



Propuesta de líneas de producción de ceniza activada empleada  
como material adsorbente de mercurio en las plantas generadoras  
de carbón

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Propuesta de líneas de producción de ceniza activada empleada  
como material adsorbente de mercurio en las plantas generadoras  
de carbón

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por:

Liza Victoria Alvarado Montúfar

para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química

Guatemala,

2016

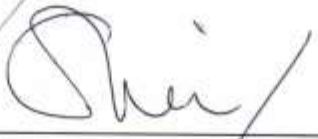


Vo. Bo.

(f)   
Ing. Cristián Rossi

Terna examinadora

(f)   
Ing. Gamaliel Zambrano

(f)   
Ing. Cristián Rossi

(f)   
PhD. Rodolfo Monterroso

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de enero de 2016





# ÍNDICE

Lista de figuras .....	vii
Lista de tablas.....	viii
Resumen.....	x
I. Introducción.....	1
II. Objetivos .....	3
III. Justificación.....	5
IV. Marco Teórico .....	7
V. Antecedentes.....	25
VI. Metodología.....	29
VII. Resultados .....	35
VIII. Análisis de resultados.....	45
IX. Conclusiones.....	51
X. Recomendaciones .....	53
XI. Bibliografía.....	55
XII. Anexos.....	65
XIII. Glosario .....	83
XIV. Siglas.....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de proceso de activación de ceniza volante.....	27
Figura 2. Apariencia física de activador con proveedor Jiangyin Lanyu Chemical Co. ....	65
Figura 3. Apariencia física del activador del proveedor Shaanxi TOP Pharm Chemical Co .....	65
Figura 4. Embalaje para transportar el activador por el proveedor Jiangyin Lanyu Chemical Co. ....	66
Figura 5. Caja de Carr para medir densidad aireada y compacta .....	66
Figura 6. Caja para medir densidad aireada y compacta .....	67
Figura 7. Eliminación de sólido excedente en extensión inferior .....	67
Figura 8. Incorporación de ceniza en extensión inferior .....	67
Figura 9. Mezcla de ceniza y diclorometano con un factor de multiplicación de 30 respecto al punto de saturación de solubilidad del activador en el diclorometano .....	68
Figura 10. Gráfica para obtener ángulo de tolva tipo plana de cuña empleada para diseñar tolva de mezclador.....	69
Figura 11. Gráfica para obtener ángulo de tolva cónica empleada para diseñar tolva de silo de ceniza volante.....	70
Figura 12. Tornillo de flujo másico .....	71
Figura 13. Impulsor tipo hidroala para flujo laminar .....	71
Figura 14. Mezclador tipo listón (hélice y “ribbon”) .....	72
Figura 15. Nomograma No. 1 para determinación de potencia de sistema neumático. ....	73
Figura 16. Nomograma No. 2 para determinación de potencia de sistema neumático. ....	74
Figura 17. Nomograma No. 3 para determinación de potencia de sistema neumático. ....	75
Figura 18. Nomograma No. 4 para determinación de potencia de sistema neumático. ....	76
Figura 19. Nomograma No. 5 para determinación de potencia de sistema neumático. ....	77
Figura 20. Simulación de patrón de flujo másico de alimentador de salida de tornillo F del estudio de (Fernandez <i>et al.</i> , 2009). ....	79
Figura 21. Tasas de flujos másicos de diferentes columnas coloreadas de partículas en una tolva, medidas en la salida de la tolva luego de 30 segundos.....	79
Figura 22. Consumo de potencia total, de corte y normal. ....	80
Figura 23. Propiedades geométricas de los diseños de los seis tornillos. ....	80
Figura 24. Relaciones de costos de algunos materiales comunes para recubrir.....	81

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los carbones .....	11
Tabla 2. Propiedades del diclorometano .....	12
Tabla 3. Información toxicológica del diclorometano .....	12
Tabla 4. Propiedades del activador .....	13
Tabla 5. Fuentes de emisiones de mercurio en EE.UU. en el año 2011 .....	25
Tabla 6. Métodos de control de emisiones de mercurio .....	26
Tabla 7. Resultados de pruebas de ceniza activada en la inyección de la planta piloto con filtro de bolsa .....	28
Tabla 8. Número de plantas generadoras de electricidad con filtro bolsa .....	35
Tabla 9. Cantidad de ceniza, diclorometano y activador a usar para la producción de ceniza activada según rango de potencias de plantas generadoras de electricidad .....	35
Tabla 10. Flujos volumétricos de reactivos y productos .....	35
Tabla 11. Resultados del tanque de almacenaje de diclorometano .....	36
Tabla 12. Resultados del tanque de recuperación de solvente .....	36
Tabla 13. Resultados para el cálculo de la tubería que conecta el tanque de almacenaje de diclorometano y el tanque de mezcla .....	37
Tabla 14. Resultados de tubería del tanque de recuperación de solvente al tanque de agitación .....	37
Tabla 15. Resultados del tanque de agitación .....	38
Tabla 16. Resultados de condensador de diclorometano .....	38
Tabla 17. Resultados del silo para almacenar ceniza volante .....	39
Tabla 18. Resultados de tolva de salida del mezclador .....	39
Tabla 19. Resultados del alimentador de salida de silo de ceniza volante .....	40
Tabla 20. Resultados del mezclador .....	40
Tabla 21. Resultados de la bomba de vacío .....	41
Tabla 22. Resultados de sistemas neumáticos para transportar ceniza activada a ducto de gases de combustión y ceniza volante a la línea de producción .....	41
Tabla 23. Resultados de tubería de tanque de mezcla a mezclador de listón .....	42
Tabla 24. Resultados de la válvula de control de flujo del tanque de agitación al mezclador de listón .....	42
Tabla 25. Resultados de la bomba que transporta diclorometano del tanque de almacenamiento al tanque de agitación. ....	43

Tabla 26. Resultados de la bomba que transporta diclorometano del tanque de recuperación al tanque de agitación .....	43
Tabla 27. Propiedades de cenizas encontradas experimentalmente .....	68
Tabla 28. Propiedades de ceniza encontradas en la literatura .....	69
Tabla 29. Propiedades geométricas de los diseños de los seis tornillos del trabajo de Fernández, 2009. ....	81

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue diseñar la línea de producción de ceniza volátil activada, para adsorber mercurio de los gases de chimenea de un conjunto de plantas generadoras de energía usando como datos y antecedentes el trabajo realizado por el Doctor Rodolfo Monterroso. En el trabajo se usa un recubrimiento de la ceniza volátil con un compuesto orgánico halogenado, haciendo que la ceniza se active, siendo capaz de adsorber el mercurio que es liberado a la atmósfera. Este mercurio proviene de los gases de chimenea generados por la combustión de carbón en las plantas de generación de energía eléctrica con carbón.

Entre los resultados obtenidos se encuentran cinco rangos de plantas generadoras de electricidad con carbón, en base a la potencia de las mismas. El conjunto de las plantas clasificadas cuenta con 139 plantas que emplean filtro de bolsa para remover la ceniza volante de los gases de combustión, que cuentan con potencias entre 33 MW y 1008 MW. La propuesta de línea de producción se basa en el rango con mayor número de plantas, este rango es el de 250 a 500 (incluido) MW, con un total de 41 plantas, las cuales se encuentran ubicadas en EE. UU y son evaluadas con los estándares establecidos por la EPA. En este país se han emitido varias reglas en los últimos años para controlar la liberación de mercurio a la atmósfera haciendo que los métodos de captura de mercurio convencionales se estén sustituyendo por métodos más baratos. El modelo obtenido para el balance de masa de este rango de plantas utilizó como base de cálculo el promedio máximo de mercurio en el carbón encontrado en la literatura (0.17 ppm) (USGS, 2001). Dando como resultado los siguientes valores, ceniza activada a producir 81.58 kg/h, ceniza 77.5 kg/h, activador, 4.08 kg/h, y diclorometano 110.72 kg/h. Entre los equipos necesarios para producir la ceniza activada calculada se encuentran: un tanque de almacenaje de diclorometano, un tanque de mezcla, un mezclador tipo listón o “ribbon”, un condensador para vapores de diclorometano, dos bombas de impulsión magnética de transporte de diclorometano, una bomba de vacío seca, un silo para almacenaje de ceniza, y dos sistemas neumáticos de transporte. La potencia necesaria para manejar esta línea propuesta de producción de ceniza activada es de 36.41 kW

# I. INTRODUCCIÓN

El procedimiento para la producción de ceniza activada consiste en preparar una solución de activador en diclorometano para luego obtener una pasta con esta solución y la ceniza volante; evaporar el diclorometano de la pasta y obtener una ceniza activada capaz de adsorber el mercurio que se emite en los gases de combustión. El alcance de este trabajo es proponer los equipos para la línea de producción, calcular los requerimientos de cada material como de la potencia para manejar la línea. La línea de producción inicia en la conexión del silo de ceniza de la planta de generación de electricidad a la planta de producción de ceniza activada, hasta la alimentación de la ceniza activada en el ducto de los gases de combustión previo al filtro de bolsa.

El método propuesto en este trabajo presenta numerosas ventajas. Su capacidad de adsorber mercurio de los gases de combustión es de 0-6,000  $\mu\text{g Hg/g}$  ceniza activada (dependiendo de la cantidad del activador), comparándola con la del método usual -inyección de carbón activado- la cual es de 1,100-2,500  $\mu\text{g Hg/g}$  carbón activado. La preparación del adsorbente no produce subproductos y puede considerarse como un proceso sin residuos. El solvente usado en la deposición del activador es reciclado. La ceniza activada puede producirse in situ y en pruebas en planta piloto se logró remover más del 90% de mercurio liberado en los gases de combustión (Monterroso & Krutkramelis, s. f.).

Los doctores Rodolfo Monterroso y Kaspars Krutkramelis llevaron a cabo la investigación que da origen a este trabajo, determinando el tipo de proceso a escala laboratorio, los reactivos empleados, y sus beneficios. Este trabajo logra proponer los equipos necesarios para la producción de ceniza activada a nivel industrial. El país donde se desarrolló es EE. UU., por lo tanto las líneas de producción fueron calculadas con los datos de emisión de mercurio de las plantas generadoras de este país de acuerdo a los estándares establecidos por EPA en MATS (Mercury and Air Toxics Standards). El resultado presentado es la propuesta de la línea de producción de ceniza activada para el rango de plantas generadoras de electricidad con mayor número de plantas según un documento del doctor Monterroso en el cual se tiene un total de 139 plantas que emplean filtro de bolsa. El proceso se realiza por medio de lotes, cada lote será producido cada hora. La cantidad de ceniza activada por lote a producir se definió a partir del balance de masa, el cual se calculó por medio de la cantidad de mercurio liberado a la atmósfera y el flujo volumétrico de los gases de combustión que presenta cada planta. El primero de estos datos se calculó a partir del contenido de Hg promedio máximo encontrado en la literatura en la composición del carbón (0.17 ppm) (USGS, 2001) y el segundo se calculó a partir del documento "Métodos válidos para calcular la tasa de flujo de gases de combustión con referencia a EN 12952-15" (Graham, Harnevie, van Beek, & Blank, 2012). A partir de estos datos se conoce cuánto Hg se libera por cada  $\text{m}^3$ , y por medio de datos en prueba piloto, realizada por los doctores Rodolfo Monterroso y Kaspars Krutkramelis, se conoce cuántos kilogramos de ceniza activada agregar por  $\text{m}^3$  ( $0.055 \mu\text{g/m}^3$ ), lo que hace posible el balance de masa.



## II. OBJETIVOS

### A. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una línea de tratamiento in situ de ceniza volante para la adsorción química de mercurio y reducción de emisiones en gases de combustión de carbón en plantas generadoras de energía eléctrica.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Delimitar cinco rangos de capacidad de tratamiento de ceniza activada de acuerdo a la cantidad total emitida de mercurio de un grupo de 139 plantas de generación de electricidad que emplean filtro de bolsa para la recolección de ceniza volante en los Estados Unidos.

2. Determinar el balance de masa para el proceso de los distintos rangos de capacidad de tratamiento para definir los rangos de operación de los equipos.

3. Determinar del balance de energía para la línea de proceso que pueda dar servicio al mayor número de plantas generadoras de electricidad la potencia requerida a suministrar.

4. Diseñar y especificar los equipos y servicios auxiliares para la producción de ceniza activada para la capacidad del rango con mayor número de plantas generadoras de electricidad.



### III. JUSTIFICACIÓN

Las fuentes antropogénicas actuales son responsables de aproximadamente de un 30% de las emisiones mundiales anuales de mercurio. Un 10% de las emisiones proviene de fuentes naturales geológicas, y el resto, de reemisiones liberadas de mercurio, acumulado por décadas en los suelos y océanos. Las emisiones antropogénicas de mercurio han sido mayores que las naturales desde el inicio de la era industrial, alrededor de 200 años atrás (UNEP, 2013).

De acuerdo al documento de soporte técnico del NEI (National Emissions Inventory) de la EPA (Environmental Protection Agency) del año 2011, en EE. UU. las plantas de generación eléctrica con carbón fueron la principal fuente de emisiones de mercurio. Estas generaron en el año 2011, 25.4 t de emisiones de mercurio, cerca del 49% del total emitido por fuentes antropogénicas estadounidenses (NEI, 2014).

La mayor proporción de emisiones de mercurio generadas por el hombre a nivel mundial provienen de Asia, que contribuye aproximadamente con 50% del total global. Las emisiones principales de esta región provienen de Asia oriental y sudoriental, contribuyendo con un 39.7% de las emisiones mundiales de mercurio. China es el país que más emisiones genera en esta región, responsable de las tres cuartas partes y a nivel global genera un tercio de las emisiones de mercurio (UNEP, 2013).

La quema de carbón fue responsable de 474 t promedio de emisiones de mercurio a nivel mundial en el año 2010; más del 85% de estas provinieron de la quema de carbón para la generación de energía y usos industriales. Estas correspondieron al 24% de las emisiones mundiales de mercurio en ese año por actividades humanas (UNEP, 2013).

Debido a que este trabajo tuvo como contexto en EE. UU. se enfocó en estudios y reglamentos realizados en ese país:

Eventualmente, el mercurio emitido a la atmósfera llega a fuentes de agua. Cuando se deposita en estos reservorios, las bacterias anaeróbicas en los sedimentos convierten el mercurio elemental en metilmercurio. Este compuesto ingresa al cuerpo humano a través de la ingesta de peces (EPA, 1997). Los efectos del metilmercurio en la salud humana pueden consistir en trastornos sensoriales, dificultades del habla, daños a la conciencia y discapacidad neurológica (NESCAUM, 2003). El programa NHANES (National Health and Nutrition Examination Survey) reportó que el 2.3% de las mujeres entre 16 y 49 años de edad, entre los años 1999-2010, presentaron concentraciones mayores al 5.8  $\mu\text{g/L}$  en la sangre (nivel de mercurio en la sangre equivalente a la dosis de referencia - exposición máxima diaria aceptable de metilmercurio sin tener efectos dañinos durante toda la vida). Este porcentaje representa a 1.4 millones de mujeres en edad

reproductiva, en las cuales la concentración de mercurio en la sangre aumenta el riesgo que los fetos tengan discapacidades de aprendizaje (NHANES, 2013). Basado en esto y en los nacimientos anuales (Martin *et al.*, 2012) se estima que más de 75,000 recién nacidos tendrán un riesgo de tener discapacidades de aprendizaje asociadas a la exposición de metilmercurio en el útero.

En EE. UU., la EPA ha emitido numerosas reglas para controlar las emisiones de mercurio. (EPA, 2011b) Por ejemplo, Clean Air Mercury Rule (CAMR) emitida en el año 2005 para plantas de energía con carbón (EPA, 2011b), Clean Air Act (CAA) en el año 2010 para las calderas e incineradores (EPA, 2011a), Mercury and Air Toxics Standards (MATS) en el año 2015 para las plantas generadoras de energía (EPA, 2015). Los estándares de emisiones de mercurio son para un carbón < 19305.60 kJ/kg de 1.72 ng/kJ de entrada de calor; y para un carbón > 19305.60 kJ/kg de 0.52 ng/kJ de entrada de calor. La inyección de carbón activado es una de las pocas opciones disponibles para la captura de mercurio (Staudt, Andover Technology Partners, & M.J. Bradley & Associates LLC, 2011). La disposición de la ceniza volante es muy importante porque las plantas que venden la ceniza y escogen usar un sorberte de base de carbón disminuyen sus ventas y afrontan costos mayores de eliminación si no pueden vender sus cenizas por el contenido de mercurio. De acuerdo a EPA, las plantas generadoras venden alrededor del 35% de su ceniza volante para usar en otras aplicaciones, con un 15% yendo a usos, como la manufactura de cemento, donde la contaminación de carbón puede causar problemas. El DOE estima que para una planta que vende sus cenizas, la disminución en ventas y el aumento costos relacionados a la eliminación aumenta la remoción de mercurio está entre US\$68,710.40 y US\$468,892.60 por kg de mercurio removido para una planta que usa inyección de carbón activado con un precipitador electrostático existente. Los costos varían dependiendo del tipo de carbón quemado y de la reducción de mercurio deseada (Government Accountability Office, 2005).

Un sistema de captura de mercurio accesible a nivel económico, in situ, es una necesidad a nivel mundial. No solamente en E.E. U.U. se está trabajando para la reducción del mercurio ya que las nuevas plantas generadoras de energía en China tienen instalados controles de contaminación de alta tecnología (UNEP, 2013).

Considerando todo lo anterior, el objetivo de este trabajo es, por lo tanto, proponer el diseño de procesamiento del material adsorbente de mercurio de bajo costo. Sistemas de control de mercurio emitido más baratos pueden generar beneficios mundiales respecto a la contaminación del ambiente ocasionada las plantas generadoras de energía.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. GASES DE COMBUSTIÓN

Los gases de escape generados en los procesos de combustión se denominan gases de combustión. Su composición depende del tipo de combustible y de las condiciones de combustión (Testo, 2010).

1. Flujo volumétrico de los gases de combustión. El flujo volumétrico de los gases de combustión se calculó en base al documento “Método válidos para calcular la tasa de flujo de gases de combustión con referencia a EN 12952-15” (Graham *et al.*, 2012).

El flujo volumétrico de los gases de chimenea se obtuvo con el flujo volumétrico estequiométrico seco a 273.15K y 101.325 kPa,  $\dot{V}_{God}$  ( $m^3/s$ ), y el contenido de oxígeno estándar requerido,  $\gamma_{Or}$  (fracción de volumen) por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_{Gd} = \frac{0.2094 \dot{V}_{God}}{0.2094 - \gamma_{Or}} \quad (m^3/s)$$

Ecuación 1

(Graham *et al.*, 2012)

El flujo estequiométrico de gas seco (0% de O<sub>2</sub>, 0% de H<sub>2</sub>O) se calculó con el factor de combustible, S ( $m^3/MJ$ ), y la entrada térmica del proceso,  $P_{th}$  (MW) en la cual se debe tomar en cuenta la potencia que se vende  $P_e$  (MW) y la eficiencia térmica,  $\eta$ , variables que se determinaron con las siguientes ecuaciones:

$$\dot{V}_{God} = SP_{th} \quad (m^3/kg)$$

Ecuación 2

(Graham *et al.*, 2012)

$$P_{th} = \frac{P_e}{\eta}$$

Ecuación 3

(Graham *et al.*, 2012)

El factor de combustible se obtuvo con el volumen producido por kilogramo de carbón,  $V_{God}$  ( $m^3/kg$ ) y el poder calorífico neto del combustible como se recibe,  $H_N$  (MJ/kg) :

$$S = \frac{V_{God}}{H_N} \quad (m^3/MJ)$$

Ecuación 4

(Graham *et al.*, 2012)

Donde el volumen producido se obtuvo a partir de la composición del carbón:

$$V_{God} = 8.8930 \gamma_c + 20.9724 \gamma_H + 3.3190 \gamma_S - 2.6424 \gamma_O + 0.7997 \gamma_N \quad (m^3/kg)$$

Ecuación 5

(Graham *et al.*, 2012)

## B. ORIGEN DE EMISIONES DE MERCURIO EN PLANTAS GENERADORAS DE ENERGÍA

El mercurio liberado proviene del carbón, este al quemarse libera mercurio elemental ( $Hg^0$ ), mercurio enlazado ( $HG_p$ ), y mercurio oxidado ( $Hg^{2+}$ ). El primero al ser expuesto a la ceniza activada se oxida. El tipo de mercurio emitido por las plantas generadoras establece el tiempo que permanece en la atmósfera. El mercurio oxidado  $Hg^{2+}$  es soluble en agua y fácilmente ingresa a fuentes de agua, donde se convierte en metilmercurio, que es altamente tóxico. El mercurio elemental puede ser transportado grandes distancias en la atmósfera donde sus efectos tóxicos pueden tener impactos globales; por ejemplo interferir con la reducción del ozono en el ártico. (Wilcox *et al.*, 2011).

1. Cuantificación de mercurio emitido a la atmósfera por las plantas de generación de electricidad. Conociendo la potencia generada,  $P_{th}$  (MW), Ecuación 3, y el poder calorífico del carbón,  $H_N$  (MJ/kg), se determinó cuánto carbón se debe suministrar a cada una de las plantas de generación de electricidad,  $C$  (kg/s):

$$C = \frac{P_{th}}{H_N}$$

Ecuación 6

Conociendo la concentración de mercurio en carbón,  $h$  (ppm = mg/kg), se cuantificó el mercurio que se emite a la atmósfera,  $H$  ( $\mu g/s$ ):

$$H (\mu g/s) = \frac{C * h}{1 * 10^{-3}}$$

Ecuación 7

## C. CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes se definen como “un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de cocombustión<sup>1</sup>, que tiene propiedades puzolánicas<sup>2</sup> y que está compuesto fundamentalmente de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El contenido de SiO<sub>2</sub> es al menos de un 25% en masa (AENOR, 2013).

En el año 2012 las plantas generadoras produjeron alrededor de 110 millones de toneladas cortas de cenizas volantes, que se disponen en vertederos y estanques de cenizas o son utilizados en aplicaciones de ingeniería civil, entre ellas: la producción de hormigón, muros de contención de tierras, estabilización de suelos blandos, la estabilización de residuos, clinker de cemento, y reformación de minas (Obla, 2008).

La presencia de halógenos promueve la oxidación de mercurio en la superficie del carbón. Se ha demostrado que las cenizas volantes contienen naturalmente algunos sitios de carbono no quemado que pueden adsorber el mercurio (Wilcox *et al.*, 2011).

El ángulo de fricción de pared con el acero galvanizado de las cenizas volátiles y el ángulo de fricción interna son de 40° y 30°, respectivamente (Rotter, 2002).

1. Densidad de la ceniza volante. Para medir la densidad aireada y compacta de la ceniza volante se debe emplear el método de la caja de Carr (Stanley-Wood, 2008) requerida en la norma ASTM D 6393-99, ver Figura 5, en la sección de Anexos.

Se calculó el valor de la densidad aireada ( $\rho$ ) y compacta usando la siguiente fórmula (haciendo las variaciones correspondientes al procedimiento para cada una):

$$\rho \left( \frac{g}{mL} \right) = \frac{\text{Masa de sólido (g)}}{\text{Volumen (mL)}}$$

Ecuación 8

La densidad de trabajo se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\rho_{trabajo} \left( \frac{g}{mL} \right) = (\rho_{compacta} - \rho_{aireada}) * \text{compresibilidad} + \rho_{aireada}$$

Ecuación 9

(Carr, 1969)

---

<sup>1</sup> Ver Glosario

<sup>2</sup> Ver Glosario

La compresibilidad se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$\text{Compresibilidad (\%)} = \frac{(\rho_{compacta} - \rho_{aireada})}{\rho_{compacta}} * 100$$

Ecuación 10

(Carr, 1969)

2. **Humedad de ceniza.** Para la determinación de la humedad se puede basar en la regla ASTM-C311 "Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete".

El porcentaje de humedad se calculó con la siguiente ecuación (ASTM, 1994):

$$\text{Contenido de humedad, \%} = \frac{\text{Pérdida de masa durante secado}}{\text{Masa de muestra como se recibió}} * 100$$

Ecuación 11

## D. CARBÓN

El carbón es un combustible fósil, un hidrocarburo (Kotz, Treichel, & Weaver, 2006). El carbón, compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, se origina en transformaciones físicas y químicas de grandes acumulaciones vegetales depositadas en pantanos, lagunares o deltaicos (UPME, 2005).

1. **Tipos de carbón.** Los tipos de carbón, en orden ascendente de poder calorífico, son lignito, sub-bituminoso, bituminoso, y antracita.

Una clasificación del carbón aceptada es la American Society for Testing and Materials (ASTMD-388-777), mostrada en la Tabla 1.

Lignito y turba: Son carbones con alta humedad y alto contenido de ceniza y de material volátil. Poseen un bajo poder calorífico. Empleados para la generación de calefacción, energía eléctrica, para algunos procesos industriales en donde se requiere generar vapor (UPME, 2005).

Hulla sub-bituminosa: Con un poco más de poder calorífico que los carbones tipo lignito y turba, poseen un alto contenido de material volátil (UPME, 2005).

Tabla 1. Clasificación de los carbones

Tipo	Carbono fijo (%)	Material volátil	Contenido de humedad (%)	Poder calorífico	Poder calorífico
Lignito y Turba	25-35	96	>30	4,000-7,800	9.3-18.2
Sub-bituminoso	35-45	50	20-30	7,800-10,500	18.2-24.5
Bituminoso	45-86	32	15-20	10,500-14,000	24.5-32.6
Antracita	86-98	1	<15	>14,000	>32.6

(UPME, 2005)

Hulla bituminosa: Por su forma de uso se conocen como carbones coquizables, usados en proceso de obtención del acero, y carbones térmicos, usados en la producción de vapor para generación de energía (UPME, 2005).

Antracita: o carbón duro, con alto contenido de carbono, bajo contenido de de materia volátil y poder calorífico superior a 32.6 MJ/kg. Usado como combustible en generación de calor o vapor en la industria térmica y siderúrgica, también se usa en la fabricación de goma sintética, colorantes, y purificación de agua para consumo humano (UPME, 2005).

## E. DICLOROMETANO

El diclorometano es un hidrocarburo clorado que existe a temperatura ambiente como un líquido incoloro (NTP, 2011). Tiene polaridad media (Primo, 1995). Es estable a temperaturas y presiones normales, pero puede producir compuestos explosivos cuando hay un ambiente con alto contenido de oxígeno (NTP, 2011). Sus propiedades se listan en la Tabla 2.

1. **Reactividad.** El vapor es más denso que el aire. En contacto con superficies calientes o con llamas se descompone formando humos tóxicos y corrosivos (INSHT, 2005).

El diclorometano reacciona vigorosamente con metales activos como litio, sodio y potasio, y con algunas bases fuertes como terc-butóxido potásico. Es incompatible con oxidantes fuertes, cáusticas fuertes y metales químicamente activos como polvos de aluminio y magnesio. El líquido ataca a plásticos, cauchos y recubrimientos. El diclorometano reacciona con aleaciones de sodio-potasio, tetróxido de nitrógeno y oxígeno líquido. Reacciona también reacciona con titanio.

Tabla 2. Propiedades del diclorometano

Propiedad	Valor
Estado	Sólido
Peso molecular	84.9
Gravedad específica 20°C/4°C	1.3255
Punto de fusión (°C)	-95
Viscosidad dinámica (cP) a 20°C	0.425
Punto de ebullición (°C) a 760 mm Hg	39.75
Solubilidad en agua (g/L) a 25°C	13.0
Presión de vapor (psi) a 25°C	8.41
Temperatura de autoignición (°C)	556
Límites de explosividad, % en volumen en el aire	12-25
Capacidad calorífica (J/mol K)	102.3
Calor latente de vaporización (J/kg)	330* 10 <sup>3</sup>

(TOXNET, 2015), (DOW, s. f.)

En contacto con el agua el diclorometano corroe hierro, algunos aceros inoxidable, cobre, y níquel. Es incompatible con metales alcalinos, aminos, zinc y aleaciones de aluminio, magnesio y zinc. Es susceptible de explotar cuando se mezcla con pentóxido de dinitrógeno o ácido nítrico. Mezclas de diclorometano en aire con vapor de metanol son inflamables (Chemical Book, 2008).

## 2. Información toxicológica

Tabla 3. Información toxicológica del diclorometano

Exposición	Síntomas
Contacto con la piel	Piel seca, enrojecimiento, sensación de quemazón
Contacto con los ojos	Enrojecimiento, dolor, quemaduras profundas.
Inhalación	Vértigo, somnolencia, dolor de cabeza, náuseas, pérdida del conocimiento, debilidad.
Ingestión	Dolor abdominal, con riesgo de neumonitis química, daño hepático y renal.

(INSHT, 2005)

## F. ALMACENAJE DE SÓLIDOS.

Los silos son estructuras diseñadas para almacenar grano y otros materiales a granel, son parte integrante del ciclo de acopio. Los más habituales tienen forma cilíndrica, asemejándose a una torre, construida de madera, hormigón armado o metal (Quimnet, 2015).

Las tolvas tipo cuña presentan menor pendiente que las tolvas cónicas y promueven flujo másico. Esto tiene como consecuencia ahorros debido a una menor altura. Otra ventaja de las tolvas de cuña es que evitan la cohesividad y arcos, para evitar estas características las tolvas cónicas deben tener el doble del ancho de las salidas de una tolva de cuña, necesitando alimentadores más grandes. La relación entre el largo y el ancho de una tolva tipo cuña es de 1/3, y la relación en la cual es económicamente factible diseñar un silo es la altura debe ser a 1 a 4 veces el largo de la sección transversal (Maynard, 2013).

Los alimentadores de salida tipo tornillo son adecuados para tolvas con salidas alargadas (Maynard, 2013). Los tornillos de flujo másico, Figura 12, son los métodos más eficientes para descargar materiales de una tolva (KWS, 2015b). Las válvulas rotatorias son un alimentador común para descargar materiales que no sean altamente cohesivos a un sistema de transporte neumático (Maynard, 2013).

## G. ALMACENAJE DE LÍQUIDOS.

Un tanque debe construirse de acero comercial con una calidad alta de soldadura. El tanque debe fabricarse a partir de acero con un calibre mayor al especificado de acuerdo a su capacidad y su diámetro. El diámetro de un tanque vertical no debe ser menor a un cuarto de su altura y no puede ser mayor a 10.7 m (Underwriters Laboratories, 1968a).

Cuando la capacidad de un tanque que almacena un líquido inflamable o combustible se encuentra entre 2.84- 45.42 m<sup>3</sup> la distancia mínima a considerar, entre este y una vía pública o un edificio importante dentro de la misma propiedad, es de 1.53 m según la tabla 22.4.1.1 (b) del estándar NFPA 30 (NFPA, 2015).

Para almacenar líquidos inflamables con una capacidad menor a 4.17 los tanques verticales deben contar una lámina de espesor nominal de 2.67 mm (Underwriters Laboratories, 1968b).

Información relevante de activador. El activador es un compuesto orgánico halogenado, ver Figura 2 y Figura 3 en la sección de Anexos. Por la naturaleza del activador el halógeno se encuentra en equilibrio, y en este proceso genera una especie muy oxidante, lo que hace indispensable colocar recubrimientos en los equipos de PTFE o PVDF en donde se tendrá contacto con este. La compatibilidad de esta especie y los recubrimientos se encontró en hojas de las resistencias químicas (GRACO, 2013), (Versamatic, 2015), (Quick Cut, s. f.). La relación de precio de estos materiales se observa en la Figura 24 en la sección de Anexos.

Tabla 4. Propiedades del activador

Propiedad	Valor
Estado	Sólido
Punto de fusión (°C)	71-76
Densidad (g/mL)	1.24

(Sigma-Aldrich, 2013)

## H. OPERACIONES UNITARIAS<sup>3</sup>

Entre las operaciones unitarias que se estudiaron en este trabajo se encuentran:

1. **Agitación.** La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una manera específica dentro de algún tipo de contenedor (McCabe, Smith, Harriot, & Piombo, 2007)

Algunos de los propósitos de la agitación incluyen (mccabe *et al.*, 2007):

- i. Suspensión de partículas sólidas.
- ii. Mezclado de líquidos miscibles.
- iii. Dispersión de un gas a través de un líquido en forma de pequeñas burbujas.
- iv. Promoción de la transferencia de calor.
- v. Promoción de la transferencia de masa.

Los principales factores que influyen la selección de equipo de agitación están: los requerimientos del proceso, las propiedades del flujo, costos de equipo, y los materiales de construcción. Idealmente la selección del equipo debe ser el de costos más bajos que cumpla con todos lo requerimientos (Perry & Green, 2008). Los tanques agitados se emplean para esta operación unitaria comúnmente ya que pueden manejar un flujo grande si las viscosidades son pequeñas, 1 cP o menos (Dietsche, 1998). Para el arrastre de sólidos flotantes, un agitador debe estar diseñado para proporcionar una fuerza de arrastre que venza la fuerza de flotabilidad. Hay tres tipos de sólidos flotables que se encuentran en la industria: sólidos menos pesados que el líquido, sólidos difíciles de mojar, y sólidos con una densidad baja (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Dos mecanismos se usan para mezclar sólidos que son más pesados que el líquido; uno consiste en usar un vórtice central controlado en la superficie, y el otro usa recirculación para arrastrar los flotantes cerca de la pared en la superficie del líquido. Un circuito de recirculación puede generarse con un impeler de flujo axial de bombeo hacia arriba y baffles. En este caso, los sólidos con circulación hacia arriba en el circuido se mueven hacia la pared en la superficie del líquido donde son incorporados (Paul *et al.*, 2004). El ancho y largo de las paletas son de  $1/5$  y un  $1/4$  del diámetro del impulsor respectivamente (McCabe *et al.*, 2007).

Definiciones importantes en la operación de agitación:

- Número de flujo: Es una medida de la velocidad volumétrica de flujo de un impeler.
- Número de potencia: Es una medida que se usa para calcular la potencia consumida por el impulsor.

El número de potencia se puede considerar constante a Re elevados para una geometría de impeler específica. Para obtener un flujo laminar sólo los fluidos viscosos pueden agitarse sin baffles, las esquinas actúan como baffles, que eliminan el patrón de flujo regular y promueven flujo vertical (Paul *et al.*, 2004).

---

<sup>3</sup> Ver Glosario

La altura del impeler desde el fondo del tanque para disolver sólidos, deber ser una cuarta parte de la altura del líquido (Paul *et al.*, 2004). Paul recomienda una relación de 1.2 entre la altura del líquido respecto al diámetro del tanque. Una altura reducida puede promover una distribución de flujo axial y se recomienda usar una relación de altura del líquido y diámetro del tanque igual a 1 o menor. El diámetro del impulsor debe ser de 1/3 respecto al diámetro del tanque (McCabe *et al.*, 2007).

La potencia del impulsor en un tanque agitado se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = K_L n^3 D a^5 \mu$$

Ecuación 12

$K_L$ = constante que depende del tipo de impulsor, adimensional

$N$ = velocidad de giro, r/s

$Da$ =diámetro del impulsor, m

$\mu$ =viscosidad, Pa\*s

2. **Mezclado.** La mezcla es una distribución aleatoria, dentro y a través una de otra, de dos o más fases inicialmente separadas. En el presente trabajo se mezclará ceniza con una solución, para formar una pasta. En el mezclado de pastas y polvos, el producto con frecuencia consta de dos o más fases que son fáciles de identificar, cada una de las cuales puede contener partículas individuales de tamaño considerable. Las propiedades de los materiales a mezclar varían enormemente de un proceso a otro. Incluso de un solo material pueden ser ampliamente diferentes en tiempos diferentes durante la operación de mezclado (McCabe *et al.*, 2007).

El mezclador es de listón o “ribbon” porque este tipo de mezclador trabaja bien con materiales cohesivos, que normalmente necesitan mayores tiempos de mezclado en los mezcladores tipo volteo (Maynard, 2008). El mezclado convectivo reduce la segregación y se puede emplear para una mezcla húmeda (Muzzio & Alexander, 2005).

El mezclador de listón con la adición de otra hélice aumenta las regiones de mezclado. Aunque cabe destacar que hay una barrera de transporte vertical dada por las dos hélices, por lo tanto la tasa de mezclado global no se incrementa el doble como se esperaría según Robinson y Cleary en su trabajo Flow and Mixing Performance in Helical Ribbon Mixers. Robinson y Cleary emplearon simulaciones numéricas usando el método SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) para estudiar el flujo de fluido alrededor del impulsor en movimiento. La adición de un tornillo central se descartó ya que este no cambia significativamente el mezclado cerca de la hélice y las estructuras de mezclado que están alrededor del tornillo son muy cercanas, haciendo lento el mezclado del fluido que rodea al tornillo. La adición de este es contraproducente ya que reduce la homogeneidad de la mezcla (Robinson & Cleary, s. f.).

Un mezclador de listón se desempeña mejor al trabajar con una cantidad de material que opere de 30-40% de la capacidad nominal (Charles Ross & Son Company, s. f.).

En un mezclado por lotes se tiene como ventaja que el tiempo de retención es controlado, mientras que en uno continuo no. Otras ventajas que presenta ante el mezclado continuo son menores costos de instalación y operación para capacidades pequeñas y medianas, flexibilidades de producción (Maynard, 2008)

3. Evaporación. El objetivo de la evaporación es separar una solución consistente en un soluto no volátil y un solvente volátil (McCabe *et al.*, 2007).

- a. Calor requerido para evaporar o condensar el diclorometano según sea el caso

$$\dot{Q} = \frac{\text{calor sensible} + \text{calor latente}}{t} = \frac{mC_p\Delta T + \lambda}{t}$$

Ecuación 13

m=masa (kg o mol)

C<sub>p</sub>= capacidad calorífica (J /kg K o J/mol /K)

ΔT=diferencia de temperatura (K)

λ= calor latente de vaporización (J/kg)

t= tiempo en el que se evapora o condensa (s)

Q = tasa de transferencia de calor necesario (W)

- b. Área de intercambiador de calor

$$A = \frac{\dot{Q}}{U T_{lm}}$$

Ecuación 14

U= coeficiente global de transferencia de calor (W/m<sup>2</sup> K)

T<sub>lm</sub>= Temperatura logarítmica

Un coeficiente típico de un evaporador con vapor afuera de los tubos y un flujo de pesado orgánico dentro del tubo a evaporar es de 600 W/m<sup>2</sup> K (Sinnott, 2009).

## c. Temperatura logarítmica

$$T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Ecuación 15

$\Delta T_1$  = Diferencia de temperaturas de fluido 1

$\Delta T_2$  = Diferencia de temperaturas de fluido 2

Muchas veces se emplean bombas de vacío para retirar gases incondensables y así disminuir la presión a la cual hierve un líquido. Una bomba de vacío de funcionamiento seco se emplea cuando no puede usarse un fluido de trabajo, ya que en este tipo de bomba no hay contaminación del gas evacuado siendo posible recuperar el solvente (Aliasso & Graham Corporation, 1999). Por cada 0.028 m<sup>3</sup>/min se puede evacuar de una manera efectiva la raíz cuadrada de toneladas de refrigeración de un sistema (T&P, s. f.).

4. Transporte. Para diseñar la tubería de una planta, compresibles o no, hay que tomar en cuenta estándares, códigos y especificaciones para los requerimientos deseados, como material resistente al fluido a transportar, temperatura, pH, concentración y presión de operación (Perry & Green, 2008).

a. Transporte de líquidos. Una bomba se emplea para transmitir potencia al líquido y poder transportarlo. Los requerimientos básicos a definir son la presión de succión y de descarga, la pérdida de presión a lo largo de la línea de transporte y la tasa de flujo. Las bombas están diseñadas para especificaciones técnicas y se desarrollaron estándares de operación y mantenimiento. Estos estándares especifican diseño, construcción, mantenimiento, terminología, material, pruebas, procedimiento. Entre los estándares se encuentran los elaborados por ASME (American Society Of Mechanical Engineers) y API (American Petroleum Institute). Hay cuatro tipos principales de bombas: bombas de desplazamiento positivo, dinámicas, de levantamiento y electromagnéticas (Perry & Green, 2008).

Para seleccionar una bomba se debe conocer la carga total (o cabeza total) y el flujo volumétrico que se necesita transportar el fluido deseado. El flujo volumétrico lo determina el proceso y la carga lo determina la disposición de la bomba y la tubería. El flujo volumétrico se obtiene a partir del flujo másico y la densidad de las corrientes. La cabeza total se determina por la suma de la cabeza estática y la cabeza dinámica. La cabeza estática es la altura que la bomba deberá transportar el fluido y la cabeza dinámica se calcula a partir de la pérdida por fricción.

Para determinar la cabeza dinámica se tuvo que calcular lo siguiente:

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Ecuación 16

$\rho$  = densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v$ =velocidad (m/s)

$L$ = longitud de la tubería (m)

$\mu$ =viscosidad dinámica  $\text{kg}/(\text{m s})$

Coefficiente de fricción Darcy, para flujos laminares:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Ecuación 17

Re= Número de Reynolds

Pérdidas en la tubería por la fricción:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 18

La carga total es la suma de la cabeza estática y la cabeza dinámica (Ecuación 18). Cuando ya se conoce el flujo volumétrico y la cabeza total necesaria se puede seleccionar la bomba que cumpla con dichos requerimientos, para ello se trabaja con las curvas características proporcionadas por los proveedores de las bombas.

El transporte de líquido se realiza medio de tubería, la cual tiene como objetivo transportar un material a través de un tubo. En las tuberías se pueden contar con válvulas, accesorios y sellos.

Diámetro de tubería:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Ecuación 19

A= área de sección transversal de la tubería

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho V}$$

Ecuación 20

$\dot{m}$ = flujo másico, kg/s

$\rho$ =densidad del fluido, kg/m<sup>3</sup>

V= velocidad del fluido, m/s

Cuando el flujo es por gravedad desde tanques elevados, se favorecen las velocidades bajas, en el intervalo de 0.06 a 0.24 m/s según (McCabe *et al.*, 2007). La velocidad de diclorometano recomendada en tuberías de acero es de 1.5 m/s («Fluid Velocities in Pipes», s. f.) .

Las válvulas empleadas en el proceso de planta se pueden dividir en dos clases, dependiendo de su función primaria: (1) válvulas de cierre, para cerrar el flujo; (2) válvulas de control, manuales o automáticas, usadas para regular flujo. Los principales tipos de válvulas empleadas son: compuerta, pistón, bola, globo, diafragma y mariposa. Para seleccionar una válvula de cierre el flujo debe tener un sello positivo<sup>4</sup> en la posición de cierre y una mínima resistencia a fluir al abrir. La válvula de compuerta y de globo, son frecuentemente usadas para este propósito. Si se requiere el control de flujo, la válvula debe ser capaz de dar un control suave sobre toda la gama de flujo, desde completamente abierta a cerrada. Las válvulas de globo se utilizan normalmente. Las válvulas de mariposa se utilizan con frecuencia para el control de los flujos de gas y vapor. Las válvulas de control automáticas son, básicamente, las válvulas de globo con diseños especiales de equipamiento (Sinnott, Coulson, & Richardson, 2006).

CV de una válvula (válvula de diafragma de la salida del tanque de mezcla):

$$CV = \frac{11.6 Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{G}}}$$

Ecuación 21

Q= flujo volumétrico, m<sup>3</sup>/h

$\Delta P$ =caída de presión, kPa

G= gravedad específica

---

<sup>4</sup> Ver Glosario

Para fluidos corrosivos y el control de flujo hay cuatro posibles válvulas a usar, la válvula de globo, de diafragma, de mariposa y de compuerta (Valfonta, 2015). La válvula de bola tiene como principal función bloquear el flujo, no debe usarse para controlar flujos (Flow Control Norway AS, 2015). La válvula de globo se puede utilizar para controlar flujos pero no puede colocarse en cualquier posición, la orientación deseable es vertical, ya que otra es un desafío (GM Engineering, 2015). La válvula de mariposa presenta la desventaja que mayor número de partes están en contacto con el solvente que la de diafragma, en la cual únicamente el diafragma está en contacto con él (MEL Equipment Encyclopedia, 2015).

La tubería está constituida normalmente por tramos de tubería, incorporando accesorios estandarizados como juntas, codos y "T". Las juntas usualmente son soldadas, pero cuando son de tamaño pequeño pueden ser roscadas. Las juntas tipo brida son usadas cuando se requieren mantenimientos frecuentes (Sinnott *et al.*, 2006).

Entre las variables que se deben tomar en cuenta para el transporte de soluciones a través de tubería se encuentra su densidad, en este trabajo se trabaja con la solución de diclorometano y activador, la densidad de esta solución se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \frac{m}{m} \text{ diclorometano en solución} * \rho \text{ diclorometano} + \% \frac{m}{m} \text{ activador en solución} * \rho \text{ activador}$$

Ecuación 22

$$\rho = \text{densidad kg/m}^3$$

%m/m = porcentaje másico

b. Transporte de sólidos. Para escoger el transportador correcto se tomar en cuenta la capacidad requerida, la longitud de desplazamiento, la elevación, características del sólido, la esperanza de vida, costos comparativos. Existe dos tipos de transportadores de sólidos, el neumático y el mecánico (Perry & Green, 1984).

c. Transporte neumático. Este tipo de transporte es una técnica importante en el manejo de materiales. Consiste en desplazar los materiales por medio de suspenderlos en una corriente de aire, sobre distancias horizontales y verticales. Generalmente los transportadores neumáticos se clasifican en cito tipos: de presión, de vacío y sistemas de combinación presión-vacío, de fluidización y de tanque ventilador. (Perry & Green, 1984).

A partir de los nomogramas de (Perry & Don, 1997) se puede determinar la potencia de los sistemas neumáticos. Los nomogramas se encuentran en la sección de Anexos. La velocidad del aire necesaria se obtuvo a partir de la Tabla 21-13 de (Perry & Don, 1997), en la que se relaciona la densidad de bulto con la velocidad de aire necesaria.

Generalmente los sopladores de tiro inducido son más grandes y más caros que los de tiro forzado usados para la misma aplicación.

d. Transporte mecánico. Entre los transportadores mecánicos se encuentran: el de tornillo helicoidal (llamados también sinfín o de gusano), de banda, elevadores de cangilones, vibratorios (llamados también oscilantes) y los de flujo continuo (Perry & Green, 1984).

Las siguientes ecuaciones se emplearon para la determinación de la potencia de un alimentador tipo tornillo:

i. Velocidad del alimentador

$$CS = \frac{CFH}{CFH \text{ a } 1 \text{ RPM}} * \text{Factor de conversión a SI}$$

Ecuación 23

(KWS, 2015a)

CS= velocidad de alimentador (Hz)

CFH= Capacidad en ft<sup>3</sup>/h

Factor de conversión a SI= 1/60

ii. Potencia requerida para mover el alimentador vacío

$$W \text{ requeridos para mover el alimentador vacío} = \frac{DF * HBF * L * S}{1,000,000} * \text{Factor de conversión a SI}$$

Ecuación 24

(KWS, 2015a)

DF= Factor de diámetro (adimensional)

HBF= Factor de rodamiento (adimensional)

Factor de conversión a SI = 745.7

S= velocidad de transportador (RPM)

L= longitud del alimentador (ft)

Los valores de las constantes se encuentra en KWS, 2015a

iii. Potencia requerida para mover el alimentador con material

$$W \text{ requeridos para mover el alimentador con material} = \frac{CFH * W * MF * L}{1,000,000} * 745.7$$

Ecuación 25

(KWS, 2015a)

CFH= Capacidad (ft<sup>3</sup>/h)

Factor de conversión a SI = 745.7

W= peso por pie cúbico (lb)

MF= Factor de material H.P. (adimensional)

L= longitud del transportador (ft)

Los valores de las constantes se encuentra en KWS, 2015a

iv. Potencia total

$$Potencia \text{ total } (W) = \frac{Potencia \text{ de tornillo vacío} + potencia \text{ con material}}{Eficiencia}$$

Ecuación 26

(KWS, 2015a)

5. **Condensación.** El coeficiente global de transferencia de calor de diseño de un condensador de coraza y tubos con vapores orgánicos como el fluido caliente y el fluido frío agua, se encuentra entre 700 W/m<sup>2</sup> K y 1000 W/m<sup>2</sup> K (Sinnot, 2009). Los condensadores que emplean agua como fluido frío son más pequeños que los condensadores que emplean aire como fluido frío por sus características de transferencia de calor (Encyclopedia of chemical engineering equipment, 2014).

## I. CONSIDERACIONES DE OPERACIÓN

1. **Desgaste.** Los parámetros que afectan el desgaste se pueden dividir en tres categorías: (1) el mineral, incluyendo dureza, presencia de minerales corrosivos, y tamaño de partícula; (2) el molino, incluida la composición, microestructura y propiedades mecánicas del material de construcción, tamaño de molino, y la velocidad del molino; y (3) el medio ambiente, incluyendo la química del agua y el ph, el potencial de oxígeno, contenido de sólidos en suspensión, y la temperatura (Perry & Green, 2008).

2. **Seguridad.** Hay que tomar en cuenta el riesgo de explosión debido al tipo de material, tamaño y concentración (Perry & Green, 2008).

3. **Estabilidad térmica.** Maneras de hacer frente a los materiales sensibles al calor incluyen la elección de un molino con menos intensidad, o la ejecución de un molino en la entrada de abajo energética óptima. Algunos molinos funcionan naturalmente más fresco que otros (Perry & Green, 2008).

4. **Higroscopicidad.** Algunos materiales, tales como sal, son muy higroscópicos; que recogen el agua del aire y se depositan sobre las superficies del molino, formando una torta dura (Perry & Green, 2008).

5. **Sellos de bombas y sellos de ejes.** Un sello debe hacerse donde un eje de rotación pasa a través de la carcasa de una bomba, o la pared de un vaso. Ejerce varias funciones: (1) mantener el líquido contenido, (2) prevenir el ingreso de fluidos incompatibles (como aire), y (3) prevenir el escape de materiales tóxicos o inflamables. Los dos tipos de sellos existentes son: prensaestopas y sellos mecánicos. El sello más simple y antiguo es el prensaestopa. Sus aplicaciones son: sellar el eje de grifos de agua en las casas, proveer el sello en bombas industriales, en ejes de válvulas y agitadores. En los procesos industriales las condiciones en el sello de la bomba suelen ser duras y se necesitan sellos más complejos. Se utilizan sellos de cara mecánicos. Ellos se refieren generalmente simplemente como sellos mecánicos, y sólo se utilizan en los ejes de rotación (Sinnott *et al.*, 2006)



## V. ANTECEDENTES

### A. EMISIONES DE MERCURIO EN EE.UU.

Se ha estimado un total de emisiones de hg por parte del NEI de 52 ton (toneladas cortas) con 50.5 toneladas de fuentes fijas y 1.2 toneladas de fuentes móviles en el año 2011. De las emisiones de fuentes estacionarias, el inventario muestra que 25.5 toneladas provienen de carbón, coque de petróleo o de gasoil de las unidades de generación de electricidad con unidades que generan más de 25 megavatios (MW), con unidades de carbón que componen la gran mayoría (25,4 toneladas) de ese total. Las otras fuentes de emisiones de hg se resumen en la Tabla 5 (NEI, 2014).

Tabla 5. Fuentes de emisiones de mercurio en EE.UU. en el año 2011

Categoría de la fuente	ton
Utilitarios de calderas de carbón (Unidades de	25.4 (Código de regulación NESHAP: MATS)
Desechos hospitalarios	0.1
Desechos municipales, cámaras de combustión	1
Calderas de industrias	3.8
Plantas de celdas de mercurio cloro alcalino	0.5
Hornos de arco eléctrico	5.3
Incineración de desechos sólidos industriales	0.01
Incineración de desechos peligrosos	0.8
Cemento Port-land material no peligroso	2.9
Minería de oro	0.8
Incineración de lodos cloacales	0.3
Fuentes móviles	1.2
Otras categorías	9.5

(NEI, 2014)

## B. MÉTODOS PARA CONTROLAR LAS EMISIONES DE MERCURIO

Entre los métodos para controlar las emisiones de mercurio se encuentran:

Tabla 6. Métodos de control de emisiones de mercurio

Método de control	Descripción
Inyección de carbón activado (ACI en sus siglas en inglés)	El carbón activado adsorbe el Hg, convirtiéndolo a mercurio particular, aguas abajo en el dispositivo de control de material particular. Reactivo: Polvo de carbón activado. Costos de capital: Bajos. Co-beneficios: Algunas capturas de dioxinas/furanos.
Adición de halógeno	Adición de halógeno a la corriente de gases de combustión. Consiste en la oxidación del Hg, facilitando su captura en un scrubber o en dispositivos de control de material particular. Reactivo: aditivo que contiene halógeno. Costos de capital: Insignificante. Co-beneficios: Ninguno
Métodos Co-beneficio de control	Descripción
Precipitador electrostático, filtro de tela (baghouse)	Captura de partículas unidas al Hg.
Inyección de sorbente seco	Incrementa co-beneficios y la captura de Hg con inyección de carbón activado por medio de la remoción del SO <sub>3</sub> , el cual suprime la captura del Hg.
Scrubber seco con filtro de tela	Captura de Hg en filtro de tela
Scrubber húmedo	Mercurio oxidado es capturado en el scrubber húmedo
Catálisis NOx	Un catalizador aumenta la oxidación de Hg en una reducción catalítica selectiva (SCR, en sus siglas en inglés), luego este se captura eficazmente en el scrubber

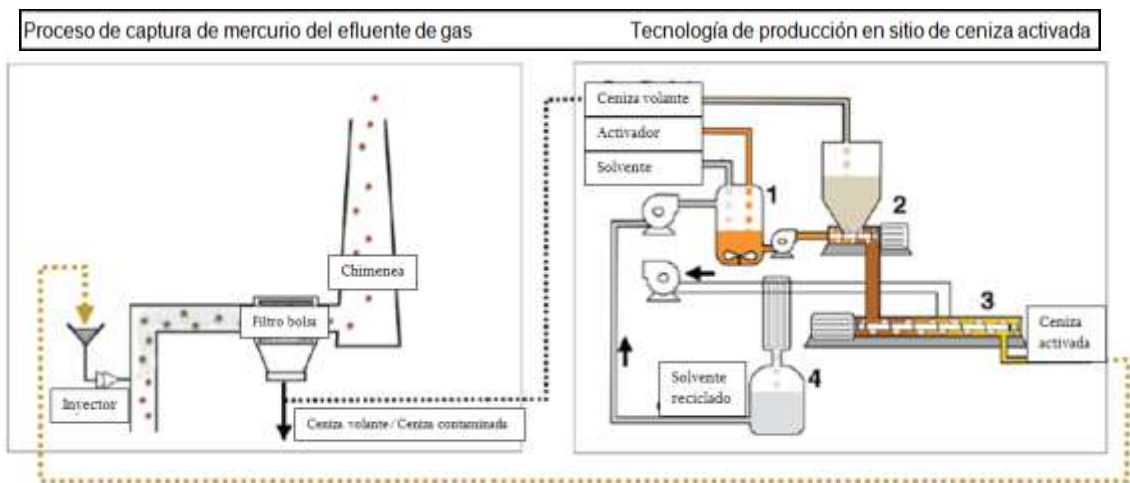
(Staudt *et al.*, 2011)

## C. PROCESO A LLEVAR A CABO

El proceso de tratamiento de ceniza creado por la empresa Pollute Control Technologies se describe en la Figura 2. La parte 1 es el sistema de alimentación de solución activadora. La parte 2 es el sistema de mezcla de ceniza volátil con la solución activadora. La parte 3 es el sistema de secado de solvente. La parte 4 es el sistema de recuperación de solvente (Monterroso & Krutkramelis, s. f.).

Los reactivos que se emplean son el diclorometano (como solvente); el activador, que es un compuesto orgánico halogenado, el cual no puede detallarse por acuerdos de confidencialidad y la ceniza volátil generada por la planta generadora de energía eléctrica (Monterroso & Krutkramelis, s. f.).

Figura 1. Equipo de proceso de activación de ceniza volante



## D. DATOS IMPORTANTES

La solubilidad del activador en el diclorometano es de 1.47 g/ml (Monterroso & Krutkramelis, s. f.).

La cantidad de diclorometano no está especificada para realizar la producción de ceniza activada, es una variable que se determinó experimentalmente con pruebas de mezclado con ceniza volátil y diclorometano; como se puede ver en la sección de: Cantidad de solvente requerido.

A partir de los datos de la Tabla 7 se conoce cuantos  $\mu\text{g}$  de ceniza activada por  $\text{m}^3$  de gases de combustión se necesita para cumplir con la norma establecida de la EPA, para carbón  $> 19305.60 \text{ kJ/kg}$  de  $0.52 \text{ ng/kJ}$  ( $8,300 \text{ Btu/lb}$  de  $1.2 \text{ lb/Btu}$ ).

La capacidad calorífica del carbón de la ceniza volátil empleada es de  $24850.73 \text{ kJ/kg}$  ( $10,684 \text{ Btu/lb}$ ). La ceniza volátil con la que se trabajó fue ceniza de una planta generadora guatemalteca, se reserva el nombre por motivos de confidencialidad.

Tabla 7. Resultados de pruebas de ceniza activada en la inyección de la planta piloto con filtro de bolsa

Concentración de activador (masa/masa)	Flujo de inyección ( $\mu\text{g}$ ceniza activada/ $\text{m}^3$ de gases de combustión)	Captura de Hg
1%	0.157	91%
1%	0.076	79%
0.50%	0.122	58%
5%	0.055	97%
5%	0.026	82%

(Monterroso &amp; Krutkramelis, s. f.)

### E. CANTIDAD DE CENIZA ACTIVADA A PRODUCIR.

Conociendo el flujo de mercurio que se libera en los gases de chimenea, se puede determinar la cantidad de ceniza que se necesita para disminuir el flujo de mercurio al límite permitido ( $1.2 \text{ lb Hg} / \text{TBtu}$ ) por la regla MATS -Mercury and Air Toxics Standards, de la EPA -Environmental Protection Agency (EPA, 2012). Trabajando con una concentración de mercurio en carbón de 0.17 ppm; uno de los valores mayores de mercurio encontrado en el carbón de Estados Unidos (USGS, 2001); se determina por medio de los estudios realizados por Monterroso & Krutkramelis que con las condiciones de captura del 97%, Tabla 7, se logra llegar al límite permitido de emisión de mercurio; concentración de activador de 5%, y un flujo volumétrico de  $5.52 * 10^{-5} \text{ kg} / \text{m}^3$  ( $3.4 \text{ lb} / \text{Mmacf}$ ); por lo tanto las cantidades de ceniza activada que hay que suministrar se encuentra según la siguiente relación:

$$\text{Ceniza activada producida} = \dot{V}_{Gd} * 5.52 * 10^{-5} \text{ kg} / \text{m}^3 \quad (\text{kg} / \text{s})$$

Ecuación 27

### F. CANTIDAD DE ACTIVADOR REQUERIDO.

Según condiciones de captura por estudios realizados por Monterroso & Krutkramelis, la concentración de activador es de 5%, ver Tabla 7, por lo tanto el flujo de activador es:

$$\text{Activador} = \text{Ceniza activada producida} * 5\% \quad (\text{kg} / \text{s})$$

Ecuación 28

## VI. METODOLOGÍA

### A. BASES DE DISEÑO

- i. Los lotes se producen en base a una hora de trabajo.
- ii. Se determinó los rangos de las plantas a partir del documento del doctor Monterroso, el cual cuenta con un total de 139 plantas que emplean filtro de bolsa.
- iii. Concentración de mercurio en carbón: 0.17 ppm (USGS, 2001); flujo promedio máximo encontrado en literatura.
- iv. La línea de producción con la que se trabajó fue la de 250-500 MW.
- v. La concentración del activador en la ceniza volante fue de 5%, con un flujo volumétrico de ceniza activada de  $0.055 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de gas de combustión.
- vi. Por el estudio de Monterroso y Krutkramelis, se conoce que hay que agregar  $0.055 \mu\text{g}$  ceniza activada/ $\text{m}^3$  gas de combustión.

### B. DENSIDAD DE CENIZA VOLÁTIL AIREADA Y COMPACTA

- i. Se obtuvo una cantidad aproximada de 1 kg de ceniza volante de las bolsas plásticas que la contenían por medio de un beaker de 1000 mL. La ceniza se encontraba seca (a simple vista), y fue originada por un carbón bituminoso quemado en una planta de generación de electricidad guatemalteca, del cual se reserva el nombre por motivos de confidencialidad.
- ii. Con un beaker de 100 mL se fue agregando a la extensión superior de la caja.
- iii. El material se cribó en la extensión superior de la caja similar a la empleada en el método de Carr, ver la sección Densidad de la ceniza volante en Marco Teórico, después se removió y se niveló el sólido en la extensión inferior, Figura 7, que fue previamente tarada en una balanza OHAUS, datos especificados en Datos de placa en la sección de Anexos.
- iv. Para medir la densidad compactada se determinó de igual forma, pero ahora sin retirar el sólido, colocando la extensión superior de la caja sobre la parte de abajo nuevamente y se hizo vibrar por 5 minutos empacando el sólido en la caja inferior, agregando sólido si el nivel de este se encontraba por debajo de su capacidad, finalmente se pesó.
- v. El volumen de la extensión inferior de la caja se determina agregando agua, midiendo el volumen que ocupa por medio de una probeta.
- vi. Se realizaron tres corridas para la determinación de cada una de las densidades.

### C. DENSIDAD DE TRABAJO DE CENIZA VOLÁTIL

Se calculó con la Ecuación 9, sustituyendo los valores obtenidos de la densidad aireada y la densidad compacta.

### D. HUMEDAD DE CENIZA

- i. Se llevó a peso constante los tres crisoles empleados, con sus respectivas tapaderas.
- ii. Se pesó 10 gramos de ceniza en cada uno de los crisoles.
- iii. Se colocaron las muestras en la mufla a 400°C por dos horas.
- iv. Se colocó en horno por 10 min, se ingresó a la desecadora por 10 min, y se pesó. Se realizó el mismo procedimiento dos veces más, pero con un tiempo menor en mufla, 0.5 hora.

### E. DENSIDAD DE SOLUCIÓN DE DICLOROMETANO Y ACTIVADOR EN TANQUE DE MEZCLA

Se calculó con la Ecuación 22, ver en la sección de Marco Teórico: Transporte DE líquidos.

### F. FLUJO VOLUMÉTRICO DE LOS GASES DE CHIMENEA

- i. A partir de la composición del carbón se sustituyen los valores en la Ecuación 5 para determinar el volumen producido por kg de carbón quemado.
- ii. El valor del volumen producido por kg de carbón quemado y el valor del poder calorífico del carbón se sustituyen en la Ecuación 4 para determinar el factor de combustible.
- iii. La potencia de cada una de las plantas y la eficiencia térmicas se sustituyeron en la Ecuación 3 para obtener la entrada térmica del proceso.
- iv. El factor de combustible y la entrada térmica de proceso se sustituyen en la Ecuación 2 para obtener el valor de flujo estequiométrico de gas seco.
- v. El flujo estequiométrico seco como el contenido de oxígeno estándar requerido se sustituyeron en la Ecuación 1 para obtener el valor del flujo volumétrico actual.

### G. CANTIDAD DE CENIZA A PRODUCIR

Sustituyendo el valor del flujo volumétrico de cada una de las plantas de generación de electricidad en la Ecuación 27 se obtuvo el flujo de ceniza activada a producir.

## H. CANTIDAD DE MERCURIO LIBERADO A LA ATMÓSFERA POR LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN

- i. Conociendo la potencia generada por cada una de las plantas de generación de electricidad, Ecuación 3, y el poder calorífico del carbón, se sustituyeron valores en la Ecuación 6 para calcular la cantidad de carbón que se debe suministrar.
- ii. De acuerdo a la cantidad de carbón a suministrar y la concentración de mercurio en este se sustituyeron valores en la Ecuación 7, para conocer el flujo de mercurio emitido.

## I. CANTIDAD DE ACTIVADOR REQUERIDO

Se sustituyó el flujo de ceniza activada necesario en cada uno de los casos en la Ecuación 28 para conocer el flujo requerido del activador.

## J. CANTIDAD DE SOLVENTE REQUERIDO

- i. Se determinó la cantidad necesaria de diclorometano para disolver la cantidad calculada de activador (5% de la ceniza activada a producir para cada una de las plantas generadoras) y se mezcló dicha cantidad con la cantidad de ceniza volátil correspondiente calculada.
- ii. Dicha cantidad de disolvente se fue multiplicando a prueba y error hasta que se obtuvo una mezcla con apariencia de pasta en la cual toda la ceniza estuviera cubierta por el diclorometano, ver Figura 9, en la sección de Anexos.

## K. DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES DE TOLVA Y SILO DE CENIZA

- i. A partir del ángulo de fricción interna de la ceniza y el ángulo de fricción de pared con el acero galvanizado se determinó el ángulo de la tolva, ver Figura 10, en la sección de Anexos.
- ii. Se relacionó en Excel el largo de la tova y el ancho, con una relación de 1/3, relación recomendada por (Maynard, 2013), como celdas que en relación al base desde vertical de la tolva la diagonal de la tolva, volumen ocupado por la tolva.
- iii. Se determinó cuánto volumen faltaba, volumen que iba a ser complementado con la parte rectangular del silo, a partir del volumen restante se obtuvo la altura de esta parte.
- iv. Se sumaron los dos volúmenes en una celda.
- v. Se relacionó una celda en Excel para que obtener la relación directa entre la altura del silo y el largo de la tolva, la cual debe de estar entre 1 a 4 para que fuera vialmente económico.
- vi. Se utilizó la función Buscar Objetivo para que el volumen total coincidiera, cambiando la celda del largo de la tolva.

## L. DIÁMETRO DE TUBERÍA DEL TANQUE DE ALMACENAJE DE DICLOROETANO AL TANQUE DE AGITACIÓN, DEL TANQUE DE AGITACIÓN AL TANQUE DE RECUPERACIÓN, Y DEL TANQUE DE RECUPERACIÓN AL TANQUE DE AGITACIÓN

- i. La densidad de la solución se obtuvo a partir de Ecuación 19.
- ii. Se empleó la Ecuación 20 para obtener el área transversal de la tubería de acero, sustituyendo el flujo másico, del balance de masa, y la densidad de la solución.
- iii. El diámetro se calculó con la Ecuación 19.

## M. POTENCIA DEL IMPULSOR EN EL TANQUE AGITADO

- i. Sustituir valores en la Ecuación 12, donde  $K_L$  se toma como 36.5, valor de la constante para un impulsor de paleta plana con dos palas. La velocidad de giro será 0.5 r/s. La viscosidad se sustituye por la del diclorometano, ver Marco Teórico.

## N. CV DE VÁLVULA DEL TANQUE AGITADO AL MEZCLADOR.

Para calcular el cv de la válvula se empleó la Ecuación 21, ver sección de Marco Teórico.

## O. CARACTERÍSTICAS DE ALIMENTADOR DE SALIDA DE TORNILLO

- i. Se clasificó el material a transportar, la ceniza, por medio de una tabla de material (KWS, 2015c), ver datos en la sección de Anexos.
- ii. A partir de una tabla provista por KWS, 2015a se determinó el diámetro del tornillo adecuado a partir de la capacidad a máxima velocidad en RPM, y la carga al 95%.
- iii. Se determinó la velocidad del alimentador con la Ecuación 23.
- iv. Se calculó la potencia para mover el alimentador vacío con la Ecuación 24.
- v. Se calculó la potencia para mover el alimentador con material con la Ecuación 25 .
- vi. Se sustituyeron las potencias encontradas y la eficiencia en Ecuación 26 para determinar la potencia total necesaria a suministrar al tornillo sin fin.

## P. ÁREA DE CONDENSADOR DE DICLOROMETANO

- i. Se sustituyeron valores en la Ecuación 13 para determinar el calor a retirar para condensar el diclorometano.
- ii. Se sustituyeron las temperaturas en la para calcular la temperatura logarítmica.
- iii. Se calculó el área requerida del condensador con la Ecuación 14.

## Q. POTENCIA DE SISTEMA NEUMÁTICO DE TIRO FORZADO

- i. Se estimó una longitud del sistema, siendo esta de 30 m.
- ii. La velocidad del aire necesaria se obtuvo mediante la tabla 21-13 del Manual del Ingeniero Químico, en la cual se relaciona la densidad del material y la velocidad del aire.
- iii. A partir de estos dos datos se determinó la potencia del sistema mediante los nomogramas de Perry & Don, 1997; los cuales se muestran en la sección Anexos.
- iv. . A partir del nomograma 1 se determinó una velocidad de aire, teniendo la velocidad de aire recomendada y suponiendo un diámetro del tubo.
- v. En el nomograma 2 se localizó la velocidad de aire encontrada y la capacidad del sistema para determinar la relación de sólidos.
- vi. En el nomograma 3 se trazó una línea entre los puntos del diámetro y el flujo de aire encontrado en nomograma 1, la cual da como resultado el factor de diseño.
- vii. Se supuso una longitud del sistema de 30 m
- viii. Se localizó el factor de diseño en el nomograma 4 y la longitud equivalente del sistema.
- ix. En el nomograma 5 se localizó la pérdida de presión y el flujo de aire para realizar una línea entre estos puntos. La intersección de esta línea con la línea central dió la potencia a suministrar.

## R. DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE BOMBA DEL TANQUE DE ALMACENAJE AL TANQUE DE AGITACIÓN Y DE BOMBA DEL TANQUE DE RECUPERACIÓN AL TANQUE DE AGