E-6

4.2.- DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR:

Seguidamente se continua con la reducción de temperatura, el tratamiento Lotox recomienda que la temperatura de operación este entre ($66^{\circ}C - 121^{\circ}C$), recomendando una temperatura de $80^{\circ}C$, este enfriamiento nos servirá para concentrar los componentes y por ende aumentar sus presiones parciales, ya que se condensa el vapor de agua presente en el, además al disminuir la temperatura aumenta la solubilidad del gas en el solvente. El fluido refrigerante a utilizarse será agua.

A continuación se presentan los cálculos realizados para el diseño del intercambiador de calor:

1. **Tipos de tubos a utilizar:** Se van a utilizar tubos de acero inoxidable, que son los usualmente utilizados en este tipo de intercambiadores, se utilizaran medidas estándar, que son las siguientes:

4.5 CARACTERISTICAS DE TUBOS INTERNOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR⁹⁴.

Diámetro nominal (<i>in</i>)	1.25
Diámetro exterior (<i>m</i>)	0.042
Diámetro interior (<i>m</i>)	0.035
Longitud (<i>m</i>)	2
Área lateral externa (<i>m</i> ²)	0.2639
Área transversal del tubo (<i>m</i> ²)	0.000962

2. Propiedades de los fluidos frío y caliente:

4.6 PROPIEDADES DEL FLUIDO FRIO (AGUA).⁹⁵

Propiedad	Valor
Constante de Conductividad Térmica $\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)$	0.641
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	989
Capacidad Calorífica $\left(\frac{J}{g \cdot ^\circ C}\right)$	4.174
Viscosidad $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$	0.000584
Numero de Prandlt	3.8

⁹⁴ Bohn Kreith.

⁹⁵ Montenegro Lucia.

4.7 PROPIEDADES DEL FLUIDO CALIENTE (GAS DE ESCAPE).⁹⁶

Propiedad	Valor
Constante de Conductividad Térmica $\left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)$	0.0326
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	0.873
Viscosidad $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$	21.75E-6
Numero de Prandlt	0.691

3. **Calculo del área de intercambio provisional:** Iniciamos suponiendo un valor para el coeficiente global de transferencia de calor, tomando como referencia que para sistema gas-agua, se tienen valores entre 10 y 250. Esta área se calcula a partir de la siguiente ecuación:

Ec. [4.12]:

$$A_p = \frac{Q}{U \times LMTD \times F}$$

Donde:

Q= Calor total transferido desde el fluido caliente.

LMTD= Diferencia de temperatura logarítmica media.

F= Factor de corrección de LMTD. Anexo C.

U= Coeficiente global de transferencia de calor.

⁹⁶ Montenegro Lucia

Para sistemas agua-gas el valor de coeficiente global de transferencia de calor varia entre 20 y 100 $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$, se inicia el calculo con un valor supuesto de $30\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$.

El flujo de calor transferido desde el gas hacia el fluido frio (agua) se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

Ec. [4.13]:

$$Q = m \times Cp_g \times T$$

Donde:

$$m = \text{Flujo de gas} \left[\frac{mol}{s}\right]$$

$$Cp_g = \text{Calor molar del gas.} \left[\frac{cal}{K \cdot mol}\right]$$

$$T = \text{Temperatura del gas.} [K]$$

Ec. [4.14]:

$$A_p = \frac{22831.8}{30 \times 91.2 \times 0.82} = 10.18 [m^2]$$

4. Cálculo del número de tubos:⁹⁷

Ec. [4.15]:

$$N_t = \frac{A_p}{A_{LT}}$$

Donde:

$$A_{LT} = \text{Área lateral de un tubo.} [m^2]$$

⁹⁷ Briceño Maria Isabel.

Ec. [4.16]:

$$N_t = \frac{10.18}{0.2639} = 38.6 \approx 39$$

5. Diámetro del casco: El diámetro del casco se lo calcula con la siguiente ecuación:⁹⁸

Ec. [4.17]:

$$Dc = 0.637 \times \sqrt{\frac{M}{C}} \times \sqrt{\frac{A_p \times \left(\frac{Pt}{D_e}\right)^2 \times D_e}{L}}$$

Donde:

A_p = Área provisional. $[m^2]$

A_p = Diámetro externo. $[m]$

Pt = Separación entre tubos. $[m]$

L = Longitud del intercambiador. $[m]$

M = Constante para arreglos cuadrados

C = Constante para intercambiadores de dos pasos.

Ec. [4.18]:

$$Dc = 0.637 \times \sqrt{\frac{1}{0.9}} \times \sqrt{\frac{10.18 \times \left(\frac{0.0525}{0.042}\right)^2 \times 0.042}{2}} = 0.388[m]$$

⁹⁸ Briceño Maria Isabel.

6. Diámetro equivalente: Diámetro equivalente del área transversal del intercambiador.⁹⁹

Ec. [4.19]:

$$Deq = \frac{4 \times \left(Pt^2 - \frac{\pi}{4} \times D_e^2 \right)}{\pi \times D_e}$$

Ec. [4.20]:

$$Deq = \frac{4 \times \left(0.0525^2 - \frac{\pi}{4} \times 0.042^2 \right)}{\pi \times 0.042} = 0.0415[m]$$

7. Distancia entre deflectores: La distancia sugerida entre deflectores(B), debe estar en el rango siguiente.¹⁰⁰

Ec. [4.21]:

$$0.4 \leq D_c \leq 0.6$$

Ec. [4.22]:

$$B = 0.5 \times D_c$$

Ec. [4.23]:

$$B = 0.5 \times 0.388 = 0.194[m]$$

⁹⁹ Briceño Maria Isabel.

¹⁰⁰ Briceño Maria Isabel.

8. Número de deflectores:

Ec. [4.24]:

$$N_B = \frac{L}{B} - 1$$

Ec. [4.25]:

$$N_B = \frac{2}{0.194} - 1 = 9.3 \approx 9$$

9. Área transversal:

Ec. [4.26]:

$$A_t = \frac{(Pt - D_e) \times B \times D_c}{Pt} \times \sqrt{2}$$

Ec. [4.27]:

$$A_t = \frac{(0.0525 - 0.042) \times 0.194 \times 0.388}{0.0525} \times \sqrt{2} = 0.0213 [m^2]$$

10. Área por paso:

Tubos por paso: 20

Ec. [4.28]:

$$A = 20 \times 0.000962 = 0.01924 [m^2]$$

11. Velocidad lineal agua:

Ec. [4.29]:

$$V = \frac{C}{A}$$

Donde:

$$C = \text{Caudal de agua.} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Ec. [4.30]:

$$V = \frac{9.06E-5}{0.01924} = 0.0047 \left[\frac{m}{s} \right]$$

12. Numero de Reynolds

Ec. [4.31]:

$$Re = \frac{v \times \delta \times D_{eq}}{\mu}$$

Ec. [4.32]:

$$Re = \frac{0.0047 \times 989 \times 0.035}{5.84E-4} = 278.58$$

13. Numero de Nusselt:

Caso: Flujo laminar dentro de una tubería: Debido a que el agua fluirá dentro de los tubos siguiendo un comportamiento laminar, utilizamos la siguiente ecuación para calcular el número de Nusselt, la cual es la que más se ajusta al modelo.

Ec. [4.33]:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.03 \times \frac{D_i}{L} \times Re \times Pr}{1 + 0.04 \left(\frac{D_i}{L} \times Re \times Pr \right)^{2/3}}$$

Ec. [4.34]:

$$Nu = 3.66 + \frac{0.03 \times 0.0175 \times 258.78 \times 3.8}{1 + 0.04 (0.0175 \times 258.78 \times 3.8)^{2/3}}$$

$$Nu = 4.09$$

14. Coeficiente de convección del agua:

Ec. [4.35]:

$$hc = \frac{Nu \times K}{D_{eq}}$$

Donde:

K= Constante de conductividad térmica.

