

Simulación de Contaminantes Gaseosos Urbanos Mediante el Uso de LabVIEW

Angel M. PLAZA
Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial
Guayaquil, Ecuador
angel.plazav@ug.edu.ec

Julio V. MARCILLO
Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial
Guayaquil, Ecuador
juliomarcillop@ug.edu.ec

Diógenes D. DÍAZ
Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial
diogenes.diazj@ug.edu.ec

William R. NAVAS
Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial
Guayaquil, Ecuador
william.navase@ug.edu.ec

RESUMEN

La contaminación del aire es un problema de particular importancia en centros urbanos y mega ciudades alrededor del mundo, y obedece principalmente a problemas estructurales en el desarrollo industrial y de transporte, y a su crecimiento desordenado. Su principal efecto es la degradación de la calidad de vida de la población, reflejada en el incremento de la frecuencia y severidad de las enfermedades respiratorias, en la mortalidad temprana, en el número de consultas hospitalarias y en la ausencia laboral. El presente documento es el primer paso para el desarrollo de un sistema de monitoreo de la calidad del aire con relación a emisiones de gases y partículas, para generar datos de contaminantes gaseosos y particulados en la ciudad de Guayaquil (Ecuador). En la simulación se determinó la concentraciones de contaminantes por medio de un modelo de dispersión matemático Gaussiano, definidos durante la ejecución de la simulación se ha considerado el potencial impacto a las zonas industriales con el fin de mostrar la utilidad del sistema desarrollado, se realizó las comparaciones con otras dos herramientas de software con los cuales se analizó la contaminación gaseosa, los resultados conseguidos presentan los coeficientes de dispersión de las emisiones de los contaminantes.

Palabras Claves: Simulación, modelo de Gauss, contaminantes atmosféricos, sensores atmosféricos, calidad del aire, LabVIEW.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire se puede describir como la contaminación de la atmósfera por gaseoso, líquido o desechos sólidos o subproductos que pueden poner en peligro la salud humana y el bienestar de plantas y animales, reducir la visibilidad y producir olores indeseables. A pesar de que algunos contaminantes son liberados por fuentes naturales como volcanes, bosques de coníferas, y aguas termales, el efecto de esta contaminación es muy pequeña en comparación con la causada por las emisiones de fuentes industriales,

energía y la generación de calor, eliminación de residuos, y la operación interna de los motores de combustión. La quema de combustible es el mayor contribuyente a las emisiones de contaminantes a la atmósfera, causados por el hombre, con fuentes fijas y móviles igualmente responsables. [1] [2]

La contaminación del aire tiene un efecto directo sobre la salud humana. En casos extremos, ha causado una gran cantidad de afectados como resultado de la combinación de características geográficas inusuales con factores climáticos. Por ejemplo, episodios de incendios en fábricas industriales inmersas en el casco urbano de la ciudad de Guayaquil y cercanas a urbanizaciones y centros educativos primarios y secundarios. Esto es un ejemplo de los graves efectos adversos que resultan del exceso de industrias, junto con ciertos factores geográficos y meteorológicos en un área concentrada. La exposición a contaminantes del aire puede causar efectos agudos (corto plazo) y crónicos (largo plazo) en la salud. Los efectos más comunes son la irritación de los ojos, dolor de cabeza y náuseas. A veces los efectos crónicos tardan en manifestarse, duran indefinidamente y tienden a ser irreversibles. [3] [4]

La combustión contaminante relacionada a las industrias como a automóviles además de los fenómenos naturales generan Dióxido de azufre (SO₂), Monóxido de carbono (CO), Óxidos de nitrógeno (NO_x), Hidrocarburos (HC), Dióxido de carbono (CO₂), causando inestabilidad, desorden, daño o malestar en un ecosistema. Cabe indicar que actualmente en la ciudad de Guayaquil no existe un sistema de alerta o monitoreo de contaminantes en el Aire. [5]

La propuesta de la investigación es simular los parámetros y variables que definen los modelos de contaminación; tomando en consideración los principales tipos de contaminantes gaseosos, modelo de dispersión Gaussiano y la herramienta LabVIEW, usando como fuente de recolección de datos un grupo determinado de sensores. El resultado de la simulación es comparado con los valores generados por dos softwares de simulación ambiental (ISC3, CALPUFF). El desarrollo metodológico permite presentar los resultados que se plasman en los procedimientos de la simulación, basándose en las

comparaciones y teorías científicas facilitando así la realización de este trabajo. [6] [7]

Las comparaciones realizadas entre LabVIEW contra las otras aplicaciones de simulación ISC3, CALPUFF; va a permitir validar el diseño del simulador de contaminantes gaseosos, encontrando y descartando anomalías y ratificando la eficacia del sistema simulado en la plataforma de LabVIEW.

2. CALIDAD DEL AIRE

La calidad del aire se evalúa por medio de los denominados niveles de inmisión, que vienen definidos como la concentración media de un contaminante presente en el aire durante un período de tiempo determinado. La unidad en que se expresan normalmente estos niveles son microgramos de contaminante por metro cúbico de aire, medidos durante un período de tiempo determinado.

