

Simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de una planta de generación de electricidad a biomasa

Simulation of pollutant dispersion in the atmosphere of biomass power plant

Daniel Pereira-Peláez

Empresa GREENCON S.R.L. Consultora en Desarrollo y Medio Ambiente
Calle Andrés Muñoz N° 2405, Sopocachi, ciudad de La Paz, Bolivia

danielpereiraia@gmail.com

Resumen: El presente trabajo consiste en la simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de módulos termoeléctricos a biomasa, en el marco de lo establecido en la Reglamento de Prevención y Control Ambiental (RPCA) de la Ley del Medio Ambiente N° 1333 para el desarrollo de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental (EEIAs). El área en estudio se encuentra en la región amazónica de nuestro país, realizándose su clasificación climática y análisis de datos históricos de parámetros meteorológicos y un estudio de línea base ambiental. Se emplearon ecuaciones gaussianas apropiadas para gases y partículas en diferentes categorías de estabilidad atmosférica y las correcciones que corresponden, considerando la rosa de vientos, distribución de sus direcciones prevalentes, elevación del penacho y flujos másicos entre otros, lo que permitió predecir y evaluar los impactos ambientales, plantear medidas de mitigación y un Programa de Monitoreo Ambiental (PMA). Los resultados se aplicarán en determinar las modificaciones en la calidad del aire, evaluar efectividad de las medidas y si corresponde realizar ajustes al funcionamiento de la termoeléctrica.

Palabras clave: Dispersión de contaminantes, termoeléctrica, biomasa.

Abstract: The present work consists in the simulation of the dispersion of pollutants in the atmosphere from biomass power plant, within the framework of the Regulation of Prevention and Environmental Control (RPCA) of the Law of the Environment N° 1333 for Environmental Impact Assessment Studies (EIAs). The study area is located in the Amazon region of our country, with its climatic classification and analysis of historical data of meteorological parameters and an environmental baseline study. Appropriate Gaussian equations were used for gases and particles in different categories of atmospheric stability and corresponding corrections, considering the wind rose, distribution of its prevailing directions, plume rise and mass flows among others, which allowed to predict and evaluate the environmental impacts and mitigation measures, and an Environmental Monitoring Program (EMP). The results will be applied in determining the changes in the air quality, evaluating the effectiveness of the

measures and if it is necessary to make adjustments to the operation of the biomass power plant.

Keywords: Dispersion of pollutants, power plant, biomass.

1 Introducción

En la región amazónica de Bolivia, actualmente existen sistemas aislados para la generación y distribución de la electricidad, los que usualmente funcionan a diésel, cuyo transporte debe ser garantizado para satisfacer la demanda cotidiana; sin embargo, persisten las continuas quejas por cortes e interrupciones del suministro de energía eléctrica.

Como una solución, el Gobierno Nacional (GN), en los últimos años, fue impulsando estudios de pre-inversión para la generación de electricidad a partir de energías renovables no convencionales, implementando un módulo de paneles solares fotovoltaicos de 5 (MW), que se incorporó a un sistema aislado, cuyo funcionamiento actual es híbrido. Como una forma adicional de apoyar con la generación de electricidad a este sistema y otros, considerando las proyecciones de demanda de electricidad, se realizaron estudios para la implementación de módulos termoeléctricos a biomasa, que en la región amazónica está compuesta por cáscara o residuos de las procesadoras de castaña, residuos generados por la actividad maderera y también como opción cultivos energéticos en sitios desmontados y localizados con el fin de no afectar la cobertura vegetal.

En nuestro país, desde hace más de dos décadas, se cuenta con la Ley del Medio Ambiente N° 1333 (1992) y sus Reglamentos (1995). En el marco del Reglamento de Prevención y Control Ambiental (RPCA), para la Categorización Ambiental de los Proyectos de Desarrollo, se tiene claramente establecida una metodología de sencilla aplicación para la Identificación de Impactos Ambientales (IIA) y para el desarrollo de los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental (EElAs)-Categorías I y II, se aplican distintas herramientas para predecir y evaluar los impactos, desde matrices, diagramas de redes, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelación matemática.

En el presente caso, la metodología de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) aplicada, consiste en la clasificación climática del área en estudio, el análisis de datos históricos de parámetros meteorológicos, estudio de línea base, y aplicación de apropiados modelos matemáticos de dispersión de gases y partículas en la atmósfera, para la predicción y evaluación de impactos, planteamiento de medidas de mitigación y un Programa de Monitoreo Ambiental.

2 Ecuación de difusión y modelo de dispersión Gaussiano

Se realiza el balance de masa en un volumen de control aplicando una ecuación de difusión simplificada, que describe una nube continua de la dispersión de una sustancia en un flujo turbulento:

$$\frac{dC}{dt} + U \frac{dC}{dx} = \frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dC}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(K_z \frac{dC}{dz} \right) + S \quad (1)$$

Donde:

x = Transporte del contaminante desde la fuente a lo largo de la coordenada x por el flujo del viento (advección) que presenta una velocidad media y sentido o dirección prevalente.

y = difusión del contaminante en la coordenada y (transversal).

z = difusión del contaminante en la coordenada z (vertical) medida desde el suelo

$C(x, y, z)$ = Concentración media de la sustancia en un punto (kg/m^3); ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

K_y, K_z = Constantes de difusividad de Eddy en la dirección de los ejes x y z (m^2/s)

U = Velocidad media del viento a lo largo del eje x (m/s)

S = Término fuente/sumidero ($\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$)

Las soluciones analíticas de esta ecuación para el caso de dispersión de contaminantes pasivos en un flujo turbulento se obtuvieron por primera vez en los años 20 por Roberts (1923) y Richardson (1926). Las constantes de difusividad de Eddy (K_y y K_z) son una forma de relacionar los flujos turbulentos de material con los gradientes medios de concentración, donde v y w son las velocidades medias de viento lateral y vertical:

$$\overline{v'c'} = -K_y \frac{\partial C}{\partial y}, \quad \overline{w'c'} = -K_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

Las coordenadas se refieren a las fluctuaciones turbulentas de los términos sobre sus valores medios; Por ejemplo, $c(t) = C + c'$, $u(t) = U + u'$, etc. Típicamente en la atmósfera $K_y > K_z$, lo que explica por qué la sección transversal de una pluma adquiere a menudo una forma elíptica.

Una interpretación de la ecuación (1) es la siguiente:

$\frac{dC}{dt} + U \frac{dC}{dx}$ Variación de la concentración en el tiempo y advección en la dirección del viento

$\frac{d}{dy} \left(K_y \frac{dC}{dy} \right)$, etc. Difusión turbulenta referida al centro de la pluma del contaminante (la pluma se expandirá con el tiempo debido a estos términos.)

S Término que representa la producción neta (o destrucción) del contaminante debido a las fuentes (o mecanismos de remoción).

La ecuación (1) se puede simplificar, haciendo varias suposiciones:

1. Las concentraciones de contaminantes no afectan al campo de flujo (dispersión pasiva).
2. La difusión molecular y la difusión longitudinal (a lo largo del viento) son despreciables.
3. El flujo es incompresible.
4. Las velocidades y concentraciones del viento pueden descomponerse en una media y fluctuar con el valor promedio de la fluctuación (estocástico) componente igual a cero. Los valores medios se basan en promedios de tiempo de 10-60 minutos.
5. Los flujos turbulentos están linealmente relacionados con los gradientes de las concentraciones medias como en la ecuación (2).
6. Las velocidades medias de viento lateral y vertical v y w son cero, por lo que también restringimos el análisis al flujo constante del viento sobre un terreno plano idealizado.

El modelo de penacho gaussiano, que está en el núcleo de casi todos los modelos de dispersión regulatorios, se obtiene de la solución analítica a la ecuación (1). Para una fuente puntual continua liberada en el origen en un flujo turbulento uniforme (homogéneo), la solución de la Ecuación (1) es:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi\sqrt{K_y K_z}} \exp\left(\frac{-y^2}{4K_y(x/U)}\right) \exp\left(\frac{-z^2}{4K_z(x/U)}\right) \quad (3)$$

Donde Q es el flujo másico en (g/s) o ($\mu\text{g/s}$) del contaminante que se encuentra en la corriente del aire, “ y ” es la dispersión lateral en (m), “ z ” es la dispersión vertical en (m) y U es la velocidad media del viento (m/s).

Desafortunadamente, las difusividades turbulentas K_y y K_z son desconocidas en la mayoría de los flujos, y en la capa límite atmosférica K_z no es constante, sino que aumenta con la altura sobre el suelo. Además, K_y y K_z aumentan con la distancia desde la fuente, debido a que la difusión es afectada por diferentes escalas de turbulencia en la atmósfera a medida que el penacho crece. A pesar de estas limitaciones, frecuentemente se aplica la Ecuación (3). Definimos los siguientes parámetros gaussianos:

$$\sigma_y = \sqrt{2K_y \frac{x}{U}} \quad ; \quad \sigma_z = \sqrt{2K_z \frac{x}{U}} \quad (4)$$

Entonces la forma final de la ecuación gaussiana, para un penacho elevado liberado en $z = H_p$, donde σ_y y σ_z son coeficientes de dispersión lateral y vertical respectivamente:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi U_p \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H_p)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H_p)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5)$$

En esta expresión se ha añadido un segundo término exponencial para tener en cuenta el hecho de que el contaminante no puede difundirse hacia abajo a través del suelo en $z = 0$. Este término "imagen" puede visualizarse como una fuente equivalente ubicada en $z = -H_p$ por debajo del suelo.

La ecuación (5) es la conocida ecuación gaussiana para una fuente puntual continua (Turner, 1994). La altura del penacho H_p es la suma de la altura real de la chimenea H_s y su elevación por la flotabilidad y el momento cuando es liberada Δh . La velocidad del viento U se toma como la velocidad media del viento a la altura de la chimenea. Puesto que normalmente estamos interesados en las concentraciones en el suelo (donde están los receptores como las personas), se asume $z = 0$ para obtener:

$$C(x, y, z = 0) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H_p^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (6)$$

Si además establecemos que: $H_p = 0$, obtendremos la distribución vertical debido a una fuente a nivel del suelo:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (7)$$

Resulta que este último modelo no es muy preciso. Para una liberación a nivel del suelo, el perfil vertical varía más como $\exp(-z^{1.5})$, en lugar de la forma gaussiana $\exp(-z^2)$, debido a las grandes variaciones verticales de la difusividad K_z cerca del suelo (Van Ulden, 1978). Un modelo más general, no gaussiano, que permite determinar la variación vertical de K_z , y la variación vertical del perfil de velocidad se puede escribir como:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} U \sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) f(z) \quad (8)$$

El término $f(z)$ es una función normalizada que describe la distribución vertical de la sustancia en el penacho. Para asegurar la conservación de la masa, estos modelos deben satisfacer:

$$\iint_{y,z} C U dy dz = Q \quad (9)$$

Donde la integración se toma sobre el plano y - z , perpendicular al eje del penacho.

