

DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DESDE UN QUEMADOR CHIMENEA

EUDO NAVA¹, CÉZAR GARCÍA², NEYMA GARCÍA³, ANALÍ MACHADO³ Y KARINA MARTINEZ¹

¹ Universidad del Zulia, Escuela de Ingeniería Química,
Apartado 4011-A-526, Maracaibo, Venezuela.

² Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, División de Postgrado.

³ Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Centro de investigaciones CEDEGAS.
e-mail: kmartinez@luz.edu.ve

Recibido: junio de 2005

Recibido en forma final revisado: abril de 2007

RESUMEN

En este trabajo de investigación se desarrollan las ecuaciones de transferencia de momentum, calor y masa para un quemador chimenea y la dispersión gaussiana para la estabilidad atmosférica de la ciudad de Maracaibo. En primer lugar, se analizan las variables operacionales con las dimensiones adecuadas para responder a los requerimientos de un complejo petroquímico, a saber: i) Tasa másica de alimentación; ii) Composición de mezcla de hidrocarburos; iii) Velocidad de vientos y temperatura ambiental; iv) Longitud de llama; v) Control sónico-Numero de Mach; vi) Coordenadas de seguridad. En la segunda parte, se analiza la dispersión atmosférica de los gases de combustión por intermedio de las variables: i) Tasa de emisión de SO₂ y NO₂, ii) Altura de dispersión como longitud de llama iii) Estabilidad atmosférica; iv) Coeficientes de dispersión. Los resultados demuestran que para la obtención de condiciones operacionales estables de incineración por intermedio de un numero de Mach optimo entre 0,20 y 0,30, es necesario establecer los valores de tasa másica entre 400.000 lbm/hr y 600.000 lbm/hr, composición molar menor al 70% y peso molecular de hidrocarburos entre 16 y 36 en la alimentación del quemador chimenea.

Palabras clave: quemador, chimenea, dispersión atmosférica, estabilidad atmosférica, Maracaibo.

ATMOSPHERIC DISPERSION FROM FLARE STACK

ABSTRACT

In this study we develop momentum, heat and mass transfer equations for a flare stack and Gaussian dispersion equations for atmospheric stability in the city of Maracaibo. First, the operational variables according to the proper dimension of the flare stack so that it may respond to complex petrochemical requirements, such as: i) mass feed rate; ii) hydrocarbon mixture composition; iii) wind speeds and surrounding temperature; iv) flame length; v) sound control and mach number; and vi) safety coordinates. The second part of the study analyses the atmospheric dispersion of gas combustion through these variables: i) emission rates of SO₂ and NO₂; ii) dispersion height; iii) atmospheric stability; and iv) dispersion coefficients. The results show that the stable operating condition of flare stacks based on an optimum mach number between 0,20 and 0,30 requires a feed rate between 400.000 lbm/hr and 600.000 lbm/hr, molar composition less than 70% and molecular weight of hydrocarbons mixture between 16 and 36.

Keywords: flare, stack, atmospheric dispersion, atmospheric stability, Maracaibo.

INTRODUCCIÓN

En muchas operaciones industriales y especialmente en las plantas petroquímicas y refinerías de petróleo se producen grandes volúmenes de gases combustibles de desperdicio.

El método tradicional para el control del exceso de gases y vapores es recuperarlos en un sistema de purga de operación. Sin embargo, los grandes volúmenes de gases, especialmente los generados durante condiciones anormales de operación y de emergencia, son difíciles de almacenar y

reprocesar. Hasta hace algunos años, todos los gases de desperdicio se venteaban directamente en la atmósfera, a pesar de los problemas causados al medio ambiente. En la actualidad, la práctica de tratamiento consiste en alimentar dichos gases a un sistema abierto de incineración y descargar los productos a la atmósfera.

Si el gas de desecho contiene materiales orgánicos los cuales son combustibles, la incineración puede producir emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y vapor de agua que son descargados a la atmósfera. Incineración es un proceso de combustión para destruir ciertos componentes tóxicos del gas, es el control de emisiones orgánicas, la oxidación completa de vapores o gases orgánicos emitidos de cualquier operación o proceso.

Escalona (1997), analizó el dimensionamiento y la ubicación de un sistema de mechurrios, a través de un programa computarizado el cual requiere como datos: el flujo másico, peso molecular, temperatura, relación de capacidades caloríficas, velocidad del viento, máxima radiación a nivel del suelo y emisividad de la llama; el programa calcula además el número de Mach, el calor liberado, y la longitud de llama. Los resultados mostraron altas sensibilidades de la altura y diámetro del mechurrio sobre la radiación a nivel del suelo.

Barrientos (2000), estableció comparaciones sobre los criterios para la selección de mechurrios y métodos para calcular el tamaño básico de los mismos, de igual manera su investigación contiene una amplia referencia sobre los cálculos de radiación de mechurrio, el número de Mach, el nivel de ruido y longitud de llama, en particular para control de gases provenientes de la producción de petróleo.

Es evidente que en todo proceso de quema de gases de desperdicio existe el riesgo de que se afecte el personal de trabajo, materiales, plantas, animales y población por la presencia de radiación y las emisiones de contaminantes como SO₂ y NO₂, los cuales al no cumplir con la normativa de calidad del aire pueden tener consecuencias que perjudican el medio ambiente.

Se han realizados trabajos de investigación (Rossell *et al.*, 1995; Rincón y Gendry, 2000; García *et al.*, 2000, 2003a, 2003b) orientados a medir y evaluar los niveles de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo, pero son pocos los trabajos que se han realizado con el fin de evaluar el diseño de los quemadores chimeneas y su papel como medio de dispersión. Por estas razones los objetivos de este trabajo son:

- Desarrollar las ecuaciones de transferencia de momentum, calor y masa para un quemador chimenea y su programación en lenguaje de simulación.

- Acoplar el modelo de dispersión de Turner a las condiciones de llama del quemador chimenea en atención a la estabilidad de la atmósfera de la ciudad de Maracaibo.
- Incorporar las condiciones operacionales de un quemador chimenea en el análisis de dispersión de gases poluentes hacia la ciudad de Maracaibo.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta sección contiene en su primera parte el análisis de un quemador chimenea, esto es, los balances globales de transferencia de momentum, calor y masa para la combustión de n-componentes gaseosos en el tope de la chimenea.