Ec. [4.36]:

$$hc = \frac{4.09 \times 0.641}{0.035} = 74.91 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

15. Velocidad lineal del gas:

Ec. [4.37]:

$$V = \frac{C_g}{A_t}$$

Donde:

C_g = Caudal del gas

Ec. [4.38]:

$$V = \frac{0.21}{0.0213} = 9.86 \left[\frac{m}{s} \right]$$

16. Numero de Reynolds del gas:

Ec. [4.39]:

$$Re = \frac{9.86 \times 0.873 \times 0.0415}{21.75E-6} = 16424$$

17. Numero de Nusselt del gas:

Caso: Flujo a través de un banco de tubos: El gas fluirá por el lado de la carcasa a través del banco de tubos, por lo cual aplicamos la siguiente ecuación, para el cálculo del numero de Nusselt:

Ec. [4.40]:

$$Nu = 0.348 \times Re^{0.592} \times Pr^{1/3}$$

Ec. [4.41]:

$$Nu = 0.348 \times 16424^{0.592} \times 0.691^{1/3} = 96.3$$

18. Coeficiente de convección del gas:

Ec. [4.42]:

$$hc = \frac{96.3 \times 0.0326}{0.0415} = 75.65 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

19. Calculo del coeficiente global de transferencia de calor:

Ec. [4.43]:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{74.91} \times 1.2 + \frac{1}{75.65} = 0.0292$$

$$U = 34.24 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Se repite el procedimiento hasta que los resultados converjan, y se obtuvieron los siguientes resultados:

4.8 CARACTERISTICAS FINALES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Tipo de intercambiador	1 paso por carcasa-2 pasos por tubos
Diámetro de la carcasa (m)	0.3523
Numero de Tubos	32
Arreglo de tubos	Cuadrado
Longitud (m)	2

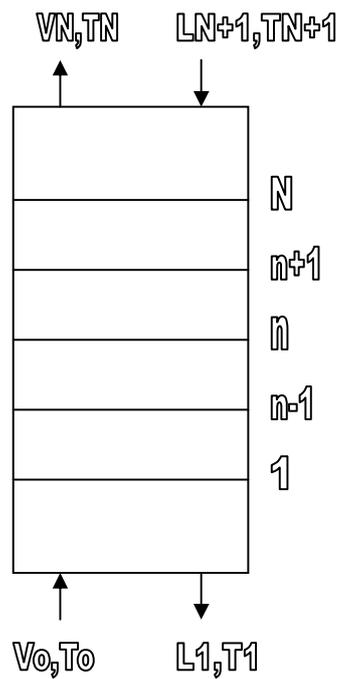
Tipo de tubos:4.9 CARACTERISTICAS DE LOS TUBOS INTERNOS DEL
INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Diámetro nominal (<i>in</i>)	1.25
Diámetro exterior (<i>m</i>)	0.042
Diámetro interior (<i>m</i>)	0.035
Longitud (<i>m</i>)	2
Área lateral externa (m^2)	0.2639
Área transversal del tubo (m^2)	0.000962
Espaciamiento entre tubos (<i>m</i>)	0.0525
Material	Acero inoxidable

4.3.- DISEÑO DE LA COLUMNA:

4.3.1.- CALCULO DEL NÚMERO DE PLATOS TEORICOS:

1.- Datos iniciales:



4.4 VARIABLES DEL PROCESO DE ABSORCION.

- Composición del gas de entrada a la columna (V_o):

4.10 COMPOSICION DEL GAS DE ENTRADA A LA COLUMNA.

Componente	Flujo $\left[\frac{mol}{h} \right]$	y (Fracción molar)
N_2	17144.2	0.806
O_2	2998.34	0.1409
CO_2	1111.66	0.052
CO	3.37	0.00016
NO	1.845	$8.7E-5$
NO_2	7.355	$3.5E-4$
SO_2	0.0015	$7.05E-8$

$$V_o = 21266.8 \left[\frac{mol}{h} \right]$$

$$T_o = 80^\circ C$$

Gas Portador: Nitrógeno. (poca solubilidad con el agua).

Presión de operación: Presión atmosférica del lugar (0.755 atm)

- **Características del solvente:** El agua ingresa a la columna de absorción con una temperatura de $19^\circ C$, su flujo de entrada es una variable que inicialmente se la supone. En la bibliografía se ha encontrado que un óptimo coeficiente de absorción es aquel que esta entre 1.25 y 1.4. (Treybal) Recordemos que el coeficiente de absorción esta dado por: $A = \frac{L}{m \times G}$, desconocemos el valor de m, que dependerá de la

temperatura y presión de operación, así que como prueba inicial tomaremos una relación de flujos $L_s/G_s = 1.6$, para tener una probabilidad alta de estar entre este rango. (relación de gas y líquido puro). Por tanto nuestro flujo de solvente es:

$$L_{N+1} = 27646.8 \left[\frac{\text{mol}}{\text{h}} \right]$$

a) Si $L_s/G_s = 1.6$:

- **Porcentaje de recuperación del componente clave:** Debido a que el mayor objetivo es reducir las emisiones de NOx, tomamos como componente clave, el dióxido de nitrógeno. El porcentaje de recuperación que inicialmente se desea alcanzar es del 90 % .
- **Número de platos supuestos:** 4

2.- Una vez ingresados los datos iniciales, comenzamos suponiendo la fracción que se absorbe en el solvente de cada componente:

$$F_{CO_2} = 0.2$$

$$F_{SO_2} = 0.3$$

$$F_{CO} = 0.1$$

$$F_{NO} = 0.1$$

$$F_{O_2} = 0.1$$

3.- Con estos valores de recuperación se obtienen los siguientes flujos de salida, tanto del gas como del solvente:

4.11 COMPOSICIONPRELIMINAR DEL FLUJO DE GAS Y LIQUIDO DE SALIDA DE LA COLUMNA.

Componente	Flujo de salida (Fase gaseosa) $\left[\frac{mol}{h} \right]$	Flujo de salida (Fase liquida) $\left[\frac{mol}{h} \right]$
NO_2	0.74	6.62
CO_2	889.33	222.33
CO	3.03	0.34
NO	1.66	0.185
SO_2	0.00105	0.00045
O_2	2698.51	299.83

Teniendo un flujo total, tanto de líquido como de gas, los siguientes valores:

$$L_{1S} = 28176.1 \left[\frac{mol}{h} \right]$$

$$V_{NS} = 20737.5 \left[\frac{mol}{h} \right]$$

4.- Para el cálculo de entalpías de cada plato teórico se inicia suponiendo la temperatura de salida del gas, siguiendo el Método de Edmister, por tanto el valor de temperatura supuesto es:

$$T_{NS} = 295[K]$$

5.- A continuación se realiza un balance de energía de la columna, basándonos en la ecuación 3.15, para así obtener el valor de entalpía del líquido de salida y posteriormente su temperatura:

$$H_{L_1} = 651942[KJ]$$

$$T_{1C_1} = 310.53[K]$$

6.- Utilizando la ecuación 3.18 y realizando un balance de masa en cada plato, obtenemos los flujos tanto de líquido como de vapor en cada plato:

4.12 FLUJOS PRELIMINARES DE LIQUIDO Y GAS DE CADA PLATO.

	Flujo total (Fase gaseosa)	Flujo total (Fase líquida)
Numero de Plato	$\left[\frac{mol}{h} \right]$	$\left[\frac{mol}{h} \right]$
1	21133.2	28176.1
2	21000.5	28142.5
3	20868.6	28009.8
4	20737.5	27877.9

7.- Con los flujos de líquido y gas calculados se determina el perfil de temperaturas en la columna a partir de la ecuación 3.19:

4.13 PERFIL DE TEMPERATURA DE LA COLUMNA PREELIMINAR.

	Temperatura
Numero de Plato	$[^{\circ}C]$
1	295
2	305.85
3	301.21
4	296.6

8.- Con los flujos y temperaturas de cada plato, se puede calcular tanto las constantes de equilibrio como los factores de absorción, además del factor de absorción efectivo de Edmister basados en las ecuaciones 3.6 y 3.17 respectivamente, por tanto se tiene:

4.14 CONSTANTES DE EQUILIBRIO Y COEFICIENTES DE ABSORCION
EFECTIVOS PREELIMINARES

Compuesto	$K_{1,i}$	$K_{4,i}$	$A_{E,i}$
NO_2	2.71	1.47	0.59
CO_2	512.1	320.11	0.0026
CO	509.46	466.72	0.0026
SO_2	7.62	4.86	0.19
NO	5621.09	4396.7	0.00024
O_2	764.77	681.03	0.0017

9.- Las fracciones de recuperación serian:

4.15 FRACCIONES DE RECUPERACION PREELIMINARES.

Componente	F_i
NO_2	0.56
CO_2	0.0025
CO	0.0026
SO_2	0.19
NO	0.00024
O_2	0.0017

Por tanto $L_1 = 27658.8 \left[\frac{mol}{h} \right]$

Este flujo es diferente al inicialmente supuesto, por tanto iniciamos una nueva iteración, en la que las nuevas fracciones supuestas, son las que se calcularon anteriormente y la temperatura supuesta de salida del gas es la temperatura calculada en el paso 7 ($T_4 = T_{N_s}$).

Los resultados finalmente obtenidos son los siguientes:

4.16 RESULTADOS FINALES DE COEFICIENTES DE ABSORCION

Y FRACCIONES RECUPERADAS PARA $L_s/G_s = 1.6$.

Compuesto	$K_{1,i}$	$K_{4,i}$	$A_{E,i}$	F_i
NO_2	2.671	1.466	0.581	0.551
CO_2	505.70	318.98	0.0016	0.0025
CO	508.27	466.41	0.0026	0.0026
SO_2	7.53	4.85	0.185	0.19
NO	5584.26	4388.57	0.00023	0.00023
O_2	762.40	680.43	0.0017	0.0015

Por tanto $L_1 = 27658.1$

Finalmente, este valor de L_1 coincide con el calculado anteriormente por lo que no es necesario otra iteración. Consecuentemente para una columna de 4 platos operando a presión atmosférica y en condiciones adiabáticas, tenemos los siguientes resultados:

4.17 RESULTADOS FINALES DE FLUJOS DE LIQUIDO Y VAPOR EN CADA PLATO

$$\text{PARA } \frac{L_s}{G_s} = 1.6$$

Numero de Plato (n)	$L_n \left(\frac{mol}{h} \right)$	$V_n \left(\frac{mol}{h} \right)$	$T_n (K)$
1	27658.1	21263.9	310.14
2	27655.2	21261	305.53
3	27652.3	21258.2	300.91
4	27649.5	21255.4	296.5

Seguidamente se realizaron cálculos con diferentes relaciones de flujo, a continuación se presentaran algunas de ellas, en las cuales los cambios fueron importantes.

b) $\frac{L_s}{G_s} = 1.75$, se obtuvieron los siguientes resultados:

4.18 RESULTADOS FINALES DE FLUJOS DE LIQUIDO Y VAPOR EN CADA PLATO PARA

$$\frac{L_s}{G_s} = 1.75$$

Numero de Plato (n)	$L_n \left(\frac{mol}{h} \right)$	$V_n \left(\frac{mol}{h} \right)$	$T_n (K)$
1	29785.8	21263.7	308.72
2	28782.7	21260.6	304.51
3	29779.6	21257.5	300.29
4	29776.5	21254.4	296.1

4.19 FRACCIONES DE RECUPERACION Y COEFICIENTES DE ABSORCION FINALES PARA

$$L_s/G_s = 1.75$$

Compuesto	$K_{1,i}$	$K_{4,i}$	$A_{E,i}$	F_i
NO_2	2.52	1.44	0.659	0.61
CO_2	482.93	0.004	0.0029	0.0027
CO	0.0028	465.18	0.0028	0.0028
SO_2	7.21	4.78	0.207	0.21
NO	5451.4	4355.2	0.00026	0.00026
O_2	753.79	678.06	0.0019	0.0016

Con las relaciones de flujo planteadas anteriormente se obtienen fracciones de recuperación de 0.55 y 0.61 respectivamente de NO_2 , como el objetivo es tener una fracción de recuperación mayor, se analizaron los resultados obtenidos, lo que genero los siguientes razonamientos:

1. Basados en la bibliografía, si un coeficiente de absorción es menor a la unidad, probablemente se necesiten infinito número de platos para lograr la recuperación deseada, como los coeficientes de absorción obtenidos hasta el momento son menores a la unidad el aumentar otro plato tendría un efecto bajo en nuestro porcentaje de recuperación. Para comprobar esto se hicieron los cálculos necesarios para una columna de 5 platos teóricos y se logro una recuperación del 57 % de NO_2 , lo que confirma que no hay un aumento significativo en la recuperación.
2. La recta de operación no debe cortar a la recta de equilibrio, para que se produzca la absorción, gracias a los cálculos anteriores se puede ver entre qué valores varia K , que es la pendiente de la recta de equilibrio, la bibliografía manifiesta que el valor de L/G ,

que es la pendiente de la recta de operación, debe ser mayor a K . Debido a que los valores de K son altos, se necesita una mayor cantidad de solvente L para así tener un coeficiente de absorción mayor a la unidad, $L/(K \times G)$, por esto se probó con varias relaciones de líquido-gas, y la relación presentada continuación es la adecuada para alcanzar la fracción de recuperación deseada.

c)

$$L_s/G_s = 2.5$$

$$L_s = 42860.5 \left[\frac{\text{mol}}{\text{h}} \right] \Rightarrow 0.772 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \Rightarrow 772 \left[\frac{\text{l}}{\text{h}} \right]$$

4.20 RESULTADOS FINALES DE FLUJOS DE LIQUIDO Y VAPOR EN CADA PLATO

$$L_s/G_s = 2.5$$

Numero de Plato (n)	$L_n \left(\frac{\text{mol}}{\text{h}} \right)$	$V_n \left(\frac{\text{mol}}{\text{h}} \right)$	$T_n (K)$
1	42874.4	21263.3	303.54
2	42870.9	21259.8	300.63
3	42867.4	21256.4	297.73
4	42864	21252.9	294.9

FRACCIONES DE RECUPERACION Y COEFICIENTES DE ABSORCION FINALES

$$L_s/G_s = 2.5$$

Compuesto	$k_{1,i}$	$k_{4,i}$	A_{Ei}	F_i	% Recuperación
NO_2	2.01	1.36	1.15	0.85	85
CO_2	406.73	301.35	0.005	0.005	0.5
CO	488.06	461.48	0.0041	0.0041	0.41
SO_2	6.12	4.6	0.35	0.35	35
NO	4982.57	4258.45	0.0004	0.0004	0.04
O_2	722.52	670.94	0.0028	0.0024	0.24

Con esta relación de flujo se logra obtener un 85 % de recuperación muy cercano al requerido, incrementaría porcentaje de recuperación al 90 % requeriría demasiada cantidad de solvente.

4.3.2.- CALCULO DEL DIAMETRO DE LA COLUMNA:

Primeramente se tiene que determinar el flujo de gas por área, para lo cual utilizamos la ecuación 3.20:

Ec [4.44]:

$$X = \frac{625.031}{772.260} \times \left(\frac{0.77}{996 - 0.77} \right)^{1/2} = 0.034$$

Utilizando el Anexo D, para el valor de X obtenido se tiene el siguiente valor de Y:

$$Y = 0.014$$

El siguiente paso es seleccionar el tipo de relleno a utilizar, en este caso se decidió emplear anillos raschig de cerámica de 2 pulgadas, cuyo factor de empaque F es igual a 65 (Anexo E), con este valor y la ecuación 3.21 calculamos el flujo másico G:

Ec [4.45]:

$$0.014 = \frac{G^2 \times 65 \times (0.867)^{0.1}}{0.77 \times (996 - 0.77) \times 9.81}$$

$$G = 1.28 \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$$

Por tanto el área de la columna es:

Ec [4.46]:

$$A = \frac{m}{G} = \frac{0.174 \left[\frac{kg}{s} \right]}{1.28 \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]} = 0.136 [m^2]$$

Donde:

$$A = \text{Área de la columna. } [m^2]$$

$$G = \text{Flujo másico del gas por unidad de área. } \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$$

$$m = \text{Flujo másico del gas. } \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Una vez calculada el área de la columna, se determina el diámetro que debe tener la columna:

Ec [4.47]:

$$A = \pi \times R^2$$

$$0.136 = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$D = 0.42[m]$$

Donde:

D = Diámetro de la columna. $[m]$

R = Radio de la columna. $[m]$

Como la relación entre el diámetro obtenido y el tamaño de empaque esta entre 8 y 15, se considera que este tipo de relleno es adecuado para la columna.