2.1 Factores que intervienen en la elevación del penacho

Las condiciones meteorológicas y la duración de la emisión tienen una gran importancia en el alcance de la dispersión del penacho. Los factores principales son la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica que está definida en función del gradiente vertical de temperatura de las capas del aire, tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorías de Estabilidad Atmosférica de Pasquill-Gifford-Turner

Categoría de Estabilidad Atmosférica	Factor de corrección	$\frac{\partial \theta}{\partial z} \left(\frac{^{\circ}C}{100 m} \right)$
A	Extremadamente inestable	< -1.9
B	Inestable	-1.9 a -1.7
C	Ligeramente inestable	-1.7 a -1.5
D	Neutro	-1.5 a -0.5
E	Ligeramente estable	-0.5 a 4
F	Estable	> 4

3 Dispersión de material particulado en la atmósfera

La cantidad de partículas que se puede descargar a la atmósfera, está reglamentada por la Ley del Medio Ambiente N° 1333 para algunas industrias específicas. En estos casos, se debe, en general, incluir algún tipo de dispositivo de control, dentro de la corriente de flujo a fin de mantener los niveles de emisión dentro de los límites establecidos. Aún, con tales dispositivos de control, una pequeña porción del total de partículas en el gas se emitirá probablemente a la atmósfera. A fin de planificar las normas de emisión, es importante tener en cuenta la capacidad de pronosticar la tasa de deposición de las partículas, a nivel del suelo, y a diversas distancias de la fuente.

Uno de los métodos utilizados para pronosticar la tasa de sedimentación de las partículas resultantes de las emisiones por chimeneas es la modificación del modelo gaussiano de dispersión de gases, utilizado para las emisiones gaseosas de las chimeneas. La dispersión gaseosa desde una chimenea con altura equivalente H , y sin reflexión, está dada por:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

Donde U es la velocidad promedio del viento y Q es la tasa de emisión del contaminante gaseoso, en masa por tiempo unitario. La expresión “sin reflexión” es muy importante, puesto que para las emisiones de partículas el terreno actúa como un sumidero para las partículas emitidas. Para las emisiones gaseosas, el terreno actúa como una superficie reflectora en la mayoría de los casos, y esta reflexión intensifica la concentración en la fase gaseosa del contaminante.

Además de la corrección para amortiguar la reflexión, es necesario efectuar otra modificación en la ecuación de dispersión del tipo gaussiano. Los tipos de contaminantes gaseosos no se ven afectados por la fuerza de la gravedad. No obstante, el movimiento de las partículas sólidas está muy afectado por la gravedad así como por las fuerzas sobre el fluido asociadas con el movimiento atmosférico. Por tanto, la ecuación de dispersión debe manifestar estas fuerzas. Esencialmente, el efecto de la gravedad sobre la dispersión de las partículas es hacer que la línea central de la emisión parezca inclinarse hacia abajo según la corriente del contaminante pasa más adelante en la dirección de la corriente (se debe tener en cuenta el tamaño de las partículas y la gravedad que actúa sobre ellas) Comparada con la línea central del penacho que es sensiblemente horizontal para las emisiones gaseosas, la pluma de las partículas parece inclinarse hacia abajo, con mayor prontitud.

A causa de la gravedad, será necesario usar una corrección a la magnitud H en la ecuación de dispersión gaussiana para la deposición general del material particulado. La distancia de caída libre de una partícula después que abandona la chimenea con una Velocidad terminal V_t (o de sedimentación) es simplemente x , donde t es el tiempo que le toma a la corriente principal del contaminante para alcanzar una distancia x en la dirección del viento. El tiempo t se expresa también por x/u . Por tanto, la distancia de caída libre que es necesario aplicar como corrección a H es $V_t x/u$. esto equivale a desplazar la línea central de la distribución gaussiana en la dirección z hacia abajo, en una cantidad $V_t x/u$. Teniendo en cuenta de esta manera el efecto gravitacional, la concentración de las partículas en general, está dada por:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - \left(H - \frac{V_t x}{U} \right)}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (11)$$

La concentración a nivel del suelo a lo largo de la línea central tiene un especial interés. Si hacemos que $y=0$ y $z=0$, se encuentra que:

$$C(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{H - \frac{V_t x}{U}}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (12)$$

Donde:

Q es la tasa de emisión de las partículas.

Además de evaluar la concentración C de las partículas en determinada situación, se pueden expresar los resultados de la dispersión de las partículas en términos de la masa depositada por tiempo y área unitaria, W.

$$W = \frac{\text{tasa de transporte de masa}}{\text{área}} = \frac{(\text{tasa volumétrica})(\text{concentración})}{\text{área}} \quad (13)$$

$$W = (\text{velocidad})(\text{concentración}) = V_t \quad (14)$$

$$\frac{\text{masa}}{\text{tiempo} * \text{área}} = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo} * \text{área}} \frac{\text{volumen}}{\text{volumen}}$$

$$[W] = \left[\frac{g}{m^2 s} \right]; [Q] = \left[\frac{g}{s} \right]; [C] = \left[\frac{g}{m^3} \right]$$

4 Clasificación climática y meteorología en el área en estudio

A comienzos del siglo XX el geógrafo, climatólogo y botánico alemán, nacido en San Petersburgo, Wladimir Köppen presentó una clasificación de los climas del mundo, basándose en dos elementos climáticos, la temperatura del aire y la cantidad de agua disponible, en relación con las características fitogeográficas. La primera letra o letra principal (Grupo climático) distingue cinco grupos climáticos principales, definidos por umbrales térmicos y de precipitación, que corresponden a las grandes formaciones de vegetación. Estos climas son designados con las primeras letras del alfabeto, escritas en mayúscula: A, B, C, D y E. Al grupo tropical le corresponde la letra **A**. La segunda letra hace referencia al régimen de precipitaciones:

Tabla 2. Clasificación climática y precipitaciones

Af	Ecuatorial	Cálido y lluvioso todo el año, sin estaciones. Es el clima de la selva lluviosa.	Ningún mes con precipitación por debajo de 60 mm.
Am	Monzónico	Cálido todo el año, con una estación seca corta seguida por una húmeda con fuertes lluvias. Es el clima de los bosques monzónicos.	Con algún mes por debajo de 60 mm y si la precipitación del mes más seco es superior a la fórmula [100-(Precipitación anual/25)]
Aw	Sabana	Cálido todo el año, con estación seca. Es el clima propio de la sabana.	Con algún mes por debajo de 60 mm y si la precipitación del mes más seco es inferior a la fórmula [100-(Precipitación anual/25)]

A continuación, se presenta un mapa del departamento de Pando, con sus áreas urbanas de color fucsia.



Figura 1: Clasificación climática del área en estudio y áreas urbanas.

Fuente: Estudio planta de generación de electricidad a partir de Biomasa, 2016.

Al área en estudio que comprende los municipios de Cobija y Porvenir (medio rural), le corresponde un clima tropical húmedo cálido, del tipo Am con período seco, es decir con más de un mes de precipitación menor a 60 mm (Ver Meteorología – Clima diagrama) y una precipitación anual que sobrepasa la evapotranspiración. En la época seca, entre mayo y septiembre, la invasión de los frentes fríos del sur (surazos) es frecuente, causando caídas bruscas de temperaturas, descendiendo desde 30°C hasta 15°C en pocas horas. Sin embargo, estos son de corta duración, entre dos y tres días.

4.1 Meteorología

En el departamento de Pando, cuentan con una Estación Meteorológica (EM) de la Administración de Aeropuertos y Servicios Auxiliares a la Navegación Aérea (AASANA) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), ubicada en el aeropuerto Cap. Aníbal Arab Fabul (municipio de Cobija), cuyos registros de diez años, permitieron establecer que la precipitación promedio anual varía entre 1590,2 (mm) a 3479 (mm), las temperaturas medias se encuentran entre 24,4 (°C) y 27,1 (°C), el período seco o de estiaje comprende cinco meses, que usualmente ocurren entre mayo a septiembre. Los meses más cálidos son agosto y septiembre que alcanzan los 33,4 °C (temperatura máxima media), mientras que julio es el mes más frío con 17,7 °C (temperatura mínima media).

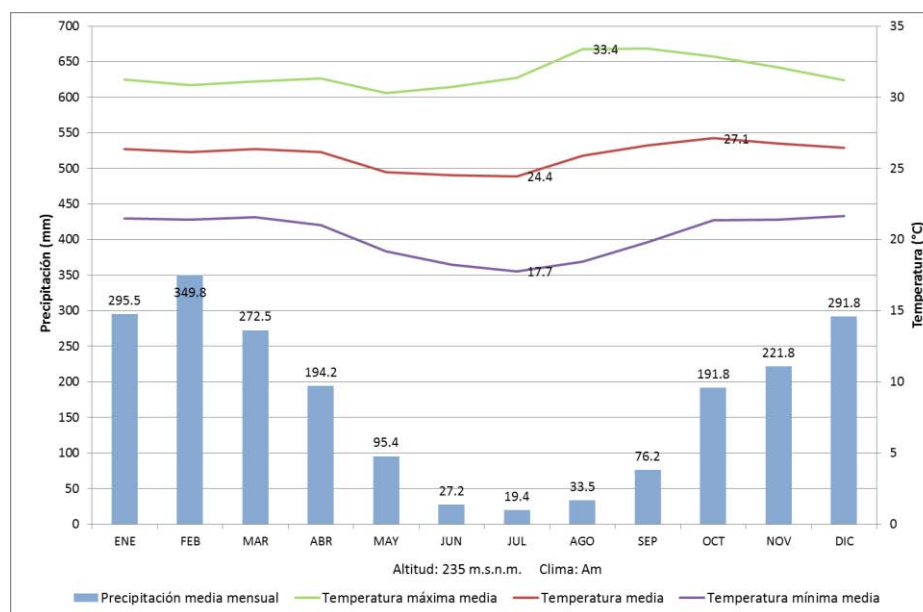


Figura 2: Clima diagrama EM Aeropuerto Cap. Anibal Arab Fabul (10 años).

Fuente: Elaboración propia, 2016.

4.2 Rosa de Vientos

También se preparó la denominada rosa de vientos para un período de 10 años (Ver la Figura 3, inciso a), siendo que el viento en su mayor porcentaje (45.67 %) de prevalencia proviene de la dirección Norte (N) y se dirige hacia el Sur (S), lo que ocurre en sentido contrario en un 18.11 %.

Con respecto al comportamiento de los vientos en época de estiaje que tiene una duración de cinco meses (mayo-septiembre), se hizo un gráfico de la distribución de la frecuencia de la dirección prevalente (Figura 3, inciso b), siendo la dirección Norte la que acumula un mayor porcentaje de 37.50 %, seguida de la dirección Sur con un 32.50 %, con un mayor porcentaje de velocidad media entre 2.1 (m/s) y 3.6 m/s.

5 Emisiones a la atmósfera de centrales termoeléctricas a biomasa

El material particulado, está compuesto por ceniza e inquemados (hollín). La ceniza producto de la combustión se clasifica como de fondo y volante, la primera se deposita en el fondo del hogar o cámara de combustión, es recogida y dispuesta generalmente en patios o pilas, donde puede ser re suspendida a la atmósfera por acción del viento. La ceniza volante es arrastrada y emitida a la atmósfera por los gases de combustión. Las partículas que se emiten a la atmósfera son de variados

tamaños y composición, lo cual depende de las características del combustible y condiciones termodinámicas de la combustión.