En la segunda parte se desarrolla el modelo de dispersión gaussiana de Turner con los parámetros de dispersión de Pasquill-Gifford (1963) y de Briggs-Dispersión Urbana a partir de la longitud de llama como altura adicional de dispersión, $\Delta H=L$.

Análisis de un Quemador Chimenea (Kent, 1968; Tan, 1968; García, 1978).

Considerando un quemador chimenea de múltiples alimentaciones, la carga másica total del incinerador es $\dot{m} = \sum \dot{m}_i$, de composición $\sum y_i = 1.0$ y peso molecular promedio:

$$w = \sum y_i \cdot w_i \quad (1)$$

donde:

w_i es el peso molecular del componente i .

El poder calorífico a condiciones estándar de 60 °F, y 14,7 psia, para cualquier hidrocarburo i es aproximadamente $h_i = 50w_i + 100$ y para la mezcla:

$$h_M = \sum y_i \cdot h_i \quad (2)$$

El calor total desprendido por la combustión de la mezcla, es:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \frac{h_M}{w} \cdot v_M \quad (3)$$

donde:

\dot{m} es la carga másica total de la mezcla gaseosa a incinerar (lbm/h), \dot{Q} el calor total desprendido por combustión de la mezcla gaseosa (BTU/h), h_M el poder calorífico de la mezcla

(BTU/ft³), w el peso molecular promedio de la mezcla (lbm/lbmol) y v_M el volumen molar a condiciones standard (379 ft³/lbmol).

El calor radiante q a cualquier distancia x desde el centro de la llama a un punto P sobre la superficie terrestre, a distancia y y desde la base del quemador chimenea, tal como se ilustra en la figura 1, asumiendo que el calor desprendido por la llama es uniformemente distribuido a lo largo de la longitud de la llama, puede ser calculado como:

$$q = \frac{\varepsilon \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot x^2} \quad (4)$$

donde:

ε es la emisividad de la llama, y depende de la luminosidad de la misma, así para metano $\varepsilon=0,20$, para propano $\varepsilon=0,33$ y para cualquier hidrocarburo de peso molecular w_i , $\varepsilon_i = 0,05 \cdot w_i^{1/2}$; también dicho parámetro puede estimarse en función del poder calorífico como $\varepsilon_i = 0,20 \cdot (h_i / 900)^{1/2}$ y para una mezcla dada:

$$\varepsilon = 0,20 \cdot (h_M / 900)^{1/2} \quad (5)$$

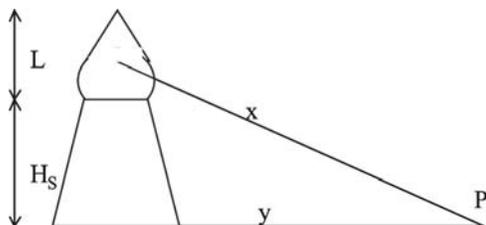


Figura 1. Coordenadas de localización de un quemador chimenea.

El efecto del flujo de calor por radiación sobre humanos puede resumirse así: la intensidad de radiación solar es 440 BTU/hr-ft² a la cual deben trazarse radios de seguridad personal desde el quemador chimenea, una intensidad de calor de 2000 BTU/hr-ft² para un tiempo de exposición de 8 segundos causa dolor sobre la piel humana, mientras para un tiempo de 20 segundos causa ampollas, un flujo de calor de 5000 BTU/hr-ft² causa ampollas para un tiempo de exposición de 5 segundos. La deshidratación de la madera ocurre a 500°F, la descomposición a 700°F y la ignición alrededor de 800°F, para los correspondientes flujos de calor 1300, 3000 y 4000 BTU/hr-ft², respectivamente. Esto significa que cualquier vegetación y estructuras de madera expuestas a calores radiantes de 3.000 a 4.000 BTU/hr-ft² pueden incendiarse. Obviamente cuanto mayor es la altura del

quemador chimenea, la disipación del calor radiante ocurre en un radio menor desde la base del quemador. Los siguientes valores de calor radiante deben observarse en la localización del quemador chimenea (Rincón y Gendry, 2000):

Para una intensidad de calor de 440 BTU/hr-ft² la observación es comparable a la radiación solar terrestre, para flujos de calor ≥ 1500 BTU/hr-ft² la observación indica protección requerida para personal y para una intensidad de calor 3000 BTU/hr-ft² la observación indica protección requerida para equipos.

Bajo la suposición de que el calor es uniformemente distribuido a lo largo de la longitud L de llama, Q/L constante, la intensidad del calor radiante máxima resulta:

$$q_{\max} = \int_{H_s}^{H_s+L} \frac{\varepsilon \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot x^2} \cdot dx \rightarrow q_{\max} = \frac{\varepsilon \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot H_s (H_s + L)} \quad (6)$$

Los valores máximos del calor radiante como función del tiempo de exposición para seguridad personal se presentan en la figura 2.

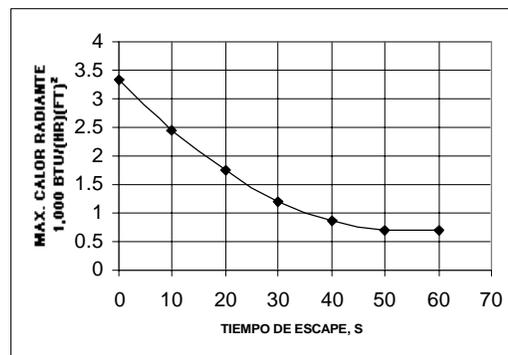


Figura 2. Máximo calor radiante como función del tiempo de escape.

