

Análisis integral de chimeneas como medio de dispersión del dióxido de azufre

César García*, Analí Machado, Neyma García, Carmen Cárdenas y Harlan Restrepo, Marelis Inciarte y Suher Yabroudi

Escuela de Ingeniería Química, División de Postgrado, Facultad de Ingeniería, La Universidad del Zulia, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela

Recibido: 03-04-02 Aceptado: 27-06-03

Resumen

En el presente trabajo se analiza la aplicación del modelo de Briggs de dispersión atmosférica urbana, basado en el principio Gaussiano, para estimar las concentraciones de dióxido de azufre y un modelo de transferencia de calor para estimar la temperatura de salida de los gases efluentes de combustión y el punto de rocío ácido a través de chimeneas. Para la estimación de las concentraciones de SO₂ se empleó un programa de computación en lenguaje FORTRAN, basado en la teoría de Turner sobre dispersión atmosférica; para estimar la temperatura de salida de los gases y para el punto de rocío ácido se utilizó un programa de computación en lenguaje Visual Basic, basado en los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección en la chimenea y en el modelo de Verhoff - Banchemo para calcular el punto de rocío ácido. Para la aplicación del modelo se considera la planta termoelectrica Ramón Laguna ubicada en la ciudad de Maracaibo, ya que constituye potencialmente una importante fuente emisora de dióxido de azufre en zonas cercanas a la misma. Para el diseño del experimento, se determinaron datos horarios de las condiciones meteorológicas de: velocidad del viento, temperatura, estabilidad atmosférica y la altura de la capa de inversión. Se estimaron datos operacionales de la fuente tales como, tasa de emisión, diámetros y altura de la chimenea. Las concentraciones estimadas de SO₂ resultaron sensibles ante variaciones de datos meteorológicos como la velocidad del viento y la clase de estabilidad y ante cambios en parámetros operacionales como tasa de emisión, composición y temperatura del gas efluente. La temperatura de salida estimada presentó una alta sensibilidad respecto a la temperatura de entrada de los gases a la chimenea y al flujo másico de los gases de combustión y ante cambios significativos en las condiciones ambientales como velocidad del viento y temperatura ambiental. La temperatura de rocío ácido es función de la composición del combustible y por tanto de la composición del gas efluente. Para poder trabajar sin presencia de condensación de ácido sulfúrico se debe considerar el flujo másico mínimo y la temperatura de los gases efluentes.

Palabras clave: Chimenea; Dispersión de SO₂; punto de rocío ácido; transferencia de calor.

* Autor para la correspondencia. E-mail: cgarcia@luz.ve

Integral analysis of stacks as devices for sulfur dioxide dispersion

Abstract

In Maracaibo city the thermoelectric plant Ramón Laguna represents a potential source of SO₂ emissions for zones closed to it. This paper presents an analysis of application of Briggs Model for atmospheric dispersion in urban areas in order to estimate the SO₂ concentrations and a heat transfer model to calculate the exit temperature of combustion gases from the chimney and its comparison with the acid dew point. For the estimation of SO₂ concentrations was used a program in Fortran language based on the dispersion theory developed by Turner, while for the exit temperature and the acid dew point were utilized a program in Visual Basic language based on convection and conduction heat transfer mechanisms along the chimney and on the Verhoff - Banchero Model respectively. For the experimental designs it determined hourly dates of meteorological conditions of: wind speed, temperature, atmospheric stability and inversion layer height. The operational dates of the source were estimated as emission rate, entry temperature, fuel composition, diameters and height chimney. The results show that the SO₂ concentrations are sensible to variations of the meteorological conditions as speed wind and class stability and by the operational parameters as the emission rate, fuel composition and the exit temperature.

Key words: Acid dew point; chimney; heat transfer; SO₂ dispersion.

Introducción

Se han realizado numerosos trabajos de investigación orientados a medir y evaluar los niveles de dióxido de azufre en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo, pero son pocos los efectuados con el fin de evaluar las chimeneas como medio de dispersión de efluentes gaseosos y la influencia de sus variables operacionales en la distribución eficiente de los componentes presentes.

Vacca (1) en 1985 realizó un trabajo cuyo objetivo fundamental fue medir los niveles de SO₂ en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo y compararlos con los valores reportados para ese mismo contaminante, y así, de esa forma, ver el incremento de los mismos, como también compararlos con los estándares de calidad del aire y evaluar los posibles efectos en la salud. Los resultados obtenidos en los diferentes puntos de muestreo, colocados en sitios estratégicos de la ciudad, reportaron valores 20 veces mayores en algunos casos que

los reportados en el año 1975, indicativo del incremento en el índice de contaminación por SO₂ en el transcurso de esa década. Las concentraciones promedios encontrados en las estaciones de muestreo fueron 119 mg/m³ al Norte, 101 al Sur, 59 al Este y 39 al Oeste. Concluyéndose en la década el área estudiada está notablemente influenciada por el tránsito de vehículos automotores y las actividades industriales.

En 1990, se realizó un trabajo para determinar los niveles de concentración de SO₂, PST y en el área de una zona adyacente a la planta termoeléctrica Ramón Laguna por parte de Velasquez (2). Las concentraciones promedio de SO₂ encontradas en las estaciones de muestreo fueron: 95,08 µg/m³ en el sitio A (SSO de la planta), 18,45 µg/m³ en el sitio B (OSO de la planta), 17,81 µg/m³ en el sitio C (OSO de la planta), 29,99 µg/m³ en el sitio D (S de la planta) y 19,31 µg/m³ en el sitio E (N de la planta). Lo cual permitió establecer que la planta termoeléctrica constituye una

fueron importantes de SO_2 , PST y en el área, fundamentalmente durante el período seco. Los niveles de SO_2 no sobrepasaron los estándares nacionales de calidad del aire; solamente durante el período seco se observaron altos valores de concentración del SO_2 que contrastan ampliamente con los bajos valores medidos durante el período de lluvia.

Rojano (3) en 1998 realizó un estudio sobre el análisis del efecto de las variables operacionales y meteorológicas en la dispersión atmosférica del SO_2 en la zona aledaña a la planta termoeléctrica Ramón Laguna. En este trabajo se analizó la aplicación de un modelo Gaussiano de dispersión atmosférica desarrollado por Pasquill-Gifford (4, 5) para estimar concentraciones de SO_2 . Para los cálculos de las concentraciones se empleó un programa de computación en lenguaje Fortran, basado en la teoría de Turner (6) sobre dispersión atmosférica. El modelo presenta alta sensibilidad, ante variaciones de datos meteorológicos y operacionales, observándose las mayores variaciones con los cambios de la velocidad del viento y la altura física de la chimenea, y generando resultados razonables, obteniéndose mínimas discrepancias entre las medidas experimentales y calculadas entre los puntos de muestreo estudiados. La zona de ubicación de la fuente en estudio, representa un área sensible para la ubicación de nuevas fuentes fijas de contaminación atmosférica. Las máximas concentraciones se alcanzan a una distancia de 2,110 m con un valor de 1,409,70 mg / m^3 para la estabilidad B, a 4,344 m con valores de 1,030 mg / m^3 para la estabilidad C y a 21,586 m con valores de 321,46 para la estabilidad D. De todas las clases de estabilidad atmosférica según el principio de Pasquill, la clase de estabilidad C es la que presenta menor discrepancia entre las medidas calculadas y experimentales.

Rincón (7) analizó la aplicación de cuatro modelos de dispersión atmosférica del SO_2 desde chimeneas de la planta termoeléctrica. Para los cálculos de las concentra-

ciones se emplearon dos programas de computación; uno en lenguaje Fortran donde se encuentran incluidas tres técnicas de dispersión, la de Pasquill-Guifford (4,5), la de Briggs Rural(8) y la de Briggs Urbano (8); el otro programa realizado en Excel incluye la técnica de Christian (9). El modelo de Briggs Urbano fue el único que presentó resultados razonables obteniéndose mínimas discrepancias entre las medidas experimentales y las calculadas, en los ocho puntos de muestreo que se estudiaron. Existen diferentes rangos de distancias alrededor de la planta, ubicados en la dirección del viento a nivel del suelo, que presentan las más altas concentraciones, las cuales sobrepasan el límite de calidad del aire de 80 mg / m^3 .

El objetivo del presente trabajo es realizar un análisis integral de las chimeneas como medio de dispersión del SO_2 y aplicarlo a la Planta Termoeléctrica Ramón Laguna ubicada en el Municipio Maracaibo del Estado Zulia. Para ello es necesario establecer los balances de calor y masa alrededor de una chimenea para relacionar los parámetros de diseño con las variables operacionales de la unidad de combustión y con los criterios de calidad para la dispersión de SO_2 según la estabilidad atmosférica predominante en el área de estudio.

Fundamentos Teóricos

El uso de chimeneas como medio de dispersión atmosférica para gases de combustión a elevadas temperaturas, genera procesos de transferencia de calor entre el seno de la mezcla gaseosa y el aire circundante. La pérdida del calor sensible distribuido a través de las paredes internas y externas de la chimenea reduce la temperatura de mezcla y aumenta la posibilidad de lluvia ácida al aproximarse ésta a la temperatura de rocío ácido (10).

Considerando una chimenea cilíndrica cónica de altura H_c , de diámetro y radio internos $D_{ic}=2R_{ic}$ a la entrada y $D_{is}=2R_{is}$ a la salida, t el espesor de la chimenea. Sea:

\dot{m} tasa másica de los gases a la entrada de la chimenea, kg/h o lbm/h

T_e , temperatura de entrada a la chimenea de los gases de combustión, K

T_S , temperatura de salida de los gases de combustión, K

T_a , temperatura ambiental del aire circundante, K

La tasa de transferencia de calor por conducción, a través de un cilindro hueco de radios R_1 , R_2 , de conductividad térmica k , en régimen estacionario, está dada por

$$d\dot{Q} = 2\pi k \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} dl \quad [1]$$

T_{w2} temperatura de la superficie de radio R_2 y
 T_{w1} temperatura de la superficie de radio R_1 .

La tasa de transferencia de calor por convección para los gases en movimiento y en contacto con la superficie sólida de transporte, está dada por la Ley de Enfriamiento de Newton.

$$d\dot{Q} = 2\pi Rh(T_w - T_f)dl \quad [2]$$

T_w temperatura de la superficie en contacto con el fluido a 1.a temperatura T_f

h coeficiente convectivo de transferencia de calor.

A la posición z de la chimenea y de radios R_1 , R_2 para la Figura 1 las tasas de transferencia de calor pueden expresarse así:

i) Convección de calor desde el seno del gas de Temperatura T_i hasta la superficie interna de la chimenea de radio R_1 y temperatura T_{wi}

$$d\dot{Q} = 2\pi R_1 h_i (T_i - T_{wi}) dl \quad [3]$$

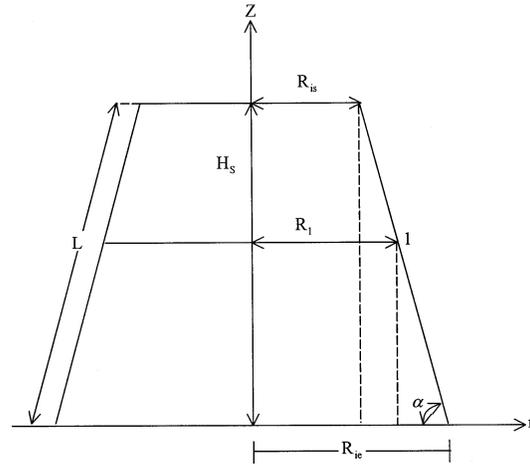


Figura 1. Relaciones geométricas de la chimenea.

ii) Conducción de calor desde la superficie interna de radio R_1 de temperatura T_{wi} hasta la superficie externa de radio R_2 de temperatura T_{wo}

$$d\dot{Q} = 2\pi k \frac{T_{wi} - T_{wo}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} dl \quad [4]$$

iii) Convección de calor entre la superficie externa de radio R_2 y temperatura T_{wo} y el medio circundante (aire) de Temperatura T_a

$$d\dot{Q} = 2\pi R_2 h_o (T_{wo} - T_a) dl \quad [5]$$

La expresión global de transferencia de calor entre el seno de los gases de combustión y el medio circundante a la chimenea es:

$$T_i - T_a = \frac{d\dot{Q}}{2\pi R_1 h_i} \frac{1}{dl} + \frac{\ln(R_2/R_1)}{2\pi k} + \frac{1}{2\pi R_2 h_o} \quad [6]$$

La expresión diferencial de transferencia de calor para los gases de combustión en función de la temperatura media de la mezcla es:

$$d\dot{Q} = \dot{m} C_{v,T} dT_i \quad [7]$$

donde $C_{V,T}$ capacidad calorífica de la mezcla.

Igualando las expresiones anteriores, resulta

$$\frac{dT_i}{T_i - T_a} = \frac{1}{m C_{V,T}} \frac{d\ell}{\frac{\hat{E}}{A} \frac{1}{2\rho R_1 h_1} + \frac{\ln R_2/R_1}{2pk} + \frac{1}{2\rho R_2 h_2}} \quad [8]$$

Integrando desde la base hasta el tope, se obtiene:

$$\ln \frac{T_s - T_a}{T_e - T_a} = D_0^L \frac{1}{m C_{V,T}} \frac{d\ell}{\frac{\hat{E}}{A} \frac{1}{2\rho R_1 h_1} + \frac{\ln R_2/R_1}{2pk} + \frac{1}{2\rho R_2 h_2}} \quad [9]$$

Por las relaciones geométricas indicada en la Figura 1, se obtiene

$$\cos \alpha = \frac{R_{ie} - R_{is}}{L} = \frac{R_{ie} - R_1}{1} \quad [10]$$

$$\text{o sea } 1 = [(R_{ie} - R_1)/(R_{ie} - R_{is})]L \quad [11]$$

y en forma diferencial

$$d\ell = - \frac{L}{R_{ie} - R_{is}} dR_1 \quad [12]$$

Expresando la ecuación integral en función de la variable radial,

$$\ln \frac{T_e - T_a}{T_s - T_a} = \frac{L}{R_{ie} - R_{is}} D_0^{R_{is}} \frac{1}{m C_{V,T}} \frac{dR_1}{\frac{\hat{E}}{A} \frac{1}{2\rho R_1 h_1} + \frac{\ln R_2/R_1}{2pk} + \frac{1}{2\rho R_2 h_2}} \quad [13]$$

Donde, los radios o diámetros internos y externos están relacionados por el espesor de la chimenea, así:

$$D_2 = D_1 + 2e \text{ ó } R_2 = R_1 + e \quad [14]$$

La longitud L en función de la altura H_s y radios R_{is} , R_{ie}

$$L^2 = H_s^2 + (R_{ie} - R_{is})^2 \quad [15]$$

Los coeficientes de transferencia de calor pueden expresarse en función de los diámetros D_1 y D_2 y de las variables termodinámicas asociadas. Para los gases de combustión fluyendo dentro de la chimenea, la expresión del Número de Nusselt (Nu) puede determinarse de acuerdo a la ecuación de Dettus-Boelter [11],

$$Nu = 0.023 Re^{0.80} Pr^{0.30} \quad [16]$$

donde:

Re: número de Reynolds

Pr: Número de Prandtl = $\mu C_{P,T}/k$

puede escribirse así:

$$h_1 = 2.44 C(P,T) m^{0.80} / D_1^{1.80} \quad [17]$$

$$\text{Donde } C(P,T) = \frac{k^{0.60} C_{P,T}^{0.40}}{m^{0.40}} \quad [18]$$

Para el aire atmosférico circundante a la chimenea, la ecuación de Ganapathy (11),

$$Nu = 0.33 Re^{0.60} Pr^{0.33} \quad [19]$$

puede escribirse así:

$$h_0 = 0.90 f(P,T) \frac{G^{0.60}}{D_2^{0.40}} \quad [20]$$

$$\text{donde } f(P,T) = \frac{k^{0.67} C_{P,T}^{0.33}}{m^{0.27}} \quad [21]$$

G: velocidad másica, $\text{lbm}/\text{ft}^2 \cdot \text{h}$

D: diámetro, pulgadas

Las propiedades de mezcla tanto para los gases de combustión como del aire atmosférico, esto es, capacidad calorífica (cal/gmol.K o BTU/lbm.R), conductividad térmica (cal/cm-s-K o BTU/h-Ft-F) y viscosidad absoluta (Pa.s o Lbm/Ft-h) se promedian así (12):

$$C_{P,T} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{vi} C_{PT,i} w_i}{\sum_{i=1}^n C_{vi} w_i} \quad [22]$$

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n C_{vi} k_i}{\sum_{i=1}^n C_{vi} Q_{ij}} \quad [23]$$

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n C_{vi} m_i}{\sum_{i=1}^n C_{vi} Q_{ij}} \quad [24]$$

Donde:

Q_{ij} es la función cinética de Wilke (13) dada por

$$Q_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \frac{\hat{E}_i}{\hat{A}_i} + \frac{w_i}{w_j} \frac{\hat{E}_i \hat{m}_i}{\hat{A}_i \hat{m}_j} \frac{\hat{E}_j}{\hat{A}_j} \frac{w_j}{w_i} \quad [25]$$

]

w_i : peso molecular del contaminante i

C_{vi} : fracción volumétrica del contaminante i .

La dispersión de SO_2 desde el tope de chimenea bajo los efectos flotantes por el momentum y el calor sensible de la mezcla de los gases de combustión, puede aproximarse por la distribución gaussiana de Turner (6,14) a cualquier posición (x, y, z) en la dirección preferencial de los vientos,

$$C(x, y, z, He) = \frac{\dot{m}}{2\pi u s_y s_z} e^{-\frac{y^2}{2s_y^2}} e^{-\frac{(He-z)^2}{2s_z^2}} + e^{-\frac{(He-\lambda)^2}{2s_z^2}} \quad [26]$$

donde

C: concentración de un contaminante en un penacho en cualquier punto x, y o z, g/m³;

\dot{m} : tasa de emisión de contaminante, g/s

u: velocidad del viento en la boca de la chimenea, m/s

σ_y : coeficiente de dispersión en la dirección transversal, m, a una distancia x viento abajo de la fuente de emisión;

σ_z : coeficiente de dispersión en la dirección vertical, m, a una distancia x viento debajo de la fuente;

$He = H_s + DH$, H_s representa la altura física de la chimenea, DH la altura adicional por los efectos combinados de momentum y energía dada por las ecuaciones de Briggs (15):

$$DH = 1,6 \frac{F^{1/3}}{u} l^{2/3} \quad [27]$$

donde:

λ : distancia aguas abajo a partir de la cota máxima de la elevación del penacho, m.

F: parámetro del flujo por flotación, m⁴/s³.

Para la clase de estabilidad atmosférica neutral o inestable,

$$\text{Si } F < 55, l = 49F^{5/8} \quad [28]$$

$$\text{Si } F \geq 55, l = 119F^{2/5} \quad [29]$$

Para la clase de estabilidad atmosférica estable,

$$l = 2,07 \frac{m}{S^{1/2}} \quad [30]$$

donde F está relacionado con la temperatura de salida de los gases de combustión en el tope de la chimenea, dada por la Ecuación (31), así:

$$F = g \frac{T_s - T_a}{T_a} V_s \frac{\hat{E}_s}{\hat{A}_s} \frac{D_{is}}{2} \quad [31]$$

donde:

Vs: velocidad de salida de los gases, m/s, mientras el parámetro de estabilidad atmosférica S esta dado en s⁻², presenta un valor de S=0 atmósfera adiabática o estabilidad neutra, S>0 atmósfera estable, S<0 atmósfera inestable y está definido por:

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{\hat{\Gamma}_A}{\hat{\Gamma}_A} \frac{dT}{dz} \right)_{adiabatico} \quad [32]$$

Los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z dependen de la clase de estabilidad atmosférica de Pasquill (5) mostrada en la Tabla 1, son reportados por Briggs (8) para condiciones urbanas y rurales con las ecuaciones dadas en la Tabla 2.

Metodología

Determinación de las condiciones climatológicas

Tabla 1
Clave para la clase de estabilidad Pasquill

Velocidad del Viento a 10m,m/s	Insolación			Condiciones Nocturnas	
	Fuerte	Moderada	Ligera	>4/8 de Nubosidad	<3/8 de Nubosidad
<2	A	A-B	B
2 a 3	A-B	B	C	E	F
3 a 5	B	B-C	C	D	E
5 a 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Tabla 2
Parámetros de dispersión rural y urbana de Briggs

Clase de Estabilidad Pasquill	$\sigma Y(m)$	$\sigma Z(m)$
	Condiciones Rurales	Condiciones Rurales
A	$0,22 * X * (1 + 0,0001 * X)^{-0,5}$	$0,20 * X$
B	$0,16 * X * (1 + 0,0001 * X)^{-0,5}$	$0,12 * X$
C	$0,11 * X * (1 + 0,0001 * X)^{-0,5}$	$0,08 * X * X * (1 + 0,0002 * X)^{-0,5}$
D	$0,08 * X * (1 + 0,0001 * X)^{-0,5}$	$0,06 * X * (1 + 0,0015 * X)^{-0,5}$
E	$0,06 * X * (1 + 0,0001 * X)^{-0,5}$	$0,03 * X * (1 + 0,00003 * X)^{-0,5}$
F	$0,04 * X$	$0,016 * X * (1 + 0,0003 * X)^{-0,5}$
	Condiciones Urbanas	Condiciones Urbanas
A-B	$0,32 * X * (1 + 0,0004 * X)^{-0,5}$	$0,24 * X * (1 + 0,001 * X)^{-0,5}$
C	$0,22 * X * (1 + 0,00004 * X)^{-0,5}$	$0,20 * X$
D	$0,16 * X * (1 + 0,0004 * X)^{-0,5}$	$0,14 * X * (1 + 0,0003 * X)^{-0,5}$
E-F	$0,11 * X * (1 + 0,0004 * X)^{-0,5}$	$0,08 * X * (1 + 0,0015 * X)^{-0,5}$

La climatología de la ciudad de Maracaibo está dominada por el régimen de los vientos alisios que soplan regularmente en la dirección nordeste durante la temporada Noviembre-Abril y cambian de dirección en el periodo más cálido comprendido entre Mayo-Octubre. La caracterización meteorológica de la atmósfera de la ciudad de Maracaibo suministrada por la estación de la Fuerza Aérea Venezolana de La Cañada ofrece las siguientes generalidades: i) La velocidad de los vientos para la estación seca (periodo Mayo-Octubre) es mayor que para la estación lluviosa (periodo Noviembre-Abril), entre 1,75m/s y 4,75m/s comparado con 0,75m/s y 1,50m/s respectivamente; ii) Para el periodo seco, la velocidad de los vientos disminuye a medida que avanza la mañana alcanzando su mínima velocidad cerca del mediodía, luego aumenta hasta alcanzar su máxima velocidad durante la noche, alrededor de las 8 pm.; iii) Para el periodo lluvioso, la velocidad de los vientos presenta poca variación durante al día, con la mínima velocidad alrededor de las 7am. y la máxima velocidad alrededor de las 10pm., tal como se

muestra en la Figura 2; y iv) El comportamiento horario predominante de la clase de estabilidad atmosférica según el criterio de Pasquill se puede apreciar en la Figura 3. Se observan en el periodo seco, en las horas del día entre 7 am. y 5 pm. que las categorías predominantes son las clases A o B, mientras en horas de la noche entre 6pm. y 6am. la categoría predominante son es C. En el periodo lluvioso, la categoría predominante en las horas del día entre 7am. y 4pm. es la clase B, mientras en la hora de la noche la categoría predominante es la clase D.

Para las estimaciones de rigor se promediaron las variables meteorológicas de la atmósfera de la ciudad de Maracaibo; de esta manera se utilizaron los promedios horarios de temperatura ambiental, velocidad de los vientos, dirección predominante, insolación, nubosidad y estabilidad atmosférica.

Condiciones operacionales de la planta

Las condiciones operacionales a ser analizadas para la planta termoeléctrica Ramón Laguna con una capacidad máxima de producción de 804 MW operando las unida-

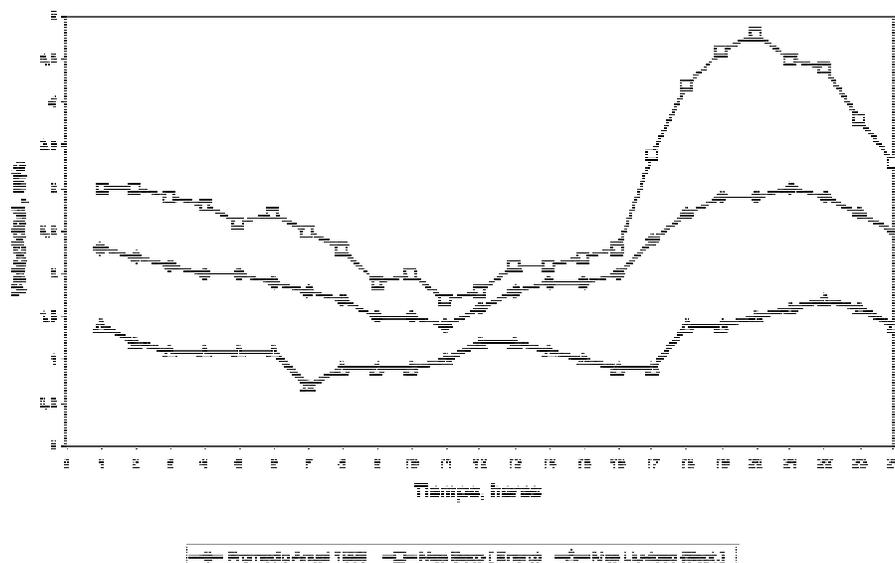


Figura 2. Variación horaria promedio de la velocidad del viento en la ciudad de Maracaibo (2000).

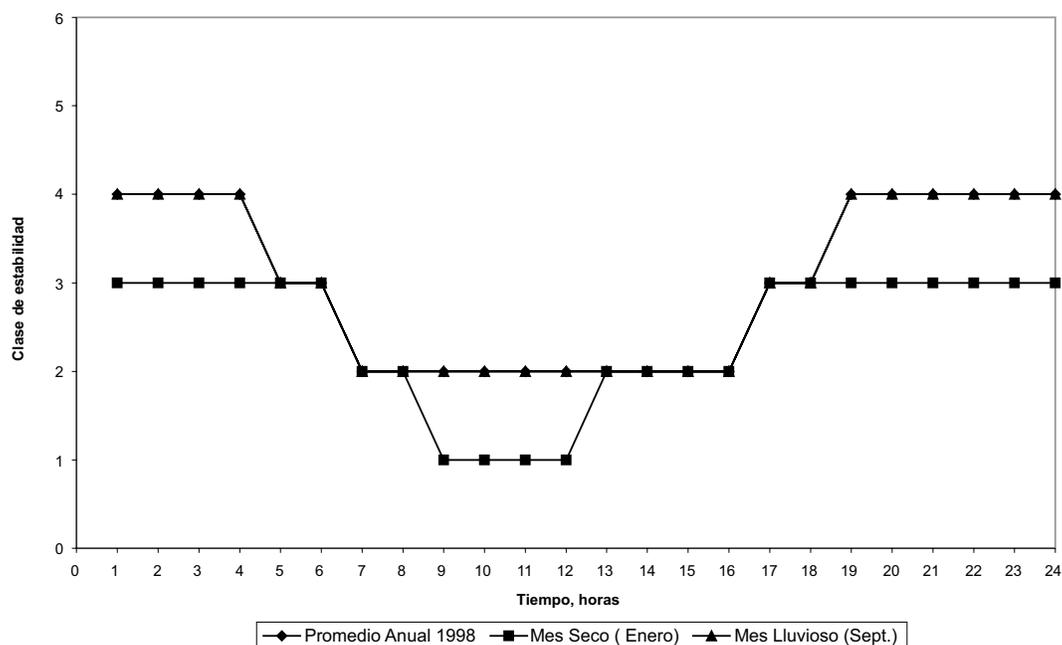


Figura 3. Clasificación de la estabilidad atmosférica horaria en la ciudad de Maracaibo (2000).

des de combustión con fuel oil y la dispersión de los gases de combustión a través de chimeneas de alturas entre 40m y 100m, son: Porcentaje de Azufre en el Fuel Oil: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; relación C/H en el Fuel Oil: 2,4; 3,3; 5; 8,5; 15; 24; porcentaje de aire en exceso: 5; 11; 17; 24; temperatura de entrada de los gases: 400F; 750F; 1500F; tasa de Emisión de los gases: 0-1200000Kg/h; tasa de Emisión de SO₂: 0-885,92g/s. En la Tabla 3 se presentan las características del combustible fuel oil (Bunker C).

El análisis integral del proceso involucró la transferencia de calor en la chimenea bajo las condiciones meteorológicas promedios anuales de 24 horas y la transferencia de masa por dispersión de los vientos referidas al SO₂ bajo la estabilidad atmosférica predominante.

Resultados y Discusión

En la Tabla 4 se presentan los resultados de las temperaturas de entrada y salida para las condiciones ambientales predominantes de 24 horas y bajo los efectos opera-

cionales de la composición del aceite (porcentaje de azufre y relación C/H), porcentaje de aire en exceso y para la máxima tasa de emisión correspondiente a la generación de 150MW. Los resultados demuestran que la temperatura de salida de los gases de combustión en el tope de la chimenea aumenta con el aumento de la temperatura de entrada, y con las mayores pérdidas de calor para las mayores temperaturas. Así, para las condiciones atmosféricas referidas para la hora 1, para una temperatura de entrada de 204°C la disminución de temperatura es de 1,4°C por cada 10 m de altura, para 399°C la disminución de temperatura es de 3°C por cada 10 m y para 816°C es de 5,8°C por cada 10 m. La temperatura de salida incrementa con el aumento de la temperatura atmosférica, así para condiciones atmosféricas referidas como hora 15, de máxima temperatura ambiental 33,8°C la disminución de temperatura es de 1,3°C por cada 10 m, 2,8°C por cada 10 m y 5,6°C por cada 10 m, para las temperaturas de entradas de 204, 399 y 816°C, respectivamente. Estas variables se relacionan a través de alturas adicionales de

Tabla 3
Característica del combustible Fuel Oil (Bunker C)

Característica o propiedad	Valor
Viscosidad cinemática (CTS) 122 F	420,00
Viscosidad cinemática (CTS) 210 F	33,50
Punto de fluidez (°C)	0,00
Punto de inflamación (F)	230,00
Agua por centrifugación (%v)	0,70
Sedimento por centrifugación (%v)	0,20
Contenido de Cenizas (%p/p)	0,11
Contenido de Azufre (%p/p)	3,02
Contenido de Vanadio (ppm en peso)	450,00
Carbón Canradson (%p/p)	11,20
Gravedad específica (60/60 F)	0,9951
Contenido de Asfalteno (%p/p)	13,30
Contenido de Sodio (ppm en peso)	60,00
Valor calorífico bruto (BTU/lb)	18055,00
Contenido de agua por destinación (%v)	0,70

Nota: las unidades empleadas son las que se estila emplear internacionalmente para este tipo de propiedad o característica.

dispersión (Dh) y donde se aprecia la importancia de conservar el contenido calorífico de los gases de combustión en sustitución del retiro parcial a través de economizadores de calor.

Los vientos en flujo cruzado retiran el calor desde las paredes exteriores de la chimenea y de esta manera realizan el proceso de enfriamiento de la misma. La condición atmosférica referida como hora 21 representa la condición ambiental de máxima velocidad del viento 3 m/s (para una altura de medición de 12 m) y en consecuencia debe esperarse las mayores reducciones para la temperatura de entrada, tal como se observa en la mencionada tabla.

En general, como se puede apreciar en la Tabla 4 las diferencias entre la temperatura de salida para cada hora del promedio anual de las condiciones ambientales son

mínimas, debido a que en dicho promedio las variaciones de temperatura y velocidad del viento son mínimas; el rango de variación de la temperatura ambiental está entre 26,5°C y 33,8°C y de la velocidad de los vientos entre 1,4 m/s y 3 m/s.

La variación de la temperatura de salida con la tasa de emisión exhibe patrones similares como función del aire en exceso, temperatura de entrada de los gases, porcentaje de azufre y relación carbono/hidrógeno.

La temperatura de los gases se incrementa con el aumento de la tasa de emisión desde un valor mínimo hasta un valor asintótico, con diferencia apreciable según el incremento de la temperatura de entrada. La tasa de emisión es el parámetro que controla el proceso de transferencia de calor, por debajo del valor crítico la temperatura de salida se aproxima a la temperatura ambiental inde-

Tabla 4

Temperatura de salida para las 24 horas del día, con condiciones operacionales de: 24,5% aire en exceso, 0,5% S, 2 ppm SO₃, relación C/H 24, tasa de emisión 938026,59 kg/h y con temperatura de rocío ácido a 143,1 °C (416.16 K)

Temperatura Entrada, °C	Temperatura Salida Hora 1 @27,8°C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 2 @27,4°C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 3 @27,2°C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 4 @26,9 °C T.A., K	Temperatura Salida Hora 5 @26,8 °C T.A., K	Temperatura Salida Hora 6 @26,8 °C T.A., K
204.5	189,7	189,8	189,9	189,9	189,9	190,0
398.9	369,4	369,6	369,7	369,8	369,8	370,0
815.6	758,1	758,4	758,7	758,1	759,1	759,4
Temperatura Entrada, °C	Temperatura Salida Hora 7 @26,5 C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 8 @27 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 9 @28,1 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 10 @29,9 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 11 @31,2 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 12 @32,7 °C T.A., °C
204,5	190,1	190,2	190,6	190,7	190,9	190,8
398,9	370,2	370,5	370,0	370,2	370,6	370,2
815,6	759,8	760,3	761,3	761,5	762,1	761,2
Temperatura Entrada, °C	Temperatura Salida Hora 13 @33,1 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 14 @33,7 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 15 @33,8 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 16 @33,5 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 17 @32,8 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 18 @31,5 °C T.A., °C
204,5	190,6	190,6	190,6	190,5	190,1	189,8
398,9	370,7	370,6	370,6	370,4	369,7	369,2
815,6	760,3	760,0	760,0	759,6	758,3	757,4
Temperatura Entrada, °C	Temperatura Salida Hora 19 @30,2 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 20 @29,5°C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 21 @28,9 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 22 @28,6 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 23 @28,3 °C T.A., °C	Temperatura Salida Hora 24 @27,9 °C T.A., °C
204,5	189,6	189,5	189,4	189,5	189,5	189,6
398,9	368,8	368,8	368,6	368,7	368,9	369,1
815,6	756,8	756,8	756,5	756,7	757,2	757,6

pendientemente de la temperatura de entrada de los gases. Sin embargo, para cada temperatura de entrada se presentan los valores críticos de la tasa de emisión que generan los puntos de rocío para las diferentes condiciones operacionales de la planta termoelectrica, tal como se muestra en la Figura 4.

El balance global de la transferencia de calor dado por la Ecuación 13 relaciona la temperatura de entrada y de salida de los gases a través de múltiples resistencias de conducción y convección a lo largo de la geometría cónica de la chimenea; el análisis considera un flujo cruzado entre los gases de combustión (flujo interior) y los vientos (aire atmosférico, flujo exterior).

El modelo estequiométrico de la combustión del fuel oil con aire en exceso proporciona de manera aproximada la composición de los gases de combustión útil para la subsiguiente estimación de los coeficientes de transferencia de calor y de las propie-

dades de mezclas. En la estimación del punto de rocío de la mezcla se utilizaron los parámetros del modelo de Verhoff-Banchero (16) que considera las presiones parciales del SO_3 y del vapor de agua. Los efectos comparativos de las variables aire en exceso, porcentaje de azufre, relación C/H sobre el punto de rocío de la mezcla y de la temperatura de salida se condensan así: i) En la medida que se remueve el calor sensible de los gases de combustión, se reduce la temperatura de entrada a la chimenea y se incrementa la posibilidad de alcanzar el punto de rocío ácido. El rango del punto de rocío ácido para la utilización del fuel oil, con azufre entre 0,5 % y 5 %, con la relación C/H entre 2,4 y 24, resulta entre un valor mínimo de 139°C y un valor máximo de 163°C . De tal manera, que si las condiciones de entrada se fijan en 200°C , la tasa de emisión debe ser mayor de 250.000 kg/hr para evitar la formación de rocío ácido ó si se establece 400°C , la tasa de emisión debe ser mayor de 50.000 kg/hr.

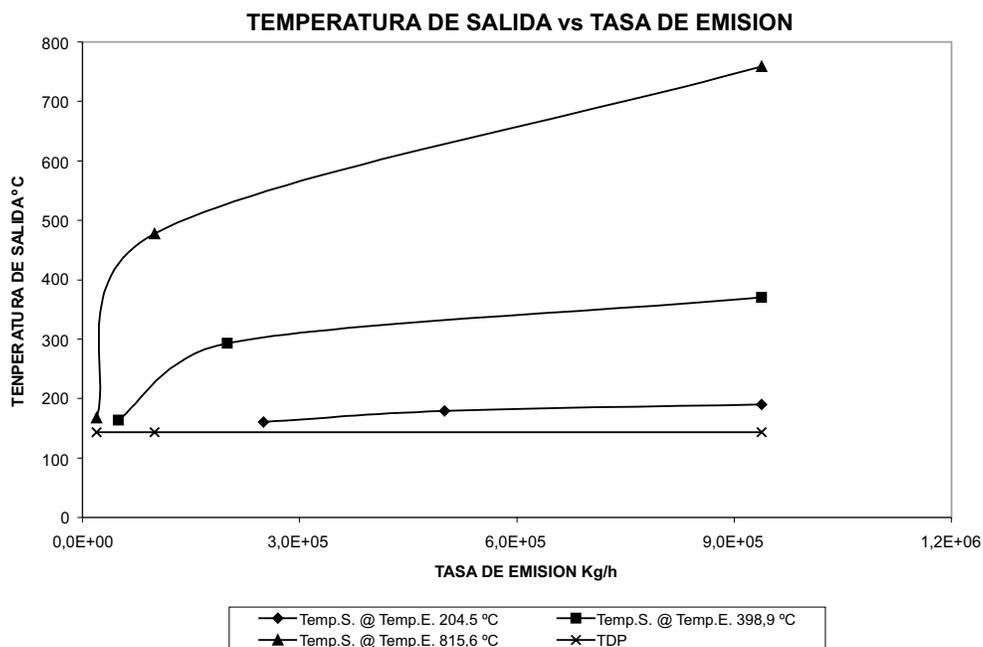


Figura 4. Temperatura de salida vs tasa de emisión para condiciones de operación de: 5% A.E., 0.5% S, 2 ppm SO_3 , C/H 24 @ T.A. 26.9°C .

ii) El efecto del incremento del porcentaje de aire en exceso sobre el proceso de transferencia de calor, para la misma caracterización del fuel oil, se traduce en el incremento del punto de rocío ácido y ligeramente mayor temperatura de salida con diferencias apreciables para bajos valores de la tasa de emisión.

iii) El incremento de la relación carbono/hidrógeno en la composición química del fuel oil determina un aumento del punto de rocío ácido y disminución de la temperatura de salida de las emisiones. Esto significa que la combustión de un fuel oil de estas características dispondría de mayor cantidad de carbono y menor de hidrógeno con la mayor generación de dióxido de carbono y menor de vapor de agua; como consecuencia de la mayor composición porcentual del CO_2 en la mezcla, la capacidad calorífica de la mezcla se reduce para el gradiente de temperatura entre la entrada y salida de las chimeneas.

Para estimar las concentraciones en la dirección preferencial de los vientos de SO_2 seleccionaron las horas con las estabilidades predominantes del promedio anual para el año 2000 (B y D). Para cada clase fueron seleccionadas dos horas del promedio con las máximas y mínimas velocidad del viento y temperatura del aire. Las Figuras 5, 6 y 7 presentan la concentración de SO_2 en la dirección de los vientos como función de la temperatura de salida de los gases desde la chimenea, de la meteorología promedio seleccionada y del porcentaje de azufre del fuel oil. Los resultados para la clase de estabilidad B revelan radios pequeños para las máximas concentraciones de SO_2 y menores concentraciones en comparación con la estabilidad D. Esto era de esperarse ya que el cambio de estabilidad atmosférica desde condiciones inestables (A, B, C) a condiciones estables (E, F) inhibe los movimientos verticales, pero no inhiben los movimientos horizontales ni transversales, alcanzándose con este cambio de estabilidad grandes distancias para las máximas concentraciones y una concentración que decrece con la dis-

tancia viento abajo. La clase de estabilidad D es neutral, es decir, ni favorece ni perjudica la dispersión de los poluentes.

Comparación con los Límites de Calidad del aire

Los límites de calidad de aire de Venezuela se presentan en la Tabla 5. Al realizar la comparación de la concentración de SO_2 en la dirección de los vientos con el límite de calidad del aire presentados en la Tabla 5 y la Figura 5 puede apreciarse que para 0,5% de azufre no se exceden dichos límites. Considerando 2 % de Azufre se excede completamente el límite de calidad del aire de $80 \text{ mg} / \text{m}^3$, sin embargo no son excedidos los restantes límites, como se ilustra en la Figura 6. Para el caso de 3% de Azufre como se observa en la Figura 7, se viola el límite de Calidad de aire de $80 \text{ mg} / \text{m}^3$, el de $200 \text{ mg} / \text{m}^3$ se excede un 33,33 % y el de $250 \text{ mg} / \text{m}^3$ en un 16,66%. En resumen, para porcentaje de azufre de 3 % en adelante se violan todos los límites de calidad. Para 2 % de azufre solo se viola el L.C.A. $80 \text{ mg} / \text{m}^3$ de mientras que para porcentajes menores (2% y 0,5%), no se viola ninguno de los límites.

El efecto global de las condiciones operacionales de la planta termoeléctrica Ramón Laguna sobre la dispersión de SO_2 en la atmósfera de la ciudad de Maracaibo se manifiesta por intermedio de la altura adicional (Δh) de dispersión mostrada en la Tabla 6.

Tabla 5
Límites permisibles de calidad de aire
del Decreto 638

Parámetro	Límite	Porcentaje de excedencia
SO_2	$80 \mu\text{g} / \text{m}^3$	50%
	$200 \mu\text{g} / \text{m}^3$	5%
	$250 \mu\text{g} / \text{m}^3$	2%
	$365 \mu\text{g} / \text{m}^3$	0,5%

Nota: Límite basado en promedio de 24 horas.

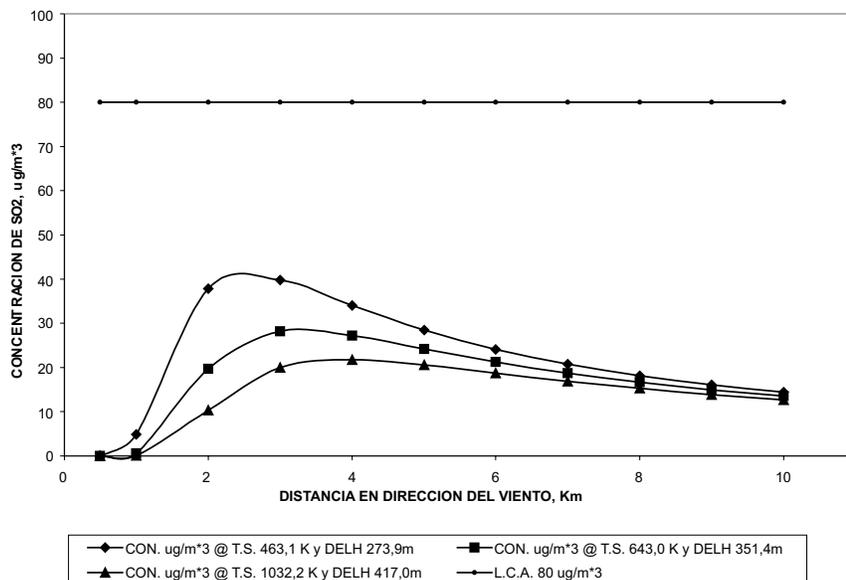
CONCENTRACION DE SO₂ vs DISTANCIA EN DIRECCION DEL VIENTO

Figura 5. Concentración de SO₂ vs distancia en dirección del viento para condiciones de operación de: 5% A.E., 0,5% S, T.E.SO₂ 88, 5914 Hora4.

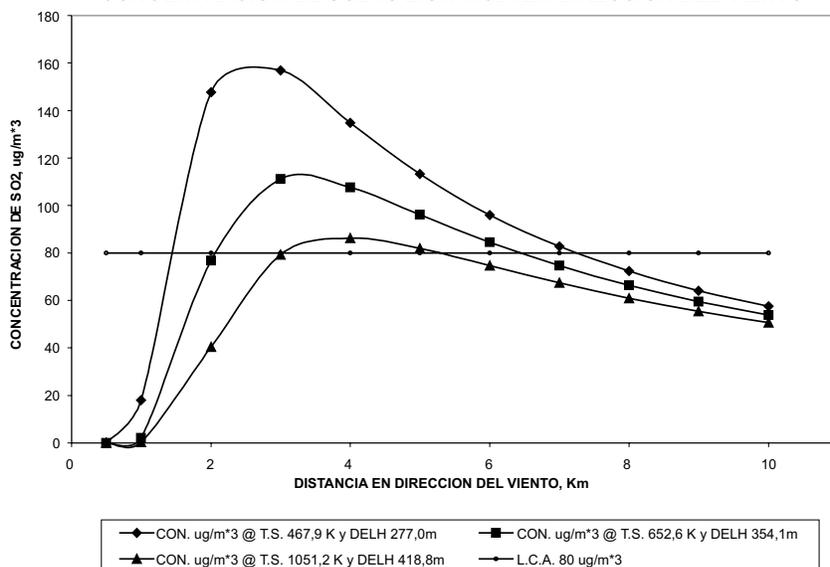
CONCENTRACION DE SO₂ vs DISTANCIA EN DIRECCION DEL VIENTO

Figura 6. Concentración de SO₂ vs distancia en dirección del viento para condiciones de operación de: 5% A.E., 2% S, T.E.SO₂ 354, 3659 Hora4.

Las mayores concentración de SO₂ se observaron a la menor temperatura de salida de la mezcla gaseosa y menor altura adicional,

mientras a mayor temperatura de salida se obtienen las menores concentraciones y mayor altura adicional para los mismos

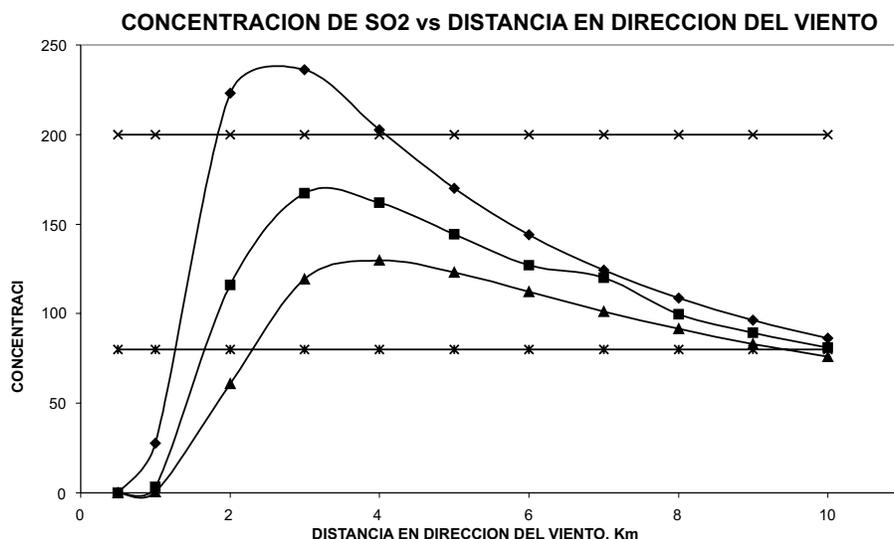


Figura 7. Concentraciones para 5% A.E., 3% S, T.E.SO₂ 531, 5488 Hora4.

Tabla 6
Variación de la elevación de pluma para 5% A. E. Y 0.5% S

Temperatura de Entrada, K	Hora 4 Estabilidad D		Hora 9 Estabilidad B		Hora 16 Estabilidad B		Hora 19 Estabilidad D	
	T.S., K	$\Delta h, m$	T.S., K	$\Delta h, m$	T.S., K	$\Delta h, m$	T.S., K	$\Delta h, m$
477,6	463,1	273,9	463,7	449,1	463,6	330,0	462,7	186,1
672,0	643,0	361,4	644,2	577,2	643,6	428,6	642,0	240,2
1088,7	1032,2	417,0	1034,5	685,3	1030,0	511,5	1030,0	286,0

puntos de medición en la dirección preferencial de los vientos. Con respecto a la clase de estabilidad se observa que para la clase de estabilidad B se tienen las elevaciones de pluma mayores, debido a que esta clase es inestable, lo cual contribuye a la mejor y mayor dispersión de los contaminantes, ayudando a elevar mas la pluma.

Conclusiones

A continuación se presentan las principales conclusiones de este estudio enfocado en la aplicación del modelo de Briggs de dispersión basado en el principio Gaussiano, para estimar las concentraciones de dióxido de azufre y un modelo de transferencia de calor para estimar la temperatura de salida

de los gases efluentes de combustión a través de las chimeneas de la planta termoeléctrica Ramón Laguna:

La temperatura de salida estimada presenta una alta sensibilidad con respecto a la temperatura de entrada de los gases a la chimenea y al flujo másico de los gases de combustión y en menor grado ante cambios en las condiciones ambientales como velocidad del viento y temperatura ambiental.

La temperatura de rocío ácido es función de la composición del combustible y por tanto de la composición del gas efluente. Para poder trabajar sin presencia de condensación de ácido sulfúrico se debe consi-

derar el flujo másico mínimo y la temperatura de los gases efluentes.

El análisis de las concentraciones de SO_2 para las variables operacionales y meteorológicas con las estabildades atmosféricas predominantes B y D, revela niveles por encima de $80\text{mg}/\text{m}^3$ para porcentajes de azufre mayores del 2%, para 3% de azufre se excede el límite de calidad del aire de $250\text{mg}/\text{m}^3$ y el máximo límite de $365\text{mg}/\text{m}^3$ es sobrepasado para porcentajes de 4 y 5%.

La altura adicional de la pluma de los gases efluente resultó ser directamente proporcional con la temperatura de salida de los gases, y con la condición de estabilidad atmosférica, resultando mayor la elevación para la estabilidad B, mientras que exhibió una relación inversamente proporcional frente a la velocidad del viento.

Referencias Bibliográficas

- VACCA V. Estudio del Contenido de Dióxido de Azufre en la Atmósfera de Maracaibo, (M.Sc. Tesis), La Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 105, 1985.
- VELASQUEZ H., ROSSELL N., LINARES T. *Re Tec Ing Univ Zulia* 15(2): 79-85, 1992.
- ROJANO R., ROSSELL N., GARCÍA C. *Rev Tec Ing Univ Zulia* 23(2):150-160, 2000.
- GIFFORD F.A. *Nuclear Safety* 2 (2): 56-68, 1960.
- PASQUILL F. *Meteorogy Magazine* 90 (1063): 33-49, 1961.
- TURNER B. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates-An Introduction to Dispersion Modeling*, CRC Press, Florida (USA), pp. 108, 1994.
- RINCÓN G., GARCÍA C. Modelos de Dispersión Atmosférica de SO_2 desde chimeneas de la Planta Termoeléctrica Ramón Laguna (Trabajo de Grado). La Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp. 140, 2000.
- BRIGGS G.A. *Atmos Environ* 6: 507-510, 1972.
- CHINSTIAN J.B. *Chemical Engineering Progress* 6: 59-62, 1995.
- GARCÍA C. *Fundamentos de Ingeniería Ambiental*, Edición Interna, Facultad de Ingeniería, La Universidad del Zulia, Maracaibo, Capitulo IV, pp. 150-217, 1986.
- GANAPATHY V. *Hydrocarbon Processing*, Part One - October 1977, Part Two-November 1977 and Part Three -December 1977.
- CRAWFORD M. *Air Pollution Control Theory*, Mc Graw Hill Inc., New York (USA), pp 42-53, 1976.
- BIRD B.R, STEWART W., LIGHTFOOT E. *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, New York, Seventh Printing, Section 1.3, New York (USA), 1960.
- GARCÍA C. *Evaluación Cuantitativa de Polución del Aire*, Edición Interna, Facultad de Ingeniería, LUZ, Maracaibo, Capitulo VI, pp. 161-183, 1978.
- BRIGGS G.A, Some recent analyses of plume rise observations, *in Proceedings of the Second International Clean Air Congress*, England H.M., Berry W.T. Editor, Academic Press, New York (USA), pp. 1029-1032.
- PIERCE R. *Chemical Engineering* April 11: 125-128, 1977.