4.3.3.- CALCULO DE LA ALTURA DE COLUMNA:

Para el cálculo de la altura de la columna iniciamos calculando el número de Reynolds según la ecuación 3.25:

Ec [4.49]:

$$Re = \frac{1.42 \times 0.77 \times 0.42}{20.3E^{-6}} = 24237.9$$

Con este valor se va a la grafica del anexo F y se determina el valor de Y:

$$Y=0.0017$$

$$0.0017 = \frac{k_y}{G_M} Sc^{2/3} \cdot 10^{-1}$$

A continuación se calcula el coeficiente de difusión utilizando la ecuación 3.27, que es necesario para el cálculo del número de Schmidt, ecuación 3.26:

Ec [4.50]:

$$D_{NO_2-AIRE} = \frac{1.013E^{-7} \times 322.5^{1.75} \times \left(\frac{1}{46} + \frac{1}{28.8} \right)^{0.5}}{P \left((16.65)_{NO_2}^{1/3} + (20.1)_{aire}^{1/3} \right)^2}$$

$$D_{NO_2-AIRE} = 2.9E^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Ec [4.51]:

$$Sc = \frac{20.3E^{-6}}{0.77 \cdot 2.9E^{-5}} = 0.91$$

Finalmente, se puede calcular k_y :

$$0.0017 = \frac{k_y}{35.02} 0.91^{2/3} .$$

$$k_y = 0.634$$

Con estos valores calculamos HTU, NTU y la altura de la columna utilizando las ecuaciones 3.22, 3.23 y 3.24, (Nota: Se debe emplear el factor de absorción del componente de interés (componente clave):

Ec [4.52]:

$$HTU = \frac{35.02}{0.634 \times 95} = 0.581$$

Ec [4.53]:

$$NTU = \frac{\ln\left(\frac{1}{1.15}\right)}{\left(\frac{1}{1.15} - 1\right)} \times 4 = 4.29$$

Ec [4.54]:

$$Z = 0.581 \times 4.29 = 2.49[m]$$

4.3.4.- CARACTERISTICAS DE LA COLUMNA:

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla que continuación se presenta:

4.22 CARACTERISTICAS DE LA COLUMNA DE ABSORCION.

Diámetro	0.42 [m]
Altura de Relleno	2.5 [m]
Tipo de relleno	Anillos Raschig de cerámica de 2 pulgadas.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El presente proyecto se ha enfocado en el análisis de tratamientos secundarios, ya que en la teoría consultada y mencionada en este documento, los métodos de tratamiento primario (precombustión) tienen eficiencias significativamente más bajas que los tratamientos secundarios.
- Se ha seleccionado un método de tratamiento para la reducción de NO_x para una fuente fija de combustión, entre un sin número de tratamientos existentes. Dicho tratamiento se basa en un proceso de oxidación, el cual reduce la concentración de óxidos nítricos en un 85 % en las emisiones de salida.
- Los criterios de selección del método de tratamiento han sido, fundamentalmente, eficiencia y condiciones de operación, sin embargo, se podría añadir el criterio económico y analizar si otro tratamiento resultara más factible.
- El tratamiento aplicado en este proyecto es un proceso basado en la teoría recopilada sobre los tratamientos de reducción de NO_x existentes, especificado para fuentes fijas de combustión de bajas temperaturas; el cual fue adecuado para el generador en estudio.
- El tratamiento involucra el diseño de una columna de absorción multicomponente, la cual se la ha diseñado empleando el Método de Edmister; para ello se ha determinado el número de platos teóricos que debe tener la columna, a partir de balances de masa y energía; y aplicando todos los fundamentos de transferencia de masa, específicamente en lo que respecta a absorción gaseosa.