En términos de diseño significa que una persona situada en la base del quemador chimenea en el instante de propagación del calor radiante (para un tiempo de 5 segundos de reacción) debe correr a una velocidad de escape de 20 ft/s en un tiempo de escape t_c para el cual la intensidad del calor radiante no representa riesgo personal. En la ecuación 6 se observa que el máximo calor radiante se obtiene en correspondencia con la ecuación 4 si se define $H_s(H_s + L) = x_{\min}^2$, de donde se obtiene la altura del quemador chimenea:

$$H_s = \frac{-L + \sqrt{L^2 + 4x_{\min}^2}}{2} \quad (7)$$

En la medida que aumenta la distancia x , disminuye la intensidad del calor radiante hasta el valor de seguridad personal $q = 440 \text{ BTU/hr} \cdot \text{ft}^2$, así el valor máximo de x :

$$x_{\max}^2 = \frac{\varepsilon \cdot Q}{(4\pi)(440)} \quad (8)$$

De la carga total de desechos gaseosos a incinerar, puede determinarse la velocidad de descarga de las emisiones en el tope del quemador así:

$$V_{\text{em}} = \frac{4 \cdot m}{\rho_s \cdot D^2} \quad (9)$$

La densidad de la mezcla puede estimarse por la ecuación de estado $\rho_s = (w/359)(P/P_o)(T_o/T)$, donde $P_o = 14,7$ psia, $T_o = 32 + 460 = 492^\circ \text{K}$. Una vez iniciada la combustión la llama se propaga con una velocidad equivalente a la del sonido en las emisiones. Para condiciones de régimen laminar la llama tiende a una elipse para valores de Reynolds por debajo de 3.000. Por encima de 5.000 la llama se hace inestable, una vez descargados los gases con velocidad V_s , la llama tiende a separarse del extremo del diámetro D .

La longitud de la llama depende del diámetro del quemador como función entre la velocidad de descarga de las emisiones y la velocidad del sonido en las emisiones (número de Mach).

$$\text{Mach} = \frac{V_{\text{em}}}{V_s} \quad (10)$$

La velocidad del sonido en las emisiones está dada por:

$$V_s = \sqrt{g_c \cdot k \cdot R \cdot T / w} \quad (11)$$

donde:

$g_c = 32,174 \text{ lbf} \cdot \text{ft} / \text{lb} \cdot \text{s}^2$, R es la constante universal de los gases ($1546 \text{ lbf} \cdot \text{ft} / \text{K} \cdot \text{lbmol}$), T es la temperatura ambiental $^\circ \text{R}$, w el peso molecular promedio de la mezcla y k es la relación de capacidades caloríficas:

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\sum y_i w_i k_i}{w} \quad (12)$$

Sustituyendo (9) y (11) en (10), resulta:

$$\text{Mach} = \frac{4 \cdot m}{\pi \rho_s \cdot D^2 \sqrt{g_c \cdot k \cdot R \cdot T / w}} \quad (13)$$

Según muestra la figura 3, para condiciones de descarga estable los valores de Mach deben ubicarse entre 0,20 y 0,30, implicando que la longitud de llama dependerá del Mach.

Correlacionando dichos valores se puede escribir así:

$$L = 20,46 \cdot \text{Ln}(\text{Mach}) + 156,01 \quad (14)$$

La distancia y desde la base del quemador chimenea al punto P donde la intensidad de calor sea comparable a la radiación solar, puede determinarse usando las ecuaciones del triángulo:

$$y = x_{\max}^2 - H_s H_s L^{1/2} \quad (15)$$

Sustituyendo (7) en (15):

$$y = \sqrt{x_{\max}^2 - x_{\min}^2} \quad (16)$$

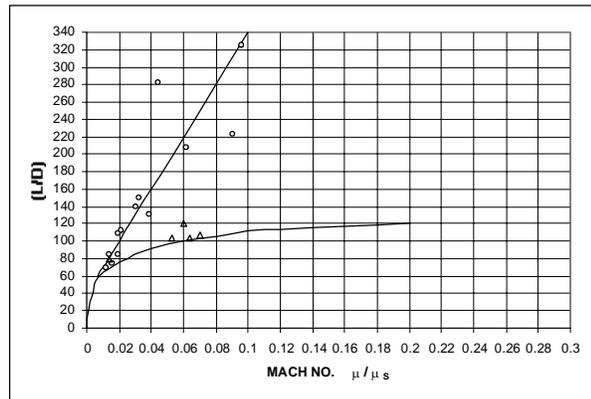


Figura 3. Relación longitud de Llama-Diámetro del quemador como función del Número de Mach.

El valor de y debe ser corregido si por acción de los vientos, se tiende a doblar la llama por lo que y' deberá ser mayor por seguridad personal:

$$y' = \left\{ x_{\max}^2 - |H_s + (x_{\min} - H_s) \cos \theta|^2 \right\}^{1/2} + (x_{\min} - H_s) \sin \theta \quad (17)$$

$$\theta = \arctg \frac{V_x}{V_s} \quad (18)$$

donde:

V_x es la velocidad del viento y V_s es la velocidad de descarga de las emisiones.

El tiempo de escape para una velocidad de 20 ft/s es:

$$t_e = \frac{y}{V_e} \quad (19)$$

Modelo de Dispersión Atmosférica de Turner (1994)

La ecuación de concentración para una fuente elevada con reflexión se presenta en la siguiente expresión:

$$C_{(x,y,z,H)} = \frac{Q}{2 * \pi * u * \sigma_y * \sigma_z} * \exp\left(\frac{-y^2}{2 * \sigma_y^2}\right) * \left(\exp\left(\frac{-(Z-H)^2}{2 * \sigma_z^2}\right) * \exp\left(\frac{-(Z+H)^2}{2 * \sigma_z^2}\right)\right) \quad (20)$$

donde:

$C_{x,y,z}$ es la concentración del contaminante (lbm/ft³), Q la tasa de emisión del contaminantes (lbm/s), u la velocidad del viento en el punto de liberación (ft/s), σ_y la desviación estándar de la distribución de concentración en la dirección transversal a una distancia x viento debajo de la fuente (ft), σ_z la desviación estándar de la distribución de concentración en la dirección vertical a una distancia x viento debajo de la fuente (ft), z altura desde el suelo (ft), x la distancia viento abajo a lo largo de la línea central de la pluma (ft), y distancia transversal desde la línea central de la pluma (ft) y H altura efectiva (ft)

Para el sistema de coordenadas: $x = 0$ en el foco (chimenea), $y = 0$ en la línea central del penacho, $z = 0$ en el suelo.

El modelo de dispersión de Turner depende de los coeficientes de difusividad turbulento σ_y , σ_z en las direcciones y , z como función de la dirección preferencial de los vientos (x); tales coeficientes de dispersión se diferencian a su vez según la estabilidad atmosférica de Pasquill (1963) y García *et al.*, (2003a). Para la estimación de los coeficientes de dispersión vertical y horizontal se emplean las ecuaciones de Pasquill-Gifford.

MARCOMETODOLÓGICO

La utilización de Flare Stacks o simplemente mechurrios chimeneas tiene doble objetivo, por un lado la incineración de mezcla gaseosa de desecho a través de una combustión abierta con una relación aire-combustible de infinito y por otro la dispersión atmosférica de los productos de combustión según las condiciones meteorológicas de la ciudad de Maracaibo.

De esta manera, en primer lugar se analizan las variables operacionales de un Flare Stack con las dimensiones adecuadas para responder a los requerimientos de un complejo petroquímico, a saber:

- i) Velocidad de alimentación de los desechos gaseosos, tasa másica.
- ii) Composición y peso molecular de hidrocarburos.
- iii) Velocidad de los vientos y temperatura ambiental.
- iv) Longitud de llama.
- v) Control sónico por número de Mach.
- vi) Coordenadas de seguridad.

En la segunda parte de este trabajo de investigación se establecen los efectos de los parámetros operacionales sobre la longitud de llama como altura adicional de dispersión para el análisis por el modelo de Turner, y se consideran las siguientes variables:

- i) Tasa de emisión de Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno.
- ii) Longitud de llama y efectos asociados.
- iii) Estabilidad atmosférica para la ciudad de Maracaibo.
- iv) Coeficientes de Dispersión según los modelos de Pasquill Gifford y de Briggs Urbano.

Para el análisis de las ecuaciones del quemador chimenea y de los parámetros de diseño y las variables de operación, se consideró promediar estadísticamente los parámetros meteorológicos de la ciudad de Maracaibo correspondientes al periodo 1998-2001, aportados por la estación meteorológica de la Fuerza Aérea de Venezuela y se procedió a determinar la clase de estabilidad atmosférica de acuerdo con el método de clasificación de Pasquill (1963), según se reporta en la tabla 1.

Se estimaron las concentraciones de SO₂ y NO₂ basado en los modelos de dispersión Gaussiana con los coeficientes de dispersión de Pasquill Gifford y Briggs Urbana, utilizando un programa de computación en lenguaje Fortran. Se establecieron valores referenciales para la obtención de la tasa de emisión basados en el balance de materiales con reacción química, así como en los porcentajes de azufre o nitrógeno presentes en la mezcla combustible.

Tabla 1. Datos meteorológicos horarios promedio en la ciudad de Maracaibo para el periodo 1998-2001.

H	V (m/s)	D (Grado)	T (°C)	I	N (Oct.)	EP
1	3,50	36	26,18			D
2	3,39	36	25,84			D
3	3,15	36	25,71			D
4	2,90	36	25,56			C
5	3,15	36	25,38		2	C
6	2,50	36	25,07	1,4	3	C
7	2,57	36	24,83	5,2	4	C
8	3,18	34	25,44	6,6	5	C
9	3,30	36	27,18	7,2	6	C
10	3,20	0,2	28,45	7,4	7	C
11	2,60	0,5	29,60	7,7	6	C
12	3,00	0,7	30,76	7,5	4	B
13	2,90	11	31,27	8,6	4	B
14	3,12	0,7	31,64	8,3	4	B
15	3,46	34	31,83	7,6	5	B
16	3,72	34	31,56	5,4	6	B
17	4,25	34	31,05	1,9	6	C
18	4,91	34	29,90		6	C
19	4,79	34	28,41		7	D
20	5,12	34	27,66		8	D
21	4,27	36	27,22		8	D
22	4,02	34	26,85		7	D
23	3,80	34	26,63		6	D
24	3,80	36	26,42			D
P	3,53		27,94	5,75	5,47	
Pred		36				C

Fuente: Fuerza Aérea Venezolana. H: horas del día, V: velocidad del viento, D: dirección del viento, T: temperatura, I: Insolación, N: Nubosidad (Octavos), EP: Estabilidad Pasquill, P: Promedio, Pred: Predominante.

Los puntos receptores para el análisis de los efectos de los parámetros meteorológicos sobre la dispersión atmosférica del SO₂ y NO₂, se basó en un sistema de coordenadas con tres ejes ortogonales X, Y, Z con el origen del sistema bajo el punto de emisión y haciendo coincidir el eje X con la dirección predominante del viento, los valores de X varían desde 0,1 km. a 10 km y la altura efectiva es la altura del quemador chimenea más la longitud de llama, la cual varía con los parámetros del quemador chimenea.

Los parámetros operacionales del quemador chimenea se identifican para los requerimientos de un complejo petroquímico, alimentación total entre 100.000 lbm/hr y 1.500.000 lbm/hr, fracción molar de hidrocarburos entre 16 g/gmol y 70 g/gmol, porcentaje de azufre en la mezcla de hidrocarburos entre 1% y 5%, porcentaje de nitrógeno en la mezcla de hidrocarburos entre 0.5% y 15%, dimensiones del quemador chimenea: altura 202 pies y diámetro 3 pies.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Influencia de las variables operacionales sobre los parámetros de diseño del quemador chimenea

En el análisis del quemador chimenea, sobre la base de las ecuaciones de transferencia de momentum, calor y masa, se presentan los resultados de los diferentes aspectos relacionados con las variables operacionales.

- Número de Mach:

El número de Mach definido por el cociente entre la velocidad de descarga de las emisiones y la velocidad del sonido en las emisiones, es un parámetro que relaciona la estabilidad del proceso de combustión por intermedio de la calidad sonora, forma y asociación de la llama al tope del quemador.

En la figura 4 se presenta el número de Mach versus la tasa másica, se observa la fuerte incidencia de la tasa másica sobre el número de Mach de manera considerable ya que la ecuación de la velocidad de las emisiones es directamente proporcional al flujo másico. Los valores del Mach resultan entre 0,04 y 0,76 y estos aumentan al incrementar la tasa másica y la temperatura ambiental; es necesario una corriente de carga entre 404.800 lb/h y 600.000 lb/h para la obtención del número de Mach óptimo entre 0,20 y 0,30 para las condiciones estables de incineración.