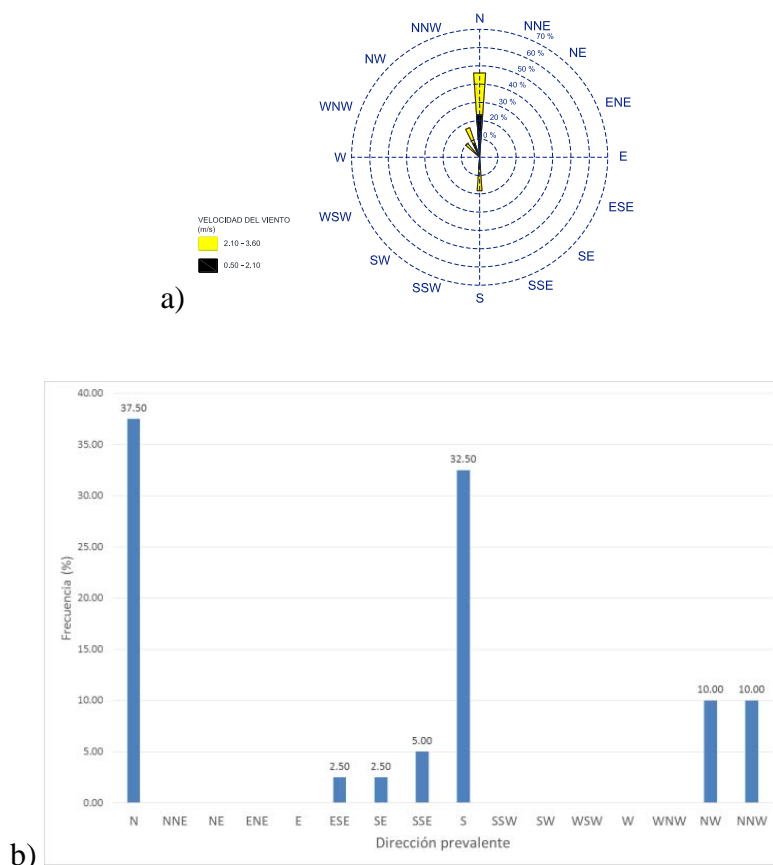


Figura 3: a) Rosa de Vientos (anual); b) Distribución de frecuencia de vientos (Estiaje).

Fuente: Elaboración propia, 2016.

En los sistemas con control de partículas, de acuerdo con la eficiencia de colección del sistema, la mayor parte de la ceniza volante es retenida y dispuesta junto con la ceniza de fondo.

Cabe destacar que los módulos de generación termoeléctrica a biomasa propuestos dentro del proyecto, contarán con un sistema de control de la emisión de partículas, compuesto por un multiciclón y filtro de mangas (Ver la Figura 4), que es imprescindible minimizar posibles alteraciones de la calidad ambiental en el área en estudio, y se podrán ubicar entre 12 (km) y 35 (km) de las áreas urbanas de Cobija y Porvenir.

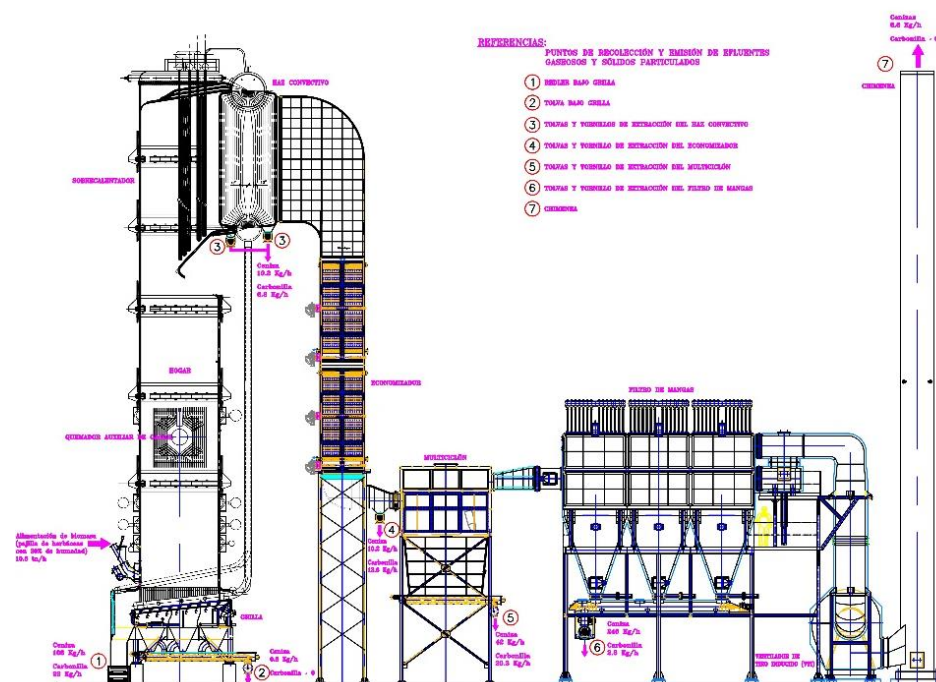


Figura 4: Sistema de control de emisiones (gases y partículas).

Fuente: Estudio Planta de Generación de Electricidad a partir de Biomasa, 2016.

6 Límites permisibles de calidad del aire

Tabla 3. Límites Permisibles de Calidad del Aire

Contaminante	Fórmula/Sigla	Valor de Concentración	Período de Muestreo
Monóxido de Carbono	CO	10 mg/m ³	Media en 8 horas
		40 mg/m ³	Media en 1 hora
Dióxido de Azufre	SO ₂	80 µg/m ³	Media aritmética anual
		365 µg/m ³	Media en 1 hora
Dióxido de Nitrógeno	NO ₂	150 µg/m ³	Media aritmética en 24 horas
		400 µg/m ³	Media en 1 hora
Partículas Suspensas Totales	PST	260 µg/m ³	Media aritmética en 24 horas
		75 µg/m ³	Media aritmética anual
Partículas Menores de 10 micras	PM ₁₀	150 µg/m ³	Media aritmética en 24 horas
		50 µg/m ³	Media aritmética anual

Límites permisibles de calidad del aire del Reglamento en materia de contaminación atmosférica (RMCA)

Fuente: RMCA. Ley del medio ambiente N° 1333, 1995.

7 Modelación matemática de la dispersión de gases y partículas

A continuación se presenta las ecuaciones empleadas en la modelación matemática de la dispersión de contaminantes en la atmósfera y los resultados obtenidos. Cabe mencionar que las fuentes se encuentran en medio rural con sentido de dispersión hacia las áreas peri-urbanas de Cobija y Porvenir.

7.1 Parámetros de dispersión de fuentes puntuales

Los parámetros σ_y y σ_z (coeficientes de dispersión) son las desviaciones tipo en las direcciones lateral y vertical respectivamente. Representan una medida de la dispersión del penacho en dichas direcciones. Tales parámetros son función de la distancia a la fuente emisora viento abajo y de la Categoría de Estabilidad Atmosférica (CEA). Estos coeficientes se suelen presentar en forma gráfica o pueden calcularse según formulas empíricas.

Para calcular σ_y y σ_z (en metros) para el modo rural se utilizan ecuaciones que se aproximan a las curvas de Pasquill-Gifford (Turner, 1970). Las ecuaciones para calcular σ son de la forma:

$$\sigma_y = 465.11628(x)\tan(TH) \quad (14)$$

Donde:

$$TH = 0.017453293[c - d\ln(x)] \quad (15)$$

En la Tabla 4, vienen dados los coeficientes c y d:

Tabla 4. Coeficientes c y d medio rural

CEA	c	d
A	24.167	2.5334
B	18.333	1.8096
C	12.5	1.0857
D	8.333	0.72382
E	6.25	0.54287
F	4.1667	0.36191

Fuente: Turner, 1970

En la ecuación (15) la distancia en la dirección del viento está en kilómetros. La ecuación usada para calcular σ_z es de la forma:

$$\sigma_z = ax^b \quad (16)$$

Donde la distancia en la dirección del viento x está en kilómetros y σ_z está en metros. Los coeficientes a y b vienen dados en la Tabla 6.

7.2 Corrección de la velocidad del viento

La velocidad del viento se acostumbra a medir a 10 metros de altura. Esta velocidad, a niveles más bajos de 10 metros, se ve reducida notablemente debido a los efectos de rozamiento. Para niveles distintos de este valor, la velocidad del viento debe corregirse según la relación:

$$u_z = u_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (17)$$

Donde: u_z = Velocidad del viento a la altura de la fuente emisora (m/s), u_{10} = Velocidad del viento a la altura de 10 metros de altura (m/s), z = Altura de la fuente emisora (m) y p = Coeficiente exponencial

En la Tabla 5, se presentan los valores de p (medio urbano y rural), que son función de la CEA y la rugosidad del suelo.

Tabla 5. Coeficientes de corrección para la velocidad del viento

Clase de Estabilidad Atmosférica	Coeficiente exponencial atmosférico	
	Urbano	Rural
A	0.15	0.07
B	0.15	0.07
C	0.2	0.1
D	0.25	0.15
E	0.3	0.35
F	0.3	0.35

Fuente: Modelos de Dispersión de Contaminantes en la Atmósfera, 1997.

Tabla 6. Coeficientes a y b

CEA: A*	a	b	CEA: D	a	b	CEA: F	a	b
X (km)			X (km)			X (km)		
<0.1	122.8	0.9447	<0.3	34.459	0.86974	<0.2	15.209	0.81558
0.1-0.15	158.08	1.0542	0.31-1	32.093	0.81066	0.21-0.70	14.457	0.78407
0.16-0.2	170.22	1.0932	1.01-3	32.093	0.64403	0.71-1	13.953	0.68465
0.21-0.25	179.52	1.1262	3.01-10	33.504	0.60486	1.01-2	13.953	0.63227
0.26-0.30	217.41	1.2644	10.01-30	36.65	0.56589	2.01-3	14.823	0.54503
0.31-0.4	258.89	1.4094	>30	44.053	0.51179	3.01-7	16.187	0.4649
0.41-0.5	346.75	1.7283				7.01-15	17.836	0.41507
0.51-3.11	453.85	2.1166				15.01-30	22.651	0.32681
>3.11	se asume 5000					30.01-60	27.074	0.27436
						>60	34.219	0.21716

* Si el valor calculado de σ_z excede los 5000 metros, σ_z es igual a 5000 metros.

Donde σ_y está en metros y x está en kilómetros.

Fuente: Turner, 1970

7.3 Estimación de la elevación del penacho

La elevación del penacho (Δh), se define como la diferencia entre la altura de la línea central final del penacho y la altura inicial de la fuente. Esta elevación esta originada por la fuerza ascensional y el impulso vertical del efluente. La temperatura de salida del efluente en el caso de que supere en más de 50 °C la temperatura ambiental, tiene mayor influencia que el impulso vertical en la determinación de la altura que alcanzará el penacho.

Como regla general la elevación del penacho es directamente proporcional al contenido calorífico del efluente y la velocidad de salida del mismo, e inversamente proporcional a la velocidad local del viento.

Una de las ecuaciones más empleadas para el cálculo de esta elevación, es la de Holland (1953):

$$\Delta h = \frac{V_s * d}{U} \left(1.5 + 2.68 * 10^{-3} * P * \frac{T_s - T_a}{T_s} * d \right) \quad (18)$$

Donde Δh es la elevación del penacho por encima de la fuente emisora (m), V_s es la velocidad de salida o emisión del contaminante (m/s), d es el diámetro interior del conducto de emisión (m), P es la presión atmosférica (mbar), T_s es la temperatura del contaminante (°K) y T_a es la temperatura ambiente atmosférica (°K) y $2.68 * 10^{-3}$ es una constante expresada en (mbar/m).

Donde H es la altura efectiva de la emisión, e igual a $h + \Delta h$; siendo h la altura de la chimenea y Δh la sobre elevación del penacho debida a la capacidad de flotación de los gases calientes y a la cantidad de movimiento de los gases que salen verticalmente al ser expulsados por la parte superior de la chimenea.

Los valores de Δh obtenidos con esta fórmula deben corregirse (Ver Tabla 7) multiplicando por un factor, establecido por Pasquill-Gifford-Turner, que es función de las condiciones meteorológicas, que se describen más adelante.

Tabla 7. Factor de Corrección para Δh

CEA	Factor de corrección
A, B	1.15
C	1.1
D	1
E, F	0.85

Fuente: Holland.

7.4 Corrección para C en función del tiempo promedio según concentraciones permisibles

Para realizar la corrección en función del tiempo promedio, se utiliza la siguiente fórmula:

$$C_t = C_{10} \left(\frac{10}{t} \right)^{0.5} \quad (19)$$

Dónde:

C_t = Concentración para un tiempo promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_{10} = Concentración para un tiempo de diez minutos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

t = Tiempo en minutos (min).

7.5 Resultados

La modelación de la dispersión de gases y partículas en la atmósfera se realizó aplicando las ecuaciones (5) y (12) respectivamente. Donde C es la concentración en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), G es el flujo másico de gas (kg/seg), Q es la tasa de emisión de las partículas (g/seg), σ_y y σ_z son los coeficientes de dispersión lateral y vertical (m), U es la velocidad del viento (m/s) que se obtuvo a partir de datos meteorológicos en el área en estudio, H es igual a la suma de: altura física de la chimenea (h) y Δh que es la elevación de la pluma o penacho por flotabilidad (m), realizando correcciones de acuerdo a la CEA, tal como se presenta en la Tabla 8.

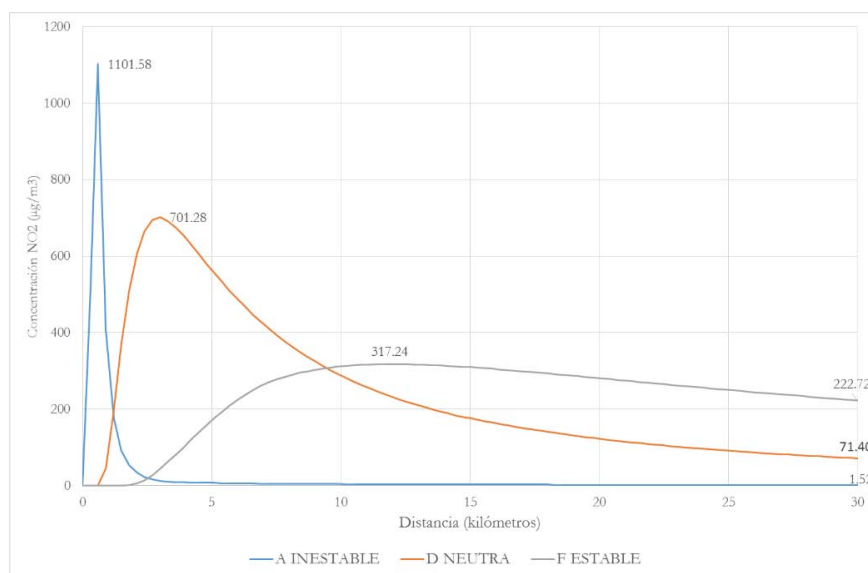


Figura 5: Dispersión de contaminantes gaseosos en la atmósfera (NO_2).

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Cabe mencionar que los flujos máscicos de gases y cenizas volantes (partículas), son datos de diseño de los módulos termoeléctricos a biomasa (Procesos de Evacuación de Gases e Inquemados).

Tabla 8. Datos en entrada para el modelo matemático de dispersión de contaminantes

Parámetro	Unidad	Valor	Descripción
Q	g/s	2,44	Flujo máscico partículas
Vt	(mm/s)	3	Velocidad terminal o de sedimentación (10 μ m)
G	(kg/s)	0,50	Flujo máscico de gases (NO ₂)
Y	(m)	0,00	Condiciones del eje y
Z	(m)	0,00	Condiciones del eje z
H_A	(m)	112,82	Altura de chimenea + penacho CEA_A
H_D	(m)	100,71	Altura de chimenea + penacho CEA_D
H_F	(m)	88,61	Altura de chimenea + penacho CEA_F
H	(m)	20,00	Altura física de la chimenea
Δ h_A	(m)	92,82	Elevación del penacho por flotabilidad_CEA_A
Δ h_D	(m)	80,71	Elevación del penacho por flotabilidad_CEA_D
Δ h_F	(m)	68,61	Elevación del penacho por flotabilidad_CEA_F
U_A	(m/s)	2,20	Velocidad del viento_CEA_A
U_D	(m/s)	2,33	Velocidad del viento_CEA_A
U_F	(m/s)	2,68	Velocidad del viento_CEA_A

Fuente: Elaboración propia, 2016.

7.6 Dispersión de contaminantes gaseosos

Cabe mencionar que la dirección predominante del viento en su mayor porcentaje proviene del Norte y se dirige hacia el Sur, en sentido contrario a las áreas urbanas de los municipios de Cobija y Porvenir, lo que también puede variar en sentido opuesto transportando los contaminantes hacia las áreas peri-urbanas.

En la Figura 5, se aprecia el resultado gráfico de la dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO₂) en la atmósfera en una distancia de 12 kilómetros, asumiendo para el presente caso un escenario de reducida reactividad fotoquímica. Se puede observar que la dispersión presenta un comportamiento distinto en cada CEA, siendo que los mayores picos de concentración se encuentran en la CEA A. En caso del NO₂ los niveles de concentración se encuentran por encima del límite permisible del RMCA (Tabla 3) para un período de 1 hora, en un circundante de 8 kilómetros

Con respecto al CO, alcanzar las concentraciones del límite permisible requiere mayores niveles de emisión que estaría asociada a deficientes condiciones del proceso de combustión.

La concentración de NO₂ en el área urbana de Cobija no sobrepasa los 8 µg/m³ en un período de siete días de muestreo (Informe Nacional de la Calidad del Aire 2014 - 2015).

7.7 Medidas de mitigación de gases en fuentes fijas

Las técnicas desarrolladas para controlar las emisiones de los NO_x se pueden clasificar en dos grupos, aquellas que consisten en modificaciones en la combustión para reducir la formación de los NO_x (medidas primarias) y aquellas consistentes en el tratamiento de efluentes para eliminar los NO_x de forma posterior a la combustión (medidas secundarias):

Los niveles de emisión de estos NO_x están asociados a la combustión, por lo que deberá garantizarse el mantenimiento preventivo del sistema, y en el caso del NO₂ su control a través de la incorporación de un Sistema de Control de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), ya sea por medio de un Sistema de Reducción Selectiva Catalítica (SCR) u otro sistema similar que reduce químicamente los óxidos de nitrógeno a vapor de agua y Nitrógeno molecular (N₂), mediante la aplicación de urea o amoníaco. Requiere de un catalizador para permitir reacciones a menores temperaturas y así alcanzar mayores niveles de remoción (80-95 %).

7.8 Dispersión de partículas

Con respecto a la emisión de partículas, se realizó la modelación matemática considerando un diámetro aerodinámico de PM₁₀ y la velocidad de sedimentación o terminal para esa fracción, lo que puede modificarse en función a las fracciones de material particulado en estudio. En la Figura 6 se puede observar que el comportamiento de la dispersión y sedimentación (x, 0, 0), es característico para cada categoría de estabilidad atmosférica, presentando mayores niveles en las CEA: D y F hasta los cinco kilómetros. Las concentraciones de material particulado no sobrepasan los límites permisibles del RMCA (Tabla 3) y la Norma Boliviana 62011 que es de 50 (µg/m³).

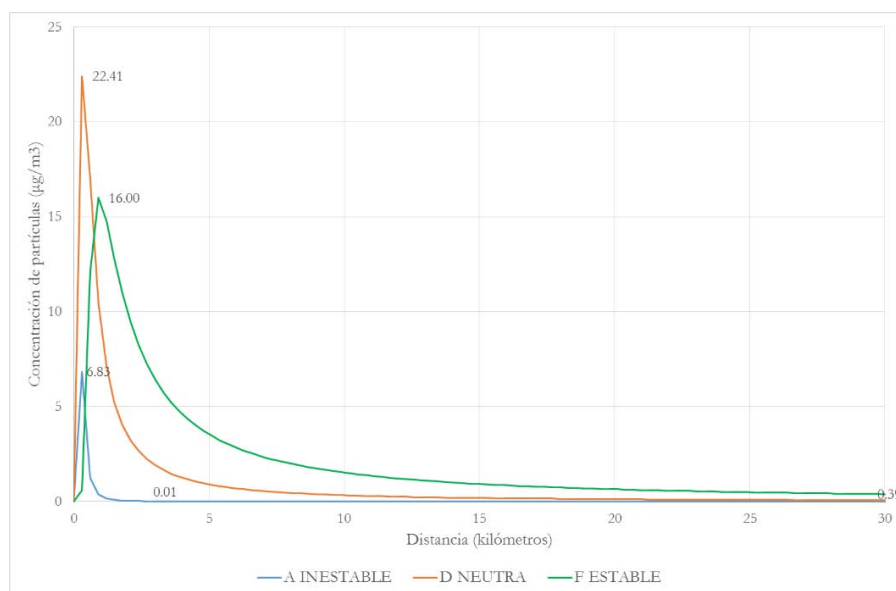


Figura 6: Dispersión de partículas en la atmósfera (10 µm). Fuente: Elaboración propia, 2016.

Cabe mencionar que las concentraciones de línea base en el área en estudio 32.4 y 37.7 (µg/m³) y en el área urbana de Cobija se encuentran entre los 50 y 90 (µg/m³) de acuerdo al Informe Nacional de la Calidad del Aire 2014 - 2015.

7.9 Medidas de mitigación de partículas en fuentes fijas

Como se mencionó, los módulos o plantas de biomasa, cuentan con un sistema de control de partículas, cuyo funcionamiento deberá verificarse periódicamente.

7.10 Programa de Monitoreo Ambiental

Se preparó un Programa de Monitoreo Ambiental, que en lo referido a gases y partículas, comprende realizar mediciones del flujo de gases y partículas en la chimenea (emisión), muestreo de aire en inmediaciones de los módulos termoeléctricos, caracterización de las fracciones PST, PM10, PM2.5 y muestreo biológico de especies de flora.

8 Conclusiones

La dispersión de gases en la atmósfera, en caso del NO₂ se encuentra por encima del Límite Permisible (RMCA), lo que requiere de la implementación de medidas, con el fin de minimizar la alteración de la calidad del aire.

Las cenizas volantes que se emiten a la atmósfera pueden contener distintas fracciones de material particulado, pese a que el módulo termoeléctrico a biomasa, contará con un sistema de control, cuyos resultados de su dispersión en la atmósfera presentan un distinto comportamiento de acuerdo a la CEA y se encuentran por debajo de los límites permisibles del RMCA y la Norma Boliviana 62011.

Las actividades definidas en el Programa de Monitoreo Ambiental, permitirán determinar modificaciones en las concentraciones del área con respecto a la línea base, evaluar la efectividad de las medidas de mitigación y si fuera el caso realizar los ajustes que correspondan.

Los modelos matemáticos se constituyen en herramientas de predicción y evaluación que proporcionan un sustento técnico a los Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental (EEIAs), que se desarrollan en el marco de la normativa ambiental vigente.

Referencias Bibliográficas

- [1] Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2016). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2014 – 2015. Bolivia.
- [2] Cooper C. David, Alley F.C. (2011). Air Pollution Control a Design Approach. Waveland Press Inc.
- [3] NTP 329. (2007). Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera, España.
- [4] Barrera L. Valter Armando (2005). Caracterización Elemental de PM15 y PM2.5 para la Identificación de Fuentes Contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [5] DICA. (2004). Comparación de modelos de dispersión de emisiones provenientes de fuentes fijas, Chile.
- [6] Macdonald Robert. (2003). Modelling Air Emissions for Compliance. Department of Mechanical Engineering. University of Waterloo. Canada.
- [7] De Nevers Noel. (2000). Air Pollution Control Engineering. Second Edition. Mc Graw – Hill Higher Education.
- [8] Web gráfica. Fuente: <http://www.guiaambiental.com.ar/conocimiento-calidad-de-aire-material-particulado.html>