

Sistematización de Procedimiento para Dimensionamiento de Chimeneas en Sistemas de Combustión Industrial: Caso de Estudio de Dispersión al entorno de Contaminantes de la Estela

Alfredo Barriga, Ph.D. – Luis Auhing, M.Sc.
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Campus Prosperina Km 30.5 Vía Perimetral, 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador
abarriga@espol.edu.ec, lahuing@espol.edu.ec, luis_auhing@yahoo.com

Resumen

El presente trabajo contiene el resultado de un análisis de la concentración de contaminantes a nivel del suelo emitidos por chimeneas industriales. Se realiza una aplicación a través del caso de SO₂ de la combustión de combustibles fósiles, específicamente del fuel oil pesado. Se realiza un análisis teórico de la concentración de SO₂ predicha de la salida de la cámara de combustión para un fuel oil que contiene 2% de azufre. Se comparan las estimaciones con datos de campo tomados en una industria local con dos calderas, de 700 BHP. Se lleva a cabo un análisis completo comparando las predicciones del uso de las ecuaciones de Briggs para la estimación de elevación de estela. Varios casos son analizados. Se concluye que 10m de chimeneas son insuficientes. Se concluye que las chimeneas deben ser del orden de 16 m sin la reducción parcial de SO₂ antes de que los gases sean emitidos a la atmósfera.

Palabras Claves: Combustión, Contaminantes, Dispersión, Concentración Máxima, Modelaje

Abstract

The present work contains the result of an analysis of the concentration of gaseous species at ground level generated by plumes emitted from smoke stacks. Application is made towards the case of SO₂ arising from the combustion of fossil fuels, specifically of heavy fuel oil. Theoretical analysis of the predicted concentration of SO₂ exiting from the combustion chamber for fuel oil containing 2% of sulfur. Estimates are compared with field data taken at a local industrial plant with two boilers, from 700 BHP. A complete analysis is further carried out the predictions stemming from the use of Briggs equations for the estimation of plume rise. Various cases are analysed. It is concluded that the 10 m smoke stacks are insufficient. The smoke stacks should be of the order of 16 m unless a partial reduction of SO₂ is carried out before gases are vented into the atmosphere..

1. Antecedentes

Los sistemas de combustión generan productos gaseosos que deben ser emitidos al entorno. Estos gases contienen los principales productos de combustión tales como CO₂, CO, COV, SO₂, NO_x, H₂O, C_nH_m (hidrocarburos incompletamente quemados), hollín, cenizas, así como olores y gotillas de elementos condensables.

La concentración de estos productos dependen principalmente de las condiciones de combustión, en particular: tipo de combustible, nivel de exceso de aire, presencia de contaminantes en el combustible; condiciones apropiadas para buena atomización del combustible cuando fuera líquido; mezcla homogénea del combustible y el oxígeno; temperatura de la llama; condiciones térmicas de las paredes de la llama; aerodinámica quemador-cámara; y otros.

Los gases son lanzados verticalmente hacia arriba por la chimenea. Subsecuentemente la denominada estela de humos (que contiene dichos gases saliendo de la chimenea) asciende por efecto de la boyantez inducida por la menor densidad de los gases calientes dentro de la estela. Así mismo, el viento que actúa en dirección horizontal tiende a nivelar dicha estela cambiándola de dirección hasta ponerla básicamente horizontal. Se produce simultánea y subsecuentemente el proceso de dispersión, tanto molecular como por movimiento grueso y turbulencias. Las partículas, los gases y olores se dispersan en todas direcciones en particular hacia el suelo. La concentración con que arriban al suelo dependerá de varios factores en particular la concentración en boca de chimenea así como la altura de ésta. Es por tanto necesario, que se cuente con un esquema metodológico para establecer

la interacción entre la concentración a nivel del suelo y los parámetros mencionados.