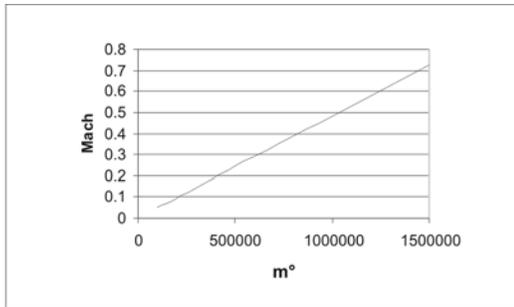


Figura 4. Número de Mach versus flujo másico de la alimentación.

En la figura 5 se grafica el número de Mach a diferentes horas del día (temperatura ambiental) como función de la fracción molar del contenido de hidrocarburos en la alimentación.

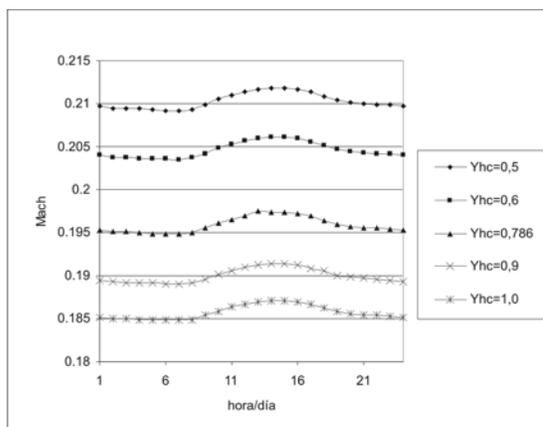


Figura 5. Número de Mach a diferentes horas del día variando fracción molar.

Se observa una variación del número de Mach entre 0,185 y 0,21, los valores disminuyen al aumentar la fracción molar tal como se puede apreciar también en la figura 6, y aumentan al incrementarse la temperatura ambiental entre 10:00 a.m y 8:00 p.m.

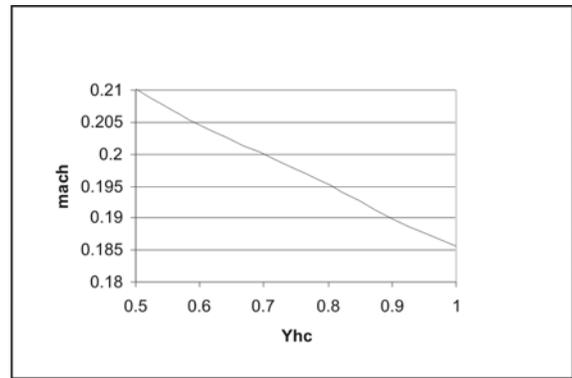


Figura 6. Número de Mach versus fracción molar.

En otras palabras, al aumentar la composición de hidrocarburos en la alimentación en términos de la fracción molar se incrementa el peso molecular y la densidad de la mezcla, disminuyendo la velocidad de descarga de las emisiones y de esta manera el número de Mach disminuye. En atención al rango óptimo operacional del quemador chimenea definido para el número de Mach entre 0,20 y 0,30, la composición molar de hidrocarburo debe ser menor al 70 %.

- Longitud de llama:

La longitud de llama representa la extensión de la combustión con una intensidad de calor radiante distribuida en forma radial en todas las direcciones desde la apreciación esférica de su forma ideal y estable.

En la figura 7 se presenta la variación de la longitud de llama con la tasa de alimentación, los valores de longitud de llama se incrementan considerablemente al aumentar la tasa másica y varían entre 280 y 450 ft para alimentaciones entre 100.000 y 1.500.000 lb/h, por lo que es necesario mantener la alimentación al nivel de diseño o recomendada en el sistema del quemador chimenea.

La figura 8 muestra la variación de la longitud de llama con la composición de hidrocarburos.

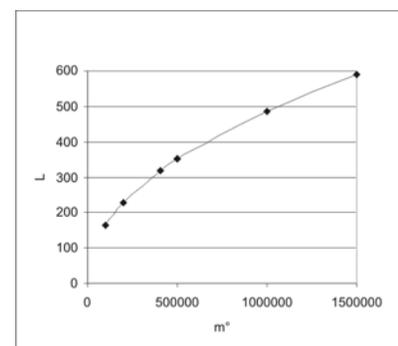


Figura 7. Longitud de llama versus flujo másico.

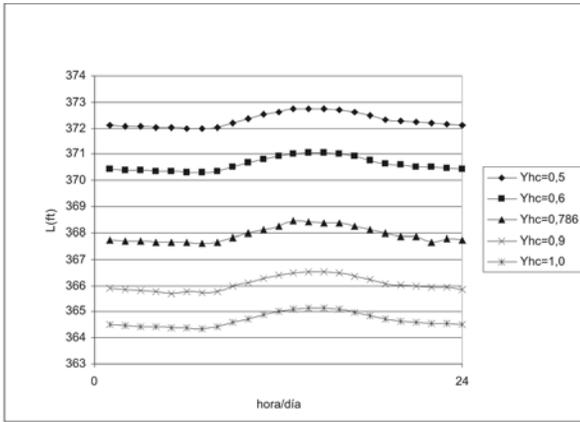


Figura 8. Longitud de llama con respecto a las condiciones de un día variando fracción molar.

La longitud de la llama aumenta ligeramente al elevarse la temperatura y decrece al aumentar la fracción molar de hidrocarburos. Es decir que un incremento en el contenido de hidrocarburos en la alimentación (fracción molar), generaría una disminución de la longitud de llama y por consiguiente, el quemador chimenea reduciría su eficiencia. El valor de longitud de llama varía entre 364,5 y 372,5 ft para el rango de hidrocarburos entre 0,5 y 1,0.

Análisis de la dispersión de SO₂ y NO₂

En la figura 9 se presenta la concentración de SO₂ en la dirección preferencial de los vientos como función de la estabilidad atmosférica, para las 24 horas del promedio meteorológico, a partir de la incineración de una mezcla de hidrocarburos con 1% de S y la estimación de dispersión con los coeficientes de Pasquill Gifford (1963).