En la mayoría de los países, las normas de calidad del aire tienen como objetivo inmediato el evitar enfermedades en la población más. Hay que tener en cuenta que el objetivo es prevenir todo posible efecto sobre la salud del hombre, incluidas las alteraciones genéticas y físicas. [5]

En la evaluación de riesgos asociados a la contaminación y para la fijación de normas de calidad del aire, lo ideal sería disponer de una serie completa de curvas dosis-respuesta para los distintos contaminantes atmosféricos, para los diferentes efectos y para los distintos tipos de población expuesta. De momento no se dispone de esta información, para todos los contaminantes atmosféricos y aún es más difícil que llegue a reunirse para las combinaciones de sustancias que más frecuentemente se encuentran en el aire.

3. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica es la presencia en el ambiente de cualquier sustancia química, partículas, microorganismos que alteran la calidad ambiental y la posibilidad de vida. Las causas de la contaminación pueden ser naturales o artificiales, generado principalmente por la quema de combustibles fósiles (plantas de energía que funcionan a carbón, fábricas y vehículos), partículas y gases industriales.

El aire en la atmósfera tiene contaminantes criterio, llamados así porque la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) los regula. Se tienen dos tipos de estándares, el primer set (estándares primarios) está designado a proteger la salud pública, mientras que el segundo set (estándares secundarios) tiene como objetivo prevenir daños ambientales y a la propiedad. [8]

Hay seis contaminantes criterio del aire y son los siguientes:

- Material Particulado (PM)
- Ozono (O3)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Dióxido de Azufre (SO2)
- Dióxido de Nitrógeno (NO2)
- Plomo (Pb)

Hay otro tipo de clasificación que divide a los contaminantes en primarios, que son aquellos liberados directamente desde sus fuentes y secundarios, aquellos que se forman a través de

reacciones químicas entre los contaminantes primarios. Una fuente de contaminación es aquella que da origen a la misma.

En general se clasifican las fuentes de contaminantes en los siguientes grupos:

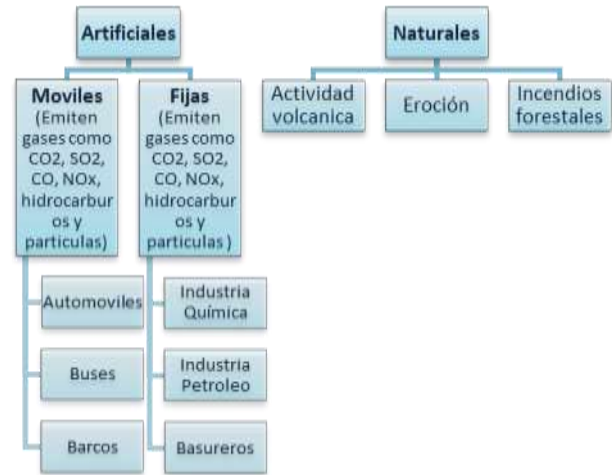


Figura 1. Procesos de gestión de conocimiento [5]

Cuando los gases y/o partículas son emitidos a la atmósfera desde una industria u otra fuente, resulta casi imposible predecir su evolución dentro de la misma; esto es debido a los complejos factores que gobiernan su ruta subsiguiente, los cuales dependen de: Factores Meteorológicos - Origen de la emisión - Procesos. Las cantidades de contaminantes provenientes de diferentes fuentes, que recibe una región, varían de un punto a otro, dependiendo de los vientos existentes y de la presencia de obstáculos naturales o artificiales como montañas y edificios. [9]

El transporte y la difusión del contaminante son afectados por los diferentes fenómenos físicos que ocurren en la atmósfera. En general la dispersión es el resultado de tres mecanismos dominantes: a). El movimiento medio general del aire que transporta el contaminante en la dirección del viento; b) las fluctuaciones turbulentas de la velocidad que dispersan el contaminante en todas las direcciones y c) la difusión de la masa debido al gradiente de la contaminación.

Es necesario conocer el grado de estabilidad de la atmósfera si se desea estimar la capacidad de la atmósfera para dispersar los contaminantes que recibe de las diferentes fuentes. Una atmósfera inestable se produce cuando hay una mezcla vertical de porciones de aire y depende de la diferencia entre el gradiente vertical ambiental y el adiabático seco. Se puede producir por la presencia de sistemas de presión baja (ciclones). Una atmósfera neutra se produce cuando hay igualdad entre el gradiente vertical ambiental y el adiabático seco y el efecto que ocasiona es que no haya movimiento vertical del aire. La atmósfera estable es cuando el gradiente vertical ambiental es menor que el gradiente vertical adiabático y por eso ocasiona resistencia al movimiento vertical del aire. [10] [11]

La inversión térmica evita que los contaminantes se dispersen, ya que hace imposible el movimiento vertical. Por ejemplo, si la emisión de una pluma es emitida por arriba o debajo de una capa de inversión. De tal forma que, en la emanación visible de

una chimenea, su comportamiento está influenciado por movimientos verticales y horizontales de aire. De acuerdo con los siguientes tipos: espiral, abanico, cono, flotación.

La descarga de una pluma se dispersará y no habrá concentraciones elevadas superficialmente. Existen varios tipos de pluma a continuación se presentan los diferentes tipos de chimeneas.

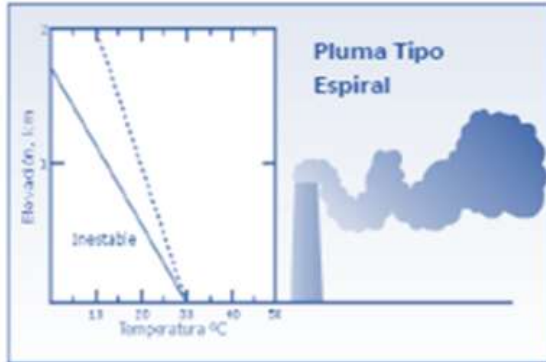


Figura 2. Tipos de plumas de chimeneas: Tipo espiral [11]

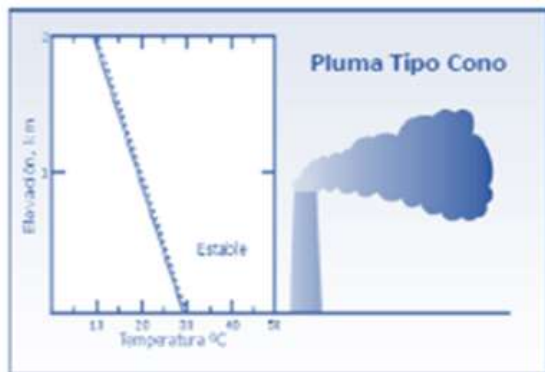


Figura 3. Tipos de plumas de chimeneas: Tipo cono [11]

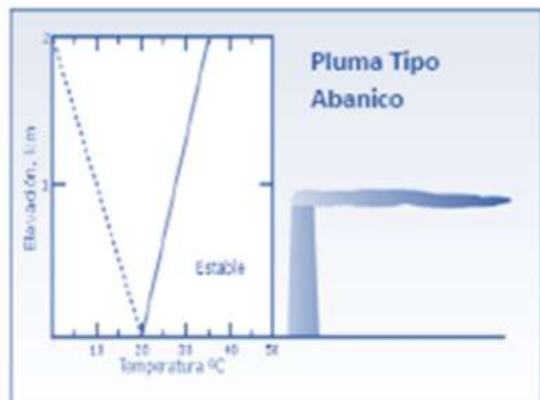


Figura 4. Tipos de plumas de chimeneas: Tipo Abanico [11]

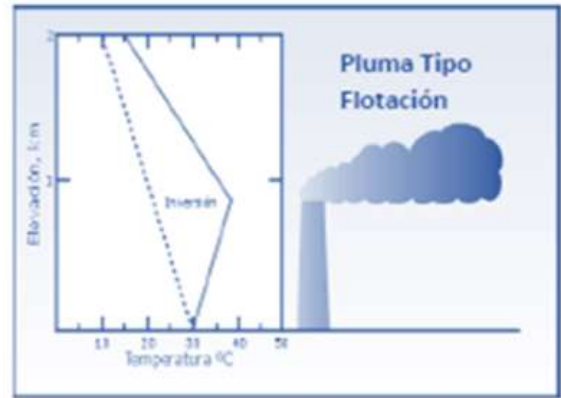


Figura 5. Tipos de plumas de chimeneas: Tipo Flotación [11]

Cuando la pluma es emitida se pone en contacto con el aire ambiental, lo cual recibe el nombre de arrastre.

En la gráfica de la altura efectiva de la chimenea esta expresada por la altura de la chimenea más la elevación promedio de la pluma (medida hasta la línea central imaginaria).

La elevación de la pluma dependerá del momentum y la flotabilidad. El momentum empuja los gases emitidos hacia el exterior de la chimenea para que entren en contacto con la atmósfera y la flotabilidad es la elevación de la pluma que es función del gradiente de temperatura entre la atmósfera y la pluma.

Los vientos horizontales tendrán un papel importante ya que éstos harán que la pluma se incline horizontalmente debido que al ser emitida, la velocidad vertical disminuirá por el arrastre que sufre al entrar en contacto con el aire.

La pluma perderá elevación por el viento, que ocasiona que ésta tenga un serpienteo y el aire será arrastrado hacia su interior.

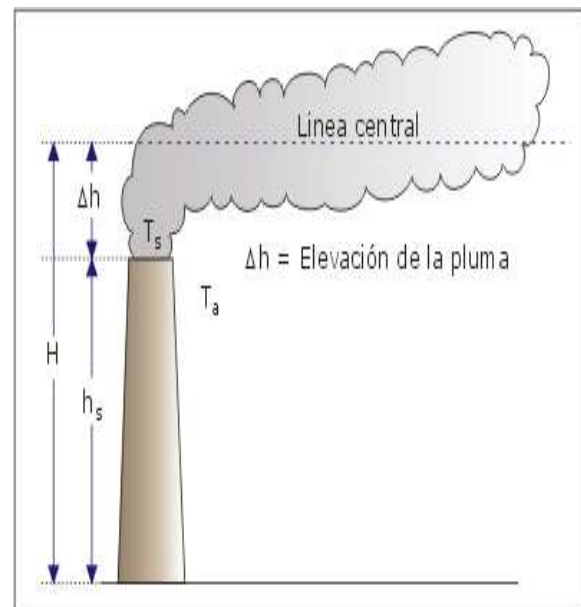


Figura 6. Altura efectiva de la chimenea [11]

4. MODELO GAUSSIANO DE DISPERSIÓN

La modelización de contaminantes sirve para la determinación de la variación de la concentración de un determinado contaminante en el espacio y en el tiempo. De esta manera, se puede estimar ciertos parámetros de emisión desde una fuente fija para mantener los límites indicados por la legislación en las zonas circundantes al foco emisor cuando se diseña una chimenea industrial, en la planificación del territorio, etc.

Un modelo de Dispersión de Contaminante es una expresión matemática que relaciona a la emisión de un material a la atmosfera con la concentración de dicho material en el ambiente (respecto a un lugar por el que pasa primero el viento).

Al utilizar el modelo Gaussiano para determinar los contaminantes gaseosos, requirió restablecer la ecuación Gaussiana y dar una solución analítica añadiendo la ecuación de los respectivos gases contaminantes.

Existen varios tipos de modelos de dispersión destinados a la estudiar la evolución de los contaminantes en la atmósfera. De todos los modelos desarrollados, uno de los más usados, cuando los contaminantes no son reactivos, es el modelo de dispersión Gaussiano. Éste modelo parte de varias consideraciones:

- La velocidad y dirección del viento entre el foco emisor y el receptor de contaminantes es constante.
- Todo el vertido permanece en la atmósfera, sin reacción alguna, y no existe deposición en forma de lluvia o partículas.
- La dispersión se puede describir por una distribución de Gauss.
- Factores de los que depende la dispersión de contaminantes:
- Naturaleza física y química de la emisión.
- Meteorología de la zona.
- Ubicación y tamaño de la chimenea.
- Características orográficas del terreno.

La ecuación general, para calcular la concentración del contaminante en un punto x,y,z (coordenada espacial).

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

Donde:

- C concentración de contaminante en el punto (x,y,z) en mg/m³.
- x, y, z: coordenadas espaciales en m.
- Q caudal de emisión del contaminante en µg/m³.
- σ_y σ_z Son las desviaciones estándar en las direcciones "y" y "z" respectivamente en m.
- u velocidad del viento en la boca de la chimenea en m/s.
- H altura efectiva de la chimenea en m.

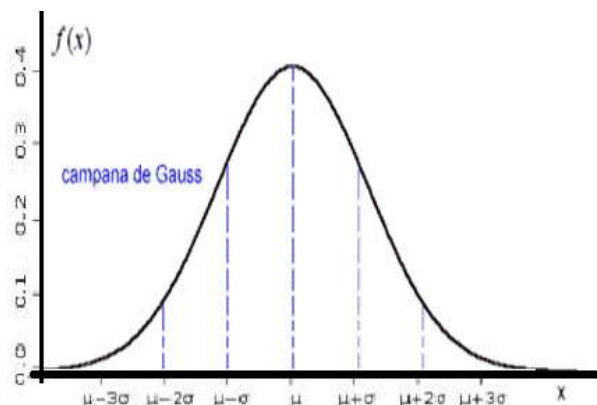


Figura 7. Campana de Gauss – Cálculo de σ_y σ_z [12]

Se puede calcular gráficamente como función de la clase de estabilidad y de la distancia al foco con las curvas de Pasquill-Gifford.

Otra forma de cálculo de la sobreelevación es la fórmula de Holland que nos da un valor muy aproximado, aunque tiende a subestimar la sobreelevación:

Donde:

- V_s velocidad de salida de los gases en la boca de la chimenea m/s.
- d diámetro interno del conducto de salida en cm.
- u velocidad del viento en boca de la chimenea en m/s.
- P presión atmosférica a la altura de la chimenea m/s.
- T_s temperatura de salida de los gases en °C.
- T_a temperatura ambiente °C.

	x<1km				x>1km		
Estabilidad	A	C	D	F	C	D	F
A	213	440,8	1,941	9,27	459,7	2,094	-9,6
B	156	106,6	1,149	3,3	108,2	1,098	2,0
C	104	61,0	0,911	0	61,0	0,911	0
D	68	33,2	0,725	-1,7	44,5	0,516	-13,0
E	50,5	22,8	0,678	-1,3	55,4	0,305	-34,0
F	34	14,35	0,740	-0,35	62,6	0,180	-48,6

Figura 8. Tipos de estabilidad atmosférica

5. SENSORES

El sensor es el elemento que proporciona una señal de tipo eléctrico. En el caso de que la señal que proporcione no sea eléctrica, se le suele dar el simple nombre de captador.

Una clasificación de los sensores en función del tipo de señal emitida proporcionada en su salida se muestra a continuación:

- **Analógicos:** Si la señal de salida es función proporcional a la magnitud física en todo el campo de actuación del dispositivo.

- **Digitales:** La señal de salida se presenta en forma de niveles discretos de tensión a los que se le asigna valores numéricos de acuerdo con un criterio preestablecido. Estas señales se obtienen en forma de trenes de pulsos.

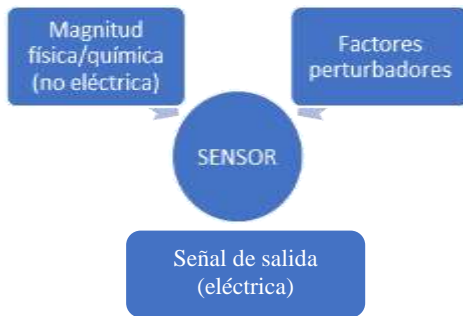


Figura 9. Actuación de un sensor

Sensor de monóxido de carbono (MQ-7) - Para uso en industrias o aplicaciones mineras. Este sensor ofrece un excelente performance y una larga vida útil con características estables de medición.

Características:

- Alta sensibilidad
- Rango de detección: 10 - 1,000 ppm CO
- Tiempo de respuesta
- Voltaje: 5.0V
- Dimensiones: Diámetro 16mm, Alto 10mm Alto excluyendo los pines.



Figura 10. Sensor MQ-7

Sensor de dióxido de carbono (MG-811) - Sensor de CO2 de excelente rendimiento, para uso en un gran rango de aplicaciones, incluyendo monitoreo de la calidad del aire, alarmas de humo, sistemas de alarmas en túneles y minas, etc. El sensor es fácil de utilizar y por su tamaño puede incorporarse fácilmente en un dispositivo portátil.

Características:

- Alta sensibilidad
- Rango de detección: 0 - 10,000 ppm CO2
- Tiempo de respuesta: <60s
- Voltaje: 6.0V
- Dimensiones: Diámetro 16mm, Alto 15mm excluyendo los pines, alto de los pines 6mm



Figura 11. Sensor MG-811

6. SENSOR DE GAS A UTILIZAR (LMP91000)

El sensor de gas (**LMP91000**) registra buena precisión de detección, es de baja potencia, tiene acceso a un amplificador de ganancia programable con un rango de ganancia de 1x a 128x (x es representado en metros). La elección de una ganancia más alta les permite utilizar mejor el rango dinámico de entrada del ADC de 24 bits integrado y resulta en un mejor rendimiento general del sistema y la precisión.

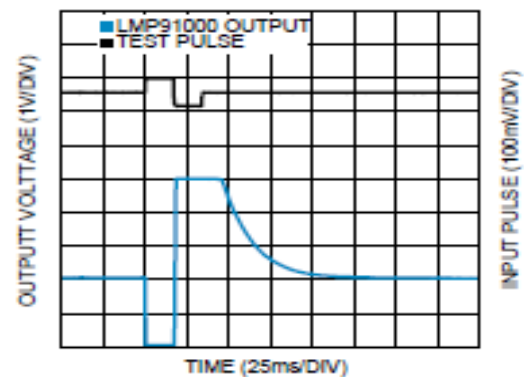


Figura 12. Forma del pulso de funcionamiento del sensor.

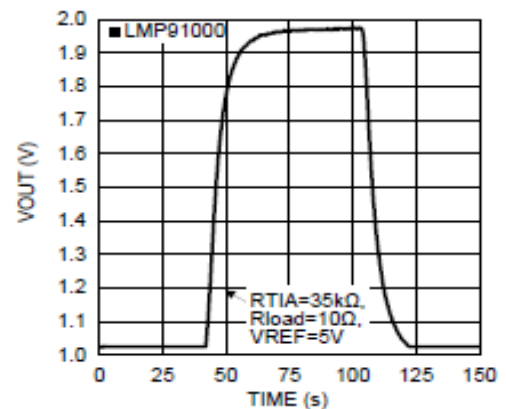


Figura 13. Salida analógica del sensor vs el tiempo.

- Máximo de voltaje es de 5,25 V
- Mínimo de voltaje es de 2,7 V
- Temperatura de funcionamiento es de -40 a 85 °C
- Exactitud ganancia Transimpedance 5%
- Linealidad $\pm 0,05\%$
- Impedancia de entrada 10 M Ω

7. METODOLOGÍA

En la Plataforma de LabVIEW se realizó el Sistema de simulación para sustentar el análisis de las emisiones contaminantes Gaseosas.

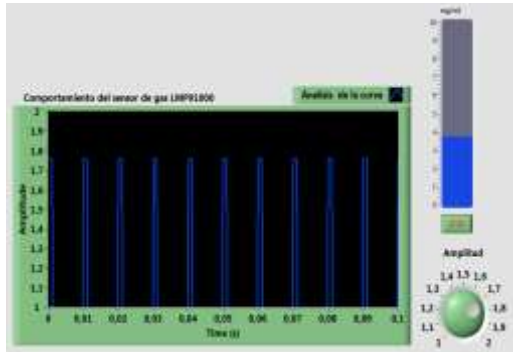


Figura 14. Representación del comportamiento del sensor Imp91000

Se desarrolló el diseño del diagrama de bloques del sensor (LMP91000), utilizando como referencia su datasheet, para que de esta manera simularlo en el entorno gráfico de la plataforma y observar el comportamiento funcional del sensor.

Para obtener este resultado se realizó la representación de fórmulas internas embebidas en el modelo Gaussiano; además la representación del sensor por Q (caudal de emisión del contaminante en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el modelo Gaussiano utilizado, los cuales fueron desarrollados en la plataforma de LabVIEW.

A continuación, la representación del cálculo de σ_y σ_z en la plataforma de LabVIEW.

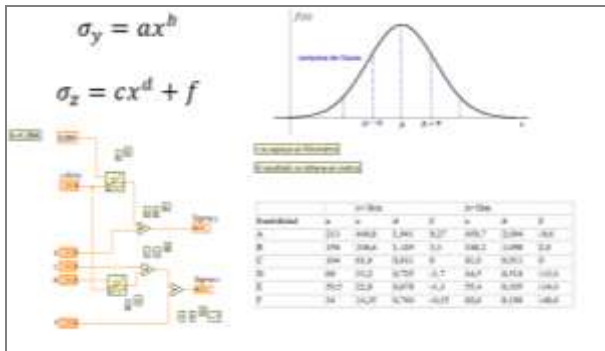


Figura 15. Calculo de σ_y σ_z

Representación del cálculo "u" velocidad del viento en la boca de la chimenea

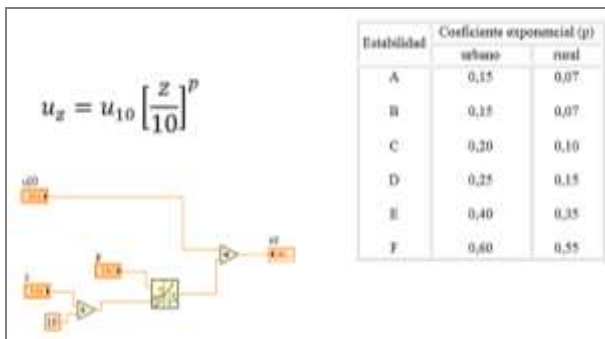


Figura 16. Calculo de "U"

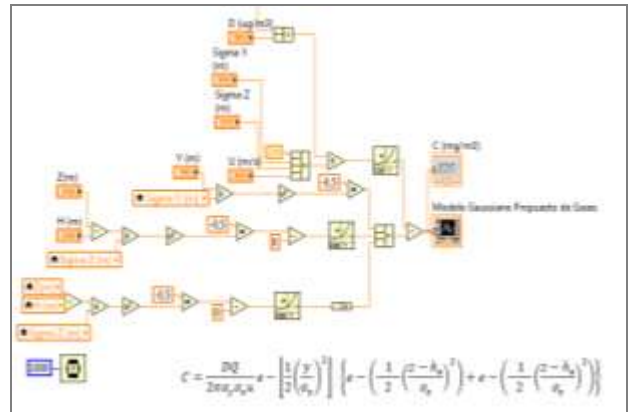


Figura 17. Diagrama de bloques del modelo gaussiano de gases propuesto

8. RESULTADOS

En la simulación del sensor (LMP91000), se consiguió los siguientes resultados:

- Observar la curva del comportamiento del sensor, optimizar las escalas amplitud vs tiempo en mg/m^3 para lograr obtener un mejor resultado.
- Establecer el límite de $10 \text{ mg}/\text{m}^3$, esta medida es el nivel para captar el gas.
- Trabajar las escalas en función de amplitud y tiempo en s.
- Detectar el nivel de gas en función de unidades mg/m^3 .

Los resultados del sistema de simulación en la plataforma de LabVIEW se dieron en base de la simulación de sensor y representación de las ecuaciones Gaussianas, obteniendo así los valores para representar las fuentes de emisión.

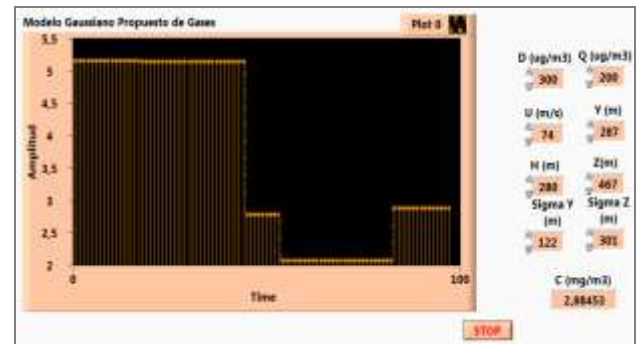


Figura 18. Comportamiento del modelo Gaussiano de gases propuesto

Para determinar el comportamiento de contaminantes gaseoso se realizó el análisis en un punto receptor de la emisión; este punto receptor corresponde al sector del área de emisión de contaminantes, de esta manera se obtiene los valores representativos de x,y,z en m, para realizar el respectivo cálculo y representarlo en la plataforma de simulación de LabVIEW.

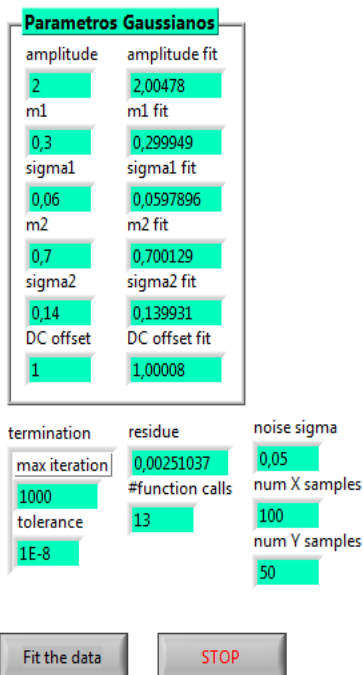
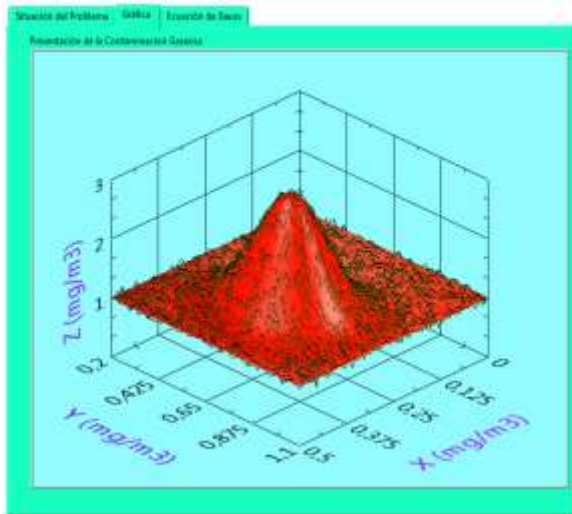


Figura 19 – Simulación de contaminantes gaseosos

En la figura 19, se observan los resultados obtenidos: eje “X” es la distancia en (mg/m³) por el eje “Y” en (mg/m³), por el eje “Z” esta (mg/m³), generando una representación tridimensional similar a la campana de gauss que está conformada por variables (formulas embebidas en LabVIEW) que son:

- Modelo matemático “Gaussiano”.
- Velocidad del viento.
- Altura de la chimenea.
- Flotabilidad.
- Altura del foco emisor.
- Valores de Sigmas

En el software ISC3 se presentan los resultados del modelo de dispersión expresados en µg/m³, tomando en consideración los parámetros antes mencionados. Con los contaminantes evaluados se logró identificar los resultados generados por el modelo de dispersión, corresponden a los principales gases contaminantes SO₂, CO, NO_x.

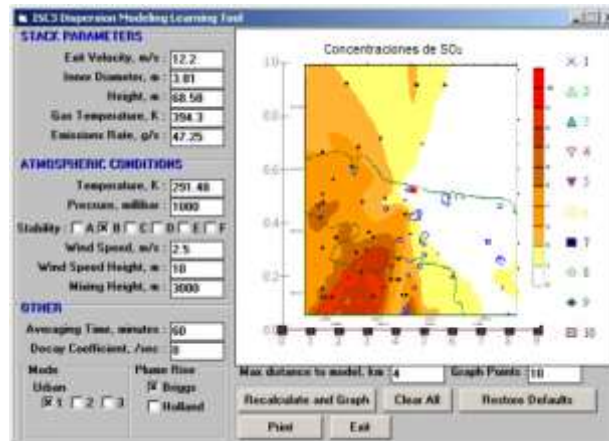


Figura 20 – Resultados concentraciones de SO₂ usando ISC3



Figura 21 – Concentraciones de contaminantes gaseosos SO₂, CO₂ simuladas en CALPUFF

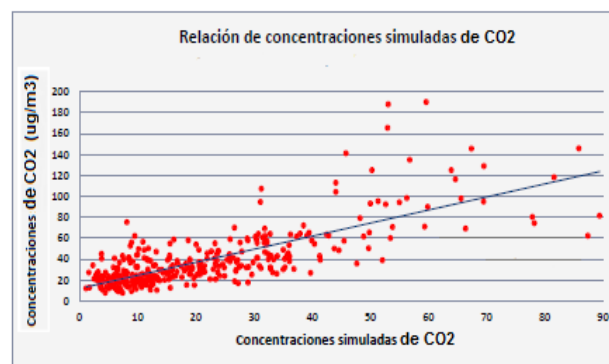


Figura 22 – Presentación de las concentraciones simuladas y observación de la respectiva concentración de CO₂ - simuladas en CALPUFF

Indicadores	ISC3	CALPUFF	LABVIEW
Índice de emisión (Q, en µg/m ³)	85	85	85
Desviación estándar de σ_y (µg/m ³)	44,1	44,1	44,1
Desviación estándar de σ_z (µg/m ³)	62,3	62,3	62,3
Altura efectiva de la chimenea (h en m)	50	50	50

Velocidad del viento (u en m/s)	5	5	5
Coefficiente exponencial (p)	0,15	0,15	0,15
Concentración (C en mg/m3)	9.805	8.072	9.000

Figura 23 – Comparación entre ISC3, CALPUFF y LabVIEW

Las comparaciones realizadas entre LabVIEW y los otros dos sistemas de simulación ISC3, CALPUFF; permiten validar en forma positiva el diseño del simulador de contaminantes gaseosos, el resultado posee las mismas características que los softwares (sistemas de simulación) antes mencionados, descartando anomalías y ratificando la validez del sistema simulado en la plataforma de LabVIEW, de esta manera se pudo obtener los siguientes indicadores:

Comparaciones	Margen de error de LabVIEW
Caso 1	-0,0821 %
Caso 2	0,1149%

Figura 24 – Comparación margen de error

9. CONCLUSIONES

Para el control y monitoreo de la calidad de aire es muy importante conocer las diferentes políticas y estrategias de acción para mitigar los efectos de las emisiones de contaminantes gaseosos, es por ello que mediante la propuesta de una herramienta de análisis ambiental nos permita la identificación y análisis de fuentes contaminantes, esto ayuda para la toma de decisiones en cuanto a prevenciones medio-ambientales, no solo por autoridades ambientales sino también para la ciudadanía en general.

Con la información generada por la simulación de Sensores atmosféricos sobre el Comportamiento de Contaminantes Gaseosos se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se obtuvo resultados de la simulación, logrando comparar con la información existente de otros estudios realizados.
- Se comprobó que el sistema de simulación implementado en el análisis del comportamiento de contaminantes gaseosos tiene un margen de error aceptable en relación con la comparación de los otros sistemas utilizados.
- El análisis realizado presento datos, los cuales estuvieron dentro de los márgenes esperados.
- En el desarrollo del análisis se calcularon los coeficientes de dispersión y la sobre-elevación de la pluma por dos métodos diferentes descartando anomalías en la ecuación de dispersión de Gauss.
- Finalmente se simuló el comportamiento de un sensor de medición de contaminantes atmosférico.

10. REFERENCIAS

[1] Molina, L. T., & Molina, M. J. (Eds.). (2002). Air quality in the Mexico megacity: an integrated assessment (pp. 137-212). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

- [2] Shah, A. S., Lee, K. K., McAllister, D. A., Hunter, A., Nair, H., Whiteley, W., ... & Mills, N. L. (2015). Short term exposure to air pollution and stroke: systematic review and meta-analysis. *bmj*, 350, h1295.
- [3] Sarmiento, R., Hernández, L. J., Medina, E. K., Rodríguez, N., & Reyes, J. (2015). Síntomas respiratorios asociados con la exposición a la contaminación del aire en cinco localidades de Bogotá, 2008-2011, estudio en una cohorte dinámica. *Biomédica*, 35(2).
- [4] Sánchez, J., & Caraballo, L. (2015). Repercusión de la contaminación del aire en la aparición de asma. *Revista Alergia México*, 62(4), 287-301.
- [5] Garces, A. H., Haza, U. J., González, J. A. S., Long, J. J. C., Rodríguez, S. S., Martínez, F. G., & Valle, A. T. (2015). Estado actual de los modelos de dispersión atmosférica y sus aplicaciones. *UCE Ciencia. Revista de postgrado*, 3(2).
- [6] Kim, G., & Lee, M. I. (2016). Analysis of the Representability of Average Wind over the Ulsan Metropolitan City Applied to the CALPUFF Dispersion Model. *한국기상학회 학술대회 논문집*, 281-282.
- [7] Atabi, F., Jafarigol, F., Moattar, F., & Nouri, J. (2016). Comparison of AERMOD and CALPUFF models for simulating SO₂ concentrations in a gas refinery. *Environmental monitoring and assessment*, 188(9), 516.
- [8] Oblasser, A., & Chaparro Avila, E. (2008). Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. CEPAL.
- [9] Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... & Feigin, V. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918.
- [10] Ignacio, Z. L., Emilia, C. D. A., Julio, F. S., & Carlos, S. B. (2017). Problemas de meteorología y climatología. Editorial UNED.
- [11] Sánchez Bonell, D. A. (2015). Modelo de dispersión de contaminantes basado en la discretización de la capa límite en Bogotá: una revisión conceptual (Bachelor's thesis, Universidad Militar Nueva Granada).