- El tratamiento del solvente utilizado sería el próximo paso a tomar, una alternativa sugerida podría ser utilizarlo en el intercambiador de calor para enfriar las emisiones de gas.
- La columna diseñada en este proyecto para la recuperación del 85 % del emisiones de NO_x tiene una altura de relleno de 2.5 m, un diámetro de 0.42 m y se utilizara como material de relleno anillos raschig de cerámica de 2 pulgadas.
- Para reducir la temperatura de entrada del gas a la columna se diseñó un intercambiador de carcasa y tubos, de 0.3523 [m] de diámetro y 2 [m] de largo, el cual consta de 32 tubos de 1.25 [in] de diámetro, con arreglo cuadrado.
- El consumo de agua en lo que se refiere a la columna es de $772 \left[\frac{l}{h} \right]$ y el flujo de agua necesaria para el intercambiador de calor es de $326.16 \left[\frac{l}{h} \right]$.
- Finalmente, el diseño realizado logra una reducción efectiva de la concentración de NO_x en un 85 %, sin embargo se recomienda realizar un estudio de costos de implementación del mismo para determinar si es económicamente factible.

BIBLIOGRAFIA

1. Bohn, Kreith, **Principios de Transferencia de Calor**, Editorial Thomsom, Sexta edición, 2001.
2. Briceño Maria Isabel, **Intercambiadores de Calor**, Mérida, 2005.
3. Calero Natali, **Determinación del Numero de Etapas de Equilibrio y Diámetro en Columnas de Absorción para Sistemas Multicomponentes**, Tesis, 2006.
4. California Air Resources Board Innovative Clean Air Technology, **Low Temperature Oxidation System**, California, 2001.
5. Chang Raymond, **Química**, Editorial Mc Graw Hill, Séptima Edición.
6. Coulson J., Richardson J, **Ingeniería Química**, Editorial Reverte, Tercera Edición, 1988, España.
7. Couper J., Fair J, Penney W., **Chemical Process Equipment, Selection and Design**, Editorial Elsevier, Segunda Edición, United States of America, 2005.
8. Environmental Protection Agency, **Tecnología de Control de Contaminación del Aire**, 2008.
9. Environmental Protection Agency, **Alternative Control Techniques Document- NOx emissions from Stationary Gas Turbines**, 2008.
10. Geankoplis Christie, **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**, Editorial Continental, México, 1998.
11. Instituto Ecuatoriano de Normalizacion, Hojas técnicas, Mayo 2008.
12. Jachiyán A.S., **Motores de Combustión Interna**, Editorial Mir Moscu, U.R.S.S, 1985.
13. Kates J. Edgar, **Motores Diesel y de gas de Alta compresión**, Editorial Reverte, Segunda edición, España, 1982.
14. Mc Cabe, Smith, Harriot, **Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**, Editorial Mc Graw Hill, Sexta Edición, 2001.
15. Montenegro Lucia, **Material Auxiliar para la Cátedra de Transferencia de Calor I**, Octubre 2003.

16. Parreño María Lorena, **Diagnostico de la Contaminación Atmosférica por Óxidos de Nitrógeno y Selección de la Mejor Alternativa Tecnológica para su Reducción en la Central Termoeléctrica Guangopolo-Termopichincha S.A.**, Tesis de Grado, Quito Mayo de 2006.
17. Perry Robert, **Manual del Ingeniero Químico**, Editorial Mc Graw Hill, Séptima edición, España, 2001, Volumen 3, Capitulo 14.
18. Sociedad Publica de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco, **Guía Técnica para la Medición, Estimación y Calculo de las Emisiones al Aire**, Editorial Ihobe, 2003.
19. Treybal, Robert, **Mass Transfer Operations**, Editorial Mc Graw Hill, 1980.
20. Whitten K., Galey K., **General Chemestry**, Editorial Sounders Golden Sunburst, Segunda Edicion,1981.