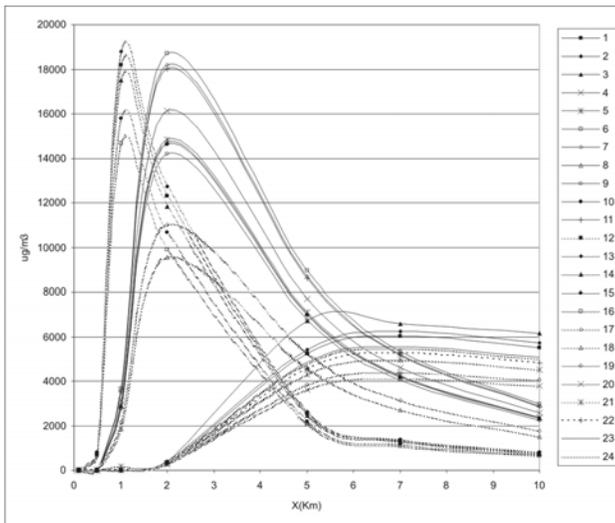


Figura 9. Concentración de SO₂ como función de la distancia debajo de la fuente, %S=1, técnica Pasquill Gifford, variando las horas de un día.

Los resultados proyectan distribuciones tipo gaussianas centradas, para $x=1$ km para la estabilidad B, $x=3$ km para la estabilidad C y $x=6$ km para la estabilidad B, se observaron valores máximos y mínimos como se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Concentración máxima y mínima para diferentes estabilidades atmosféricas.

Clase estabilidad	H. de máx. C.	H. de mín. C.
B	13	16
C	3	18
D	6	20

Se puede destacar que la amplia diferencia entre los valores de concentración para las diferentes estabilidades demuestra que es de vital importancia tener en cuenta los datos meteorológicos y la estabilidad atmosférica en un sistema de quemador chimenea. Se observa un comportamiento similar en las concentraciones de NO₂.

Para las concentraciones de SO₂ estimadas con los coeficientes de Briggs Urbana se observa que los valores máximos y mínimos coincide con las mismas horas ya mencionadas, pero se puede observar que con esta aproximación de Briggs Urbana las concentraciones de SO₂ tienen menor rango de diferencia entre sí respecto a las estabilidades atmosféricas de Pasquill Gifford al igual que las emisiones de NO₂, tal como se muestra en las figuras 10 y 11. En general, se observa alta sensibilidad en la distribución de SO₂ o NO₂ con la estabilidad atmosférica.

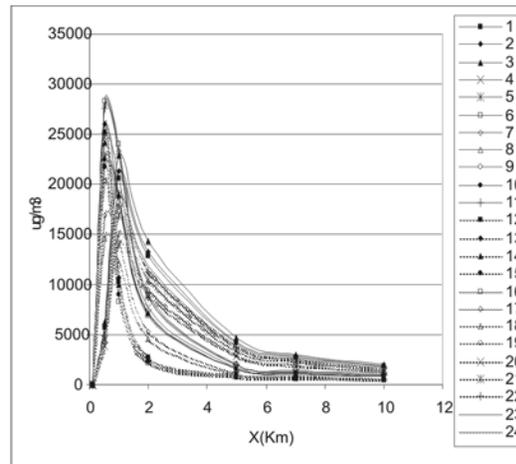


Figura 10. Concentración de SO₂ como función de la distancia debajo de la fuente, %S=1, técnica Briggs Urbana, variando las horas de un día.

En las figuras 12 y 13 se presentan la dispersión de SO₂ y NO₂ variando la composición de hidrocarburos en la alimentación, se puede observar un ligero aumento de las concentraciones al aumentar la composición de los hidrocarburos ya que está relacionada con la longitud de llama y altura efectiva, a mayor composición menor longitud de llama

ma y menor altura efectiva, y a menor altura efectiva aumentan las concentraciones atmosféricas de ambos gases, implicando una disminución del efecto de dispersión.

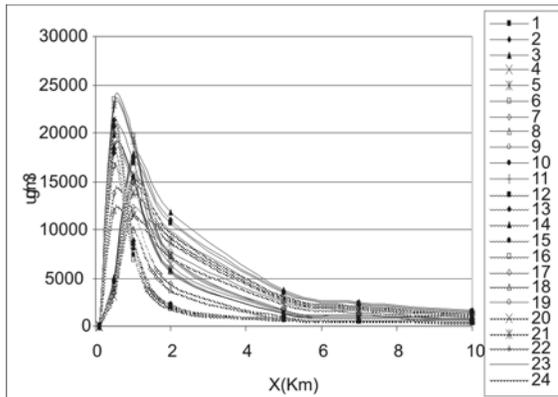


Figura 11. Concentración de NO_2 como función de la distancia debajo de la fuente, %N=0.5, técnica Briggs Urbana, variando las horas de un día.

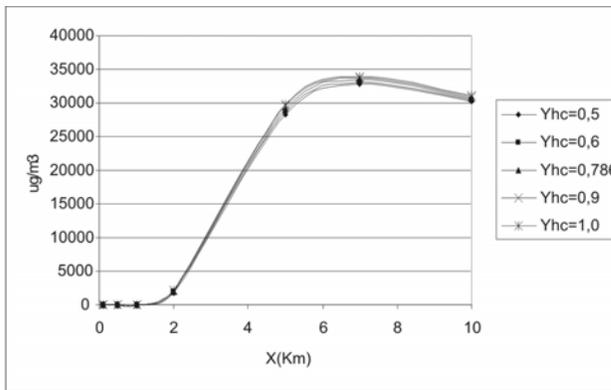


Figura 12. Concentración de SO_2 como función de la distancia debajo de la fuente, técnica Pasquill Gifford, estabilidad D máxima, variando la fracción molar.

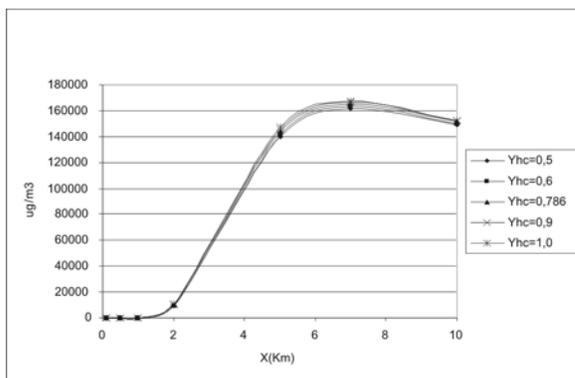


Figura 13. Concentración de NO_2 como función de la distancia debajo de la fuente, técnica Pasquill Gifford, estabilidad D máxima, variando la fracción molar.

En las figuras 14 y 15 se presenta la dispersión de SO_2 y NO_2 variando el peso molecular de hidrocarburos, se puede observar el incremento de las concentraciones al aumentar el peso molecular de los hidrocarburos porque al introducir hidrocarburos con mayor peso molecular disminuye la altura efectiva y aumenta la concentración de SO_2 y NO_2 . Puede inferirse que a menor distancia de la dirección del viento existe mayor riesgo de concentraciones altas al incinerar hidrocarburos con mayor peso molecular en un sistema de quemador chimenea.

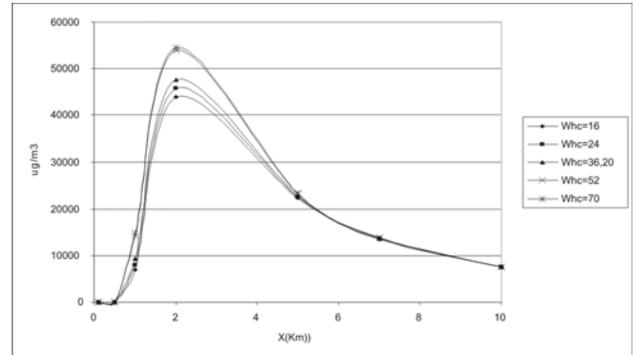


Figura 14. Concentración de SO_2 como función de la distancia debajo de la fuente, técnica Pasquill Gifford, estabilidad C mínima, variando el peso molecular.

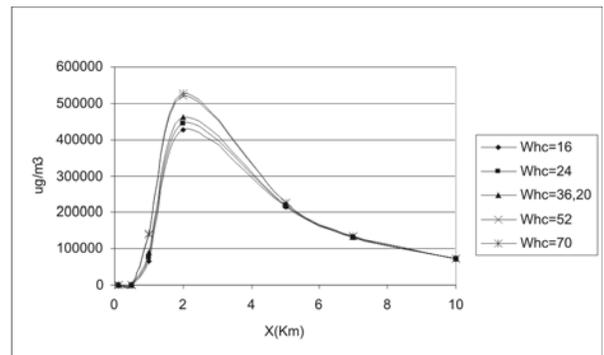


Figura 15. Concentración de NO_2 como función de la distancia debajo de la fuente, técnica Pasquill Gifford, estabilidad C máxima, variando el peso molecular.

En las figuras 16 y 17 se presentan la dispersión de SO_2 y NO_2 variando la longitud de llama, indicando que al aumentar la longitud de llama disminuye la concentración de SO_2 y NO_2 , al aumentar la longitud de llama, se incrementa la altura efectiva lo cual causa una disminución de las concentraciones en las coordenadas X, Y, Z.

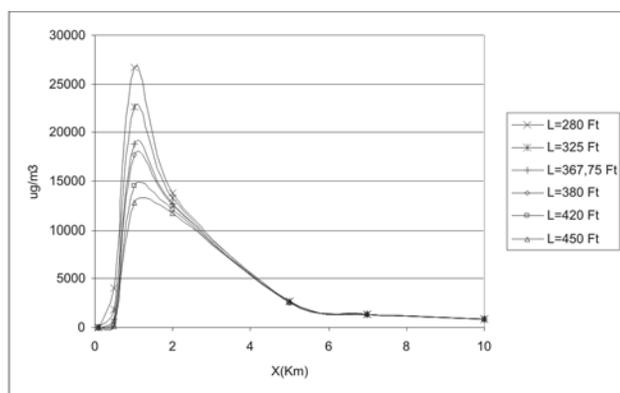


Figura 16. Concentración de SO_2 como función de la distancia debajo de la fuente, técnica Pasquill Gifford. Estabilidad B, variando la longitud de la llama.

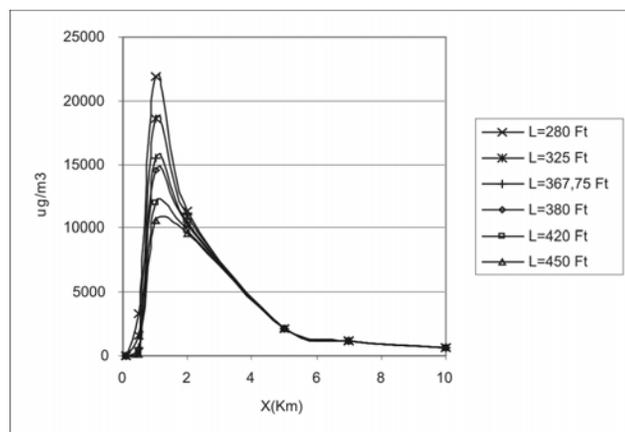


Figura 17. Concentración de NO_2 como función de la distancia debajo de la fuente, técnica Pasquill Gifford. Estabilidad B, variando la longitud de la llama.

Comparación de las concentraciones de SO_2 y NO_2 estimadas con los parámetros de dispersión de Pasquill Gifford y de Briggs Urbana y con la norma de calidad

Se observan diferencias de estimación tanto en las máximas concentraciones como en las distancias donde se espera que ellas ocurran; para ambos gases haciendo uso de los coeficientes de Briggs para las estabildades B, C, D, se reportan valores mayores que los estimados por Pasquill Gifford en 1,4; 1,5 y 3,5 veces respectivamente. Es decir, se manifiesta una marcada discrepancia entre las concentraciones estimadas por ambas técnicas, la diferencia que se hace más notable es cuando se considera predominante la clase de estabilidad D.

Una posible explicación a dicho comportamiento debe ser a los conceptos manejados en las derivaciones analítico experimentales de ambas técnicas. Los parámetros de

Pasquill Gifford se consideran apropiados para áreas rurales mientras los de Briggs Urbana son representativos de condiciones urbanas, reflejando la influencia de:

- i) Incremento de la turbulencia mecánica generado por el esfuerzo constante del viento sobre las superficies.
- ii) Incremento en la turbulencia térmica durante las horas vespertinas y nocturnas, como un resultado de la liberación del calor urbano almacenado en las estructuras y pavimentos durante el día.

En virtud de lo anteriormente expuesto y sobre la base de lo reportado en otras investigaciones (Rincón, 2000; Rojano *et al.*, 2000)) luce lógico afirmar que de las dos técnicas aplicadas, la de Briggs Urbana debe ser capaz de modelar de forma más representativa el proceso de dispersión estudiado.

Cabe destacar que esta investigación constituye un intento por describir el transporte atmosférico asociado con un quemador chimenea, en términos de un modelo y sus parámetros asociados con limitaciones inherentes, pero con la certidumbre de que debe ser mejorado para formular adecuadamente el fenómeno en un medio tan dinámico e impredecible.

De la comparación del perfil de concentraciones para ambos gases con los diferentes límites y porcentajes establecidos en el artículo 3, Decreto # 638 de la Gaceta Oficial de Venezuela (1995), tomando como referencia las condiciones que arrojarían en un tiempo determinado las mejores condiciones de dispersión y, por consiguiente, las menores concentraciones atmosféricas, a saber: la menor tasa másica, el menor porcentaje en peso Nitrógeno y Azufre en el combustible, y el horario de emisión para el que se detectaron las mínimas concentraciones para la mayor inestabilidad atmosférica (estabilidad B); sobre la base de lo expuesto, puede afirmarse que aún en esas condiciones tan favorables desde el punto de vista ambiental, en teoría la casi totalidad de las concentraciones estimadas sobrepasaron los límites permitidos, especialmente a menores distancias en la dirección del viento, en presencia de una menor estabilidad y mayor porcentaje de muestreo.

CONCLUSIONES

Del análisis de las variables operacionales y de dispersión atmosférica del quemador chimenea, se derivan las siguientes conclusiones:

Para la obtención de condiciones operacionales estables por intermedio de un número de Mach óptimo, es necesario

establecer los valores de flujo másico entre 400.000 y 600.000 lbm/hr, composición molar menor al 70 % y peso molecular de los hidrocarburos entre 16 y 36 en la alimentación del quemador chimenea.

Un sistema de quemador chimenea constituye una fuente emisora de contaminantes como Dióxido de Azufre y Nitrógeno en las zonas cercanas al mismo, estimándose concentraciones en el rango de 0,0027 a 389.010 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el SO_2 y 0,1364 a 1.917.300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el NO_2 .

Existe alta sensibilidad entre los valores de concentración para las diferentes estabilidades tanto con la técnica de Pasquill Gifford como la de Briggs Urbana, por lo cual para la estimación de concentraciones es de vital importancia tener en cuenta los datos meteorológicos y la estabilidad atmosférica en un sistema de quemador chimenea.

A menor distancia en la dirección del viento existe mayor riesgo de concentraciones altas al incinerar hidrocarburos con mayor peso molecular en un sistema de quemador chimenea.

Las concentraciones estimadas de NO_2 y SO_2 sobrepasan los límites permitidos de los niveles de calidad del aire de la norma venezolana aún en las condiciones más favorables desde el punto de vista ambiental y a las más bajas condiciones operacionales, especialmente a menor distancia de la dirección del viento y a mayor porcentaje de muestreo.

REFERENCIAS

- BARRIENTOS J., (2000): *Diseño de quemador-chimenea*. División de Postgrado, LUZ, Publicación Interna, Maracaibo, p. 20.
- BRIGGS G. A., (1971). *Some recent analyses of plume rise observations, Proceeding of The Second International Clear Air Congress*. Englund H. M. and BARRY W. T. Editors Academic Press, New York, pp. 1029-1032.
- ESCALONA A., (1997): *Diseño del Sistema de Mechurrios de la Planta de Inyección de Gas alta Presión de Corpoven S.A en San José de Amaná*. PDVSA-CIED, Paraguaná, p. 275.
- GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA, (1995): *Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica*. Decreto No 638. No. 4899, Caracas, Venezuela, pp. 1-6.
- ^aGARCÍA C., MACHADO A., GARCÍA N., CARDENAS C., GONZÁLEZ W., MARTÍNEZ J. Y YABROUDI S., (2003): Evaluación comparativa de la concentración de SO_2 vientos arriba de una planta termoeléctrica. *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, 26(2); pp. 78-92.
- ^bGARCÍA C., MACHADO A., ROSSELL N., CARDENAS C., RESTREPO H., INCIARTE M. Y YABROUDI S., (2003): Análisis integral de chimeneas como medio de dispersión de SO_2 . *Ciencia*, 2(2); pp. 177-192.
- GARCÍA C., ROSSELL N., RUJANO R., (2000): Efecto de las variables operacionales y meteorológicas en la dispersión atmosférica del SO_2 . *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, 23(2); pp. 150-160.
- GARCÍA C., (1978): *Evaluación Cuantitativa de Polución del Aire*. Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, LUZ, Maracaibo, p. 265.
- GIFFORD F. A., Atmospheric dispersion calculations using the generalized gaussian plume model. *Nuclear Safety*, 52(2); pp. 56-68.
- KENT G. R., (1968): *Practical Design of Flare Stacks, Waste Treatment and Flare Stack Design Handbook, Hydrocarbon Processing*. Gulf Publishing Co., Huston, pp 86-90.
- PASQUILL F., (1963): The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorology Mag.*, 90; pp. 33-49.
- RINCÓN G., (2000): *Modelo de Dispersión Atmosférica del SO_2 desde Chimeneas de la Planta Termoeléctrica Ramón Laguna*. Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Maracaibo, p. 175.
- RINCÓN P., GENDRY J., (2000): *Modelo de Dispersión Atmosférica del SO_2 desde Chimeneas de la Planta Termoeléctrica Ramón Laguna*. Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, L.U.Z. Maracaibo, p. 163.
- ROJANO R., ROSSELL N. Y GARCÍA C., (2000): Efecto de las variables operacionales y meteorológicas en la dispersión atmosférica del SO_2 . *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, 23; 150-160.
- ROSSELL N., VELÁSQUEZ H. Y LINARES T., (1995): Niveles atmosféricos de SO_2 , PST y Sulfatos alrededor de una planta termoeléctrica en época seca. *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, 15(2); pp. 79-85.
- TAN S., (1968): *Flare System Design Simplified, Waste Treatment and Flare Stack Design Handbook, Hydrocarbon Processing*. Gulf Publishing Co., Huston, pp 81-85.
- Turner B. (1994): *Atmospheric dispersion estimates*. Lewis Publishers, London, Second Edition, Chapter 2, pp. 2.1-2.38.