Las regulaciones ambientales actuales imponen que se haga una simulación de la operación de la chimenea (modelaje) para establecer si un dimensionamiento planteado será suficiente para ubicar los niveles de concentración de contaminantes a nivel del suelo por debajo de los límites establecidos.

El presente trabajo intenta sistematizar un procedimiento de análisis y cálculo de chimeneas, que permita asegurar que el proceso de modelaje es apropiado.

2. Introducción al problema

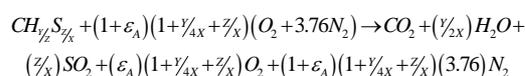
Los combustibles hidrocarbúricos típicos contienen en su composición molecular carbono, hidrógeno y azufre, así como cantidades menores de oxígeno, nitrógeno, metales pesados, etc.

Si bien para efectos de contaminación todos estos elementos deben tomarse en cuenta, para efectos de combustión se considera los tres primeros de ellos, dando una expresión molecular simplificada que se expresa por $C_xH_yS_z$ [3,8,11], que se puede expresar por la molécula simplificada $CH_{y/x}S_{z/x}$. Así por ejemplo un hidrocarburo que tuviere en % base masa de: C 86%, H 12%, S 2% tendría como fórmula $CH_{1.67}S_{0.01}$.

Condiciones estequiométricas son aquellas en que se suministra el oxígeno justamente necesario para oxidar todos los compuestos oxidables del combustible. En este caso carbono, hidrógeno y azufre. Los productos oxidados serían CO_2 , H_2O y alguno de los óxidos de azufre. Ello generaría la máxima concentración de dichos productos en los gases. El nitrógeno del aire aparece también en los gases de salida (una muy pequeña cantidad podría haberse convertido en óxidos nitrosos o nítrico). Adicionalmente aparecen óxidos de nitrógeno provenientes de la oxidación del nitrógeno contenido en la molécula del combustible (si las tuviere).

Las condiciones estequiométricas no garantizan una combustión necesariamente completa porque la combustión debe darse en una mezcla homogénea entre las moléculas de combustible y las moléculas de oxígeno. Normalmente se suministra una cantidad adicional denominada exceso de aire para garantizar la completa oxidación de todas las moléculas. Dicho exceso de aire ocasiona que además de bajar la temperatura de los gases de combustión (por la mayor carga térmica de los gases adicionales) se diluyan los productos.

La ecuación de combustión completa (sin CO) cuando hubiere exceso de aire (ϵ_A) es la siguiente [11]:



La concentración volumétrica de los gases es igual al número de moles de esa especie dividido por el

número de moles totales de los productos. Por tanto, la concentración en base seca de SO_2 en fracción volumétrica (calculada en base de moles) estará dada por [11]:

$$[SO_2] = \frac{\frac{z}{x}}{1 + \frac{z}{x} + (\epsilon_A)(1 + \frac{y}{4x} + \frac{z}{x}) + (1 + \epsilon_A)(1 + \frac{y}{4x} + \frac{z}{x})(3.76)}$$

Así, para el combustible arriba indicado y con un 20% de exceso de aire la fracción volumétrica de SO_2 sería de 1.29×10^{-3} que equivalen a 1290 partes volumétricas por millón en el supuesto que todo el azufre se oxidare. En la práctica se oxida completamente formando óxidos. Una fracción pequeña puede incorporarse a las cenizas a formar depósitos sulfurosos en la parte superficial del hogar. Asumiendo combustión completa y tomando en cuenta que existe variación en los niveles de azufre del combustible en los diversos momentos en operación se aprecia que las mediciones caen en los rangos previstos. Tomando un contenido de azufre en el combustible de 1.5%, la fracción de SO_2 en productos de combustión sería alrededor de 1000 ppm.

La cantidad de gases (flujo de masa) depende del exceso de aire y del régimen del flujo de combustible. Considérese así por ejemplo, para un fuel oil 6 de densidad 0.93 kg/lt fluyendo a razón de 180 gph (galones por hora), el flujo de masa de combustible será de 634 kg/h. Por otro lado, el flujo de masa de gases depende del flujo de masa del combustible y de la relación masa de gases/masa de combustible. A su vez, la relación gases/combustible depende de la relación aire combustible (masa de gases = masa de aire + masa de combustible) y está dada por [11]:

$$m_{a/f} = 1 + m_{a/f} \Big|_{Estequiométrico} (1 + \epsilon_A)$$

Donde $m_{a/f}$ es la relación aire combustible. La relación $m_{a/f}$ estequiométrica viene dada por el cociente entre la masa de aire y la masa de combustible de la reacción estequiométrica, donde las masas están dadas a su vez por el número de moles de cada especie multiplicadas por la masa molecular correspondiente. Así, para el combustible arriba indicado ($CH_{1.67}S_{0.01}$) esta relación tiene un valor de 14.0. Si se usare 20% de exceso de aire, la relación aire/combustible ($m_{a/f}$) real sería de 16.8. Mientras que la relación $m_{g/f}$ sería de 17.8.

Bajo estas condiciones (flujo de combustible 180 gph, combustible como el indicado, exceso de aire 20%) el flujo de masa de gases sería de 11285 kg/h.

La velocidad de salida de los gases depende tanto del flujo de masa, del área de la chimenea y de la densidad del gas en el punto considerado. Asumiendo en el caso anterior una chimenea de 0.8 m de diámetro, el área sería de 0.503 m². Asumiendo por otro lado que la temperatura de los gases fuese de 250°C (523°K). Utilizando valores de densidad apropiada se encuentra

que la velocidad de los gases en la posición de la chimenea considerado es de 9.34 m/s. Nótese que esta velocidad de salida varía conforme los gases se van enfriando en su ascenso por la chimenea.

3. Metodología de cálculo

A continuación se indica la metodología sugerida para el dimensionamiento de chimeneas en sistemas de combustión industrial:

1. Determinar las condiciones actuales en el funcionamiento de la caldera (producción de vapor, consumo de combustible, temperatura de salida de los gases, relación de aire combustible, etc.).
2. Estimar teóricamente la concentración de los gases de emisión basados en la calidad del combustible utilizado en la caldera. Los autores consideran que los datos experimentales medidos representan una situación momentánea de combustible de bajo contenido de azufre. Por ello, se inclinan a utilizar en la simulación un combustible con un mayor contenido 2% de S visto que la práctica local permite en el combustible 2.3%. [11].
3. Realizar mediciones de los gases de concentración en la chimenea de acuerdo a la norma ecuatoriana presente en el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (TULA) [12].
4. Obtener parámetros como altura física de la chimenea, temperatura de los gases de salida y diámetro interno de la chimenea basado en los datos medidos.
5. Obtener datos estadísticos de las condiciones meteorológicas de la zona de por lo menos un año tales como temperatura ambiental, velocidad de viento, dirección del viento y otros.
6. Verificar y constatar la existencia de infraestructuras cercanas a las chimeneas que tengan alturas mayores a las mismas
7. Realizar la correspondiente simulación de dispersión de los gases de la chimenea para concentraciones a nivel del suelo basado en la ecuación de Gauss o sus equivalentes.
8. Localizar la distancia de la mayor concentración a nivel del suelo.
9. Comparar con la regulación ecuatoriana si dicha concentración cumple o no con la norma.
10. En caso de ser negativa la comparación, entonces se procede a estimar cual debería ser la altura de la chimenea para cumplir con la norma establecida.
11. Establecer los inter-efectos entre chimenea/estela y las estructuras cercanas identificadas en el numeral 6.

4. Aplicación a caso específico mediciones de campo

Una planta local tiene dos calderos de 700 BHP. Cada uno opera con un consumo de combustible de 2500 gal de Fuel Oil No. 6 por día, así como un diámetro interno de chimenea de 1.1 m. Como metodología de análisis se va a tomar el caso de un mayor contenido de azufre del combustible, esto es 2%. Datos de plantas de análisis de combustible de varias plantas se puede apreciar que llegan hasta un 2.2%.

El modelaje se basa en asumir dispersión tipo gauseano [5,7] a partir de la boca de la chimenea, con la estela de humos emitida verticalmente e inclinándose rápidamente hacia la horizontal por el efecto del viento. La estela de humo haciende debido a efectos tanto de cantidad de movimiento por la velocidad de salida como de la boyantez térmicamente inducida. La elevación adicional se calcula utilizando la metodología sugerida por Briggs. [4,7]. Así mismo se utiliza los coeficientes de dispersión Pasquill-Gifford [7]. Las condiciones de estabilidad se explican posteriormente.

La variabilidad de velocidad y dirección de viento se la simplifica utilizando factores de corrección apropiados. Así, las predicciones de concentración que están calculadas para 10 minutos se corrigen para 24 horas para acoplarse al valor que pide la norma ecuatoriana (por debajo de 350 ug/m³ en 24 horas). Adicionalmente se debe corregir por la temperatura real [12].

Así la corrección de 10 minutos a 24 horas introduce un factor de 43% [4]. Esto implica asumir que estando en un punto cualquiera el receptor no recibe el efecto continuo de una velocidad de viento dada sino que la estela serpentea continuamente respondiendo a las variaciones del viento. Es decir, el receptor no siempre esta bajo el efecto de una dirección y velocidad de viento dada. Un modelo más preciso deberá considerar obviamente los datos climatológicos más detallados. Por tanto se considera el presente análisis del lado conservador.

Por otro lado, debe asumirse que exista algún tipo de “perfil de techos” de las edificaciones colindantes o ubicadas en la zonas de influencias de la estela de humos. A falta de datos más precisos tomando en cuenta ubicaciones de tipo urbana o semiurbana puede tomarse este piso de techo a un nivel de alrededor de nueve metros (nivel de techo de casas de tres pisos). Se considera que cuanto la estela de humos llega a ese nivel, el efecto de barrido hacia abajo “downwash” por la turbulencia de las edificaciones lleva rápidamente los gases a nivel del suelo. Modelos más sofisticados introducen consideraciones más precisas.

Por otro lado la presencia de más de un emisor, en este caso caldero y su chimenea se la introduce por medio de un factor de corrección de unidades emisores

(calderos) iguales. La literatura [4] utiliza un factor que para el presente caso de dos calderos es de 1.7. Nótese que los factores no aplican el esquema burbuja, el cual por su carácter se refiere básicamente al nivel de las emisiones lanzadas al aire, no al nivel de contaminantes en el ambiente (calidad de aire).

Con todas estas consideraciones se pasa a predecir la altura física que deberá tener la chimenea para que la columna o estela de los gases que se emiten y se dispersan a los alrededores no ocasionen una concentración de SO₂ superior a lo que permite la norma. Se considerará la concentración a nivel “piso de techo” que a su vez representará por efecto downwash a nivel de suelo entre las edificaciones.

Para efectos de análisis se han considerado los varios tipos de estabilidad. Los resultados se muestran en gráficas adjuntas.

Se planteó lograr las siguientes metas y resultados:

1. Determinar las emisiones de SO₂
2. Estimar las concentraciones de SO₂ a nivel del suelo.
3. Verificar si la altura de las chimeneas permiten que las concentraciones de SO₂ a nivel del suelo se encuentren dentro de los parámetros establecidos en la regulación ecuatoriana.

Para determinar las condiciones de funcionamiento de las calderas se comparó los resultados de las mediciones de SO₂ tomadas en la planta con el cálculo teórico de concentración. Las mediciones realizadas se tomaron cada 5 minutos, con intervalos de 5 minutos de descanso. Este proceso se realizó durante media hora.

El combustible utilizado es Fuel Oil No. 6 proveniente de la refinería de la Libertad, la cual se ha considerado que posee las siguiente características: gravedad específica de 0.9574 con 0.032% en masa de cenizas, 1.31% en masa de azufre y 0.1% en masa de agua [13]. Basado en aproximaciones teóricas podemos estimar que la formulación obtenida es C_{7.243}H_{11.63}S_{0.0409}.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de las mediciones:

Tabla 1. Concentraciones de SO₂

SO ₂ (ppm)
630
626
618
613
608
608
637
651
658
663
662
666
667
672

Adicionalmente se obtiene que la concentración de SO₂ en base seca (la que mide el instrumento) y con una suposición de exceso de 10% de aire (basados en reportes internos de la planta) obtenemos un concentración de SO₂ de 1242.55 ppm. Este resultado implica que el combustible real tenía algo menos de 1.3% de azufre..

La consideración de la presencia de dos unidades de caldero y su correspondiente chimenea representa un caso práctico relativamente común, y permite analizar como deberá calcularse el efecto de emisiones de contaminantes cuando existe la presencia de varias unidades de este tipo en una misma industria

5. Estimación de concentraciones de SO₂ a nivel del suelo (Modelaje)

La concentración en cualquier punto de los alrededores de la chimenea puede estimarse a base de la ecuación de Gauss incluyendo reflexión del suelo[2,7].

$$C(x, y, 0) = \frac{Qe^{\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right)} e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)}}{u\pi\sigma_y\sigma_z}$$

Los coeficientes de dispersión lateral σ_y , σ_z dependen fuertemente de la estabilidad atmosférica. Se considera que en la zona geográfica donde se encuentre ubicada la planta predomina los tipos de estabilidad B, C y D. Como ejemplo considérese el caso de estabilidad B.

Un programa numérico simple permite calcular las concentraciones a nivel de piso a lo largo de la línea central de la estela. Con este procedimiento y tomando los mismos datos arriba indicados se obtuvieron diferentes perfiles.

Para el presente trabajo únicamente se puede realizar una comparación genérica en vista que los datos son tomados en línea, esto es en la chimenea. La predicción se refiere a concentración de SO₂ a nivel del suelo, valores que no han sido verificados experimentalmente en el presente trabajo debido a que es mucha complejidad y requerimiento de equipos especiales.

La altura predicha por estos procedimientos corresponde a una “altura efectiva”, que se obtiene de adicionar la denominada elevación de estela (“plume rise”) a la altura física efectiva de la chimenea. Esta elevación se debe por un lado a la viada (momentum) que lleva la estela en su ascenso vertical. Dicha elevación depende de parámetros tales como velocidad de salida, diámetro de chimenea, velocidad de viento, la capacidad térmica del gas (que depende del flujo, calor específico y de la temperatura del gas) y, muy importante la estabilidad atmosférica [6].

Para el caso indicado, los parámetros a utilizarse son: flujo de masa de gases = 1.71 Kg/s; $C_p = 1.014 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$; $T_s = 473^\circ\text{K}$; $T_a = 303^\circ\text{K}$. Con esto, el valor de la tasa térmica $Q_h = 295.25 \text{ kJ/s}$.

No hay suficiente experiencia en chimeneas de alturas moderadas, la literatura analiza chimeneas arriba de 50 m, por otro lado la diferencia reportada de los varios métodos es notable [2,4] Un orden de magnitud entre las predicciones de Briggs y Holland para emisiones con tasa térmica menores a 5 MW. En base a ello, excepto de plantas térmicas locales, la tasa media de emisión típica está dentro de ese rango. Por tanto debe tomarse una posición conservadora considerando para el presente trabajo las ecuaciones de Briggs para modelaje tal como lo sugiere la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América [2, 4].

Debe así mismo analizarse el área física en la que podría haber ligeras elevaciones en la concentración para establecer si hay densidad poblacional en esa zona.

El efecto de la interacción con las estructuras vecinas debe de tomarse en cuenta. Véase en la Bibliografía [2,4,7], donde se aprecia que la estela de la chimenea es parcialmente llevada hacia al suelo arrastrada por los vórtices que se generan corriente debajo de estructuras colindantes así como en “la burbuja de separación”.

Cabe señalar que si la chimenea se encuentra adosada a un estructura, la chimenea deberá en principio sobre elevarse.

6. Resultados

A continuación se procederá a determinar la concentración de SO_2 a nivel de suelo a lo largo del eje central de la estela de humos de chimeneas.

De acuerdo a la Figura 1, la concentración en las condiciones actuales supera el estándar de calidad de 350 ug/m^3 en 24 horas considerando el efecto de emisión de ambas chimeneas.

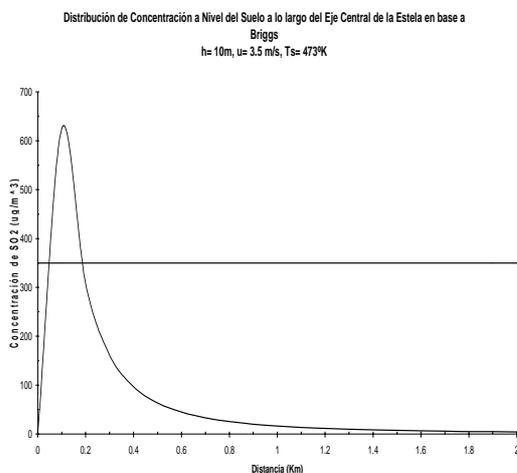


Figura 1. Concentración de SO_2 a Nivel del Suelo

El efecto del cambio de variación de la estabilidad sobre la concentración a nivel del suelo se aprecia en la Figura 2. Nótese que hay un rango entre 234.55 ug/m^3 para estabilidad tipo F a 321.58 ug/m^3 para estabilidad tipo C.

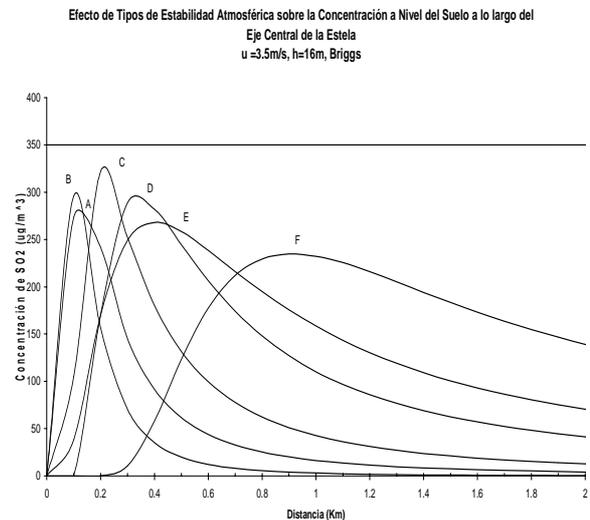


Figura 2. Efecto de la Estabilidad Atmosférica sobre la Concentración de SO_2 a Nivel del Suelo

El efecto de la elevación de chimenea se da en la Figura 3. En ella se considera la concentración de SO_2 combinada de ambas calderas para tres niveles de altura física de chimenea. Nótese que a partir de 16 m se cumple que la concentración combinada se encuentra por debajo de lo establecido por la norma de calidad de aire.

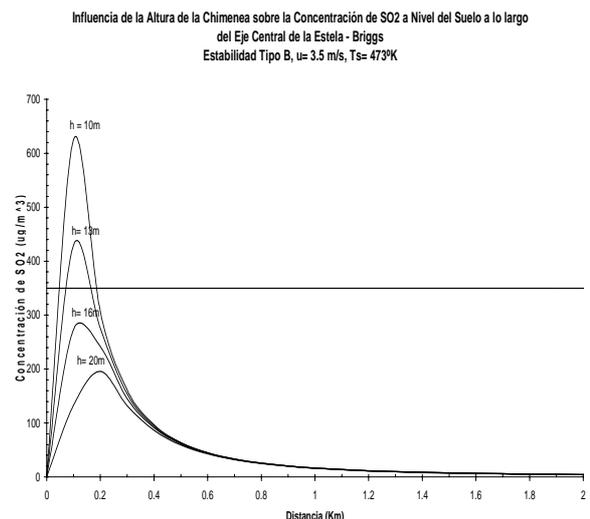


Figura 3. Efecto de la Altura de la Chimenea sobre la Concentración de SO_2 a Nivel del Suelo

Hay un cierto efecto de la velocidad de viento sobre la concentración de SO_2 . Tomando en cuenta valores típicos para el caso local, de entre 2 m/s a 5 m/s, la

concentración máxima varía entre 245.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el caso de 2 m/s hasta aproximadamente 329.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para velocidad de viento de 5 m/s, tal como se aprecia en la Figura 4

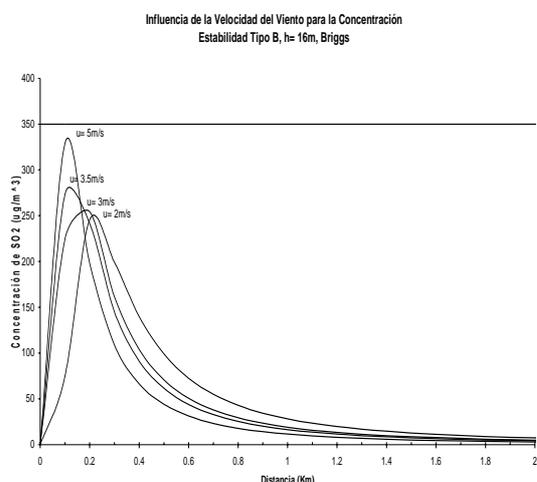


Figura 4. Efecto de la Velocidad del Viento sobre la Concentración de SO_2 a Nivel del Suelo

Los cálculos anteriores pueden verificarse de manera rápida y aproximada utilizando las gráficas de Turner que presentan la altura efectiva de chimeneas requeridas para diversas combinaciones de concentración, velocidad de viento y tasa de emisión de contaminantes en función de la estabilidad atmosférica [7].

7. Conclusiones

1. Debe hacerse un análisis cuidadoso de las ecuaciones a ser utilizadas, comparando resultados predictivos entre sí. En el presente caso se ha utilizado el resultado de usar las Ecuaciones de Briggs. Así mismo, se ha considerado el efecto combinado de las dos chimeneas
2. Las chimeneas actuales de 10m son insuficientes. Debe tomarse acción correctiva visto que la concentración que arroja el modelo de simulación a nivel del suelo sobrepasaría lo permitido por la norma. Estas acciones correctivas tienen que ver con las opciones de elevar la altura de chimeneas, reducir el contenido de SO_2 vía eliminación antes de ser emitidos hacia la atmósfera, o una combinación apropiada de ambos.
3. En caso de que se optare sólo por elevar a la chimenea, esta debería incrementarse hasta una altura de por lo menos 16 m. En el caso alternativo de combinar las opciones, se podría por ejemplo reducir las emisiones de SO_2 a la salida de chimenea por ejemplo utilizar un combustible con menor porcentaje de S combinándolo con una altura de chimenea de

16m. El efecto combinado de ambas chimeneas estaría dentro de lo permitido por la norma.

4. Las variaciones típicas de velocidad de viento locales (2-5 m/s) así como de estabilidad (tipo A, B, C, D, E y F) no parecen tener demasiado efecto sobre la concentración máxima a nivel del suelo. Se aprecia una variación de alrededor de un 27%.
5. La presencia de edificaciones cercanas añade requerimiento de altura a las chimeneas. Para el presente caso se consideró una altura de 9 m de edificaciones cercanas. Por otro lado, en caso de que los gases en la boca de chimenea se hubieran enfriado relativamente (por debajo de unos 150°C) se requerirá una mayor altura de chimenea para contrarrestar la disminución de boyantez inducida por este enfriamiento.
6. El resultado obtenido en la altura de chimenea sugerida se aplica para hornos y calderos en el rango térmico de entre 400 – 700 BHP. Dependiendo del origen del combustible de Petroindustrial, esto es Refinería de Esmeraldas o Libertad, el contenido de azufre puede variar de 1.3% a 2.3% (y extraoficialmente puede ser hasta más alto). Esto genera una incertidumbre en los valores esperados de SO_x los cuales son linealmente dependientes del contenido de S del combustible.
7. La metodología aquí propuesta es una metodología simple pero suficientemente efectiva y práctica. Permite predecir con cierto grado de seguridad el efecto de emisiones de uno o más chimeneas sobre entornos urbanos y semiurbanos vecinos ubicados en la zona de influencia. En caso de desearse de detalles más precisos deberán recurrirse a modelos más sofisticados.
8. En caso de una chimenea, la altura de ésta deberá ser como mínimo de unos 5-6 m por encima del nivel del techo de edificaciones colindantes. En caso de las dos chimeneas deben utilizarse una altura de chimenea de 7—8 m por encima de edificaciones colindantes. En el caso que existieren colinas deberá corregirse apropiadamente. Se considera que entre las edificaciones el efecto del downwash arrastra rápidamente hacia a nivel del suelo los gases que llegaren al nivel del techo, por efecto de la burbuja de recirculación que se genera en la llamada estela aerodinámica de las edificaciones.

8. Recomendaciones

1. Se recomienda continuar con mediciones y monitoreos que permitan establecer con

mayor precisión los niveles de concentración de SO₂.

2. Se sugiere continuar estudios sobre modificaciones al sistema de combustión con el objeto de reducir el NO_x de origen térmico. Se hace referencia particular a la combustión con suministro escalonado de aire principal, así como la recirculación parcial de gases, uno cuyos efectos es bajar la temperatura de combustión y su concomitante reducción en la formación de NO_x.

9. Bibliografía

- [1] Brunner, C., *Handbook of Hazardous Waste Incineration*, The United States of America: Tab Books Inc., 1989
- [2] Cooper, D., and Alley F.C., *Air Pollution Control*, Third Edition, Illinois, The United States of America: Waveland Press, Inc., 2002
- [3] Optimum Energy Management Inc., *Optimization of Combustion in Boilers and Furnaces*. Environmental Guide No. 29, ARPEL, Uruguay: Arpel, June 2000.
- [4] Schnelle, K., and Dey P., *Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide*. United States: McGraw-Hill., 2000
- [5] Seigneur, C., "Understand the Basics of Air Quality Modeling", *Chemical Engineering Progress*, March 1992, pp. 144-150.
- [6] Slade, D.H. *Meteorology and Atomic Energy 1968*. U.S. Atomic Energy Commission, TID-24190, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Springfield, Va, 1968.
- [7] Wark, K., Warner, C. and Davis, W., *Air Pollution Its Origin and Control*. Third Edition. United States: Addison Wesley Longman, Inc., 1998.
- [8] Edwards, J.B., Arbor, A., *Combustion: Formation and Emission of Trace Species*, Michigan: Science Publishers, Inc. 1974
- [9] García Ybarra P.L y colectivo de autores, *Tecnologías Energéticas e Impacto Ambiental*. Madrid, España: McGraw Hill. 2001
- [10] Auhing, L., "Aplicación de Técnicas de Producción Más Limpia en la Industria de Soderal", Tesis de Especialista en Producción Más Limpia, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad en Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, 2004.
- [11] Barriga, A., "Tecnología de la Combustión Industrial", Notas de Curso, 2004.
- [12] Ministerio de Ambiente, *Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ecuador*, Quito, Ecuador: Ministerio de Ambiente, 2003.
- [13] Auhing, L., "Thermal Elimination of Waste Lubricating Oil in High Intensity Industrial Combustion Chambers in Guayaquil", Thesis of Master Degree in Energy and Environment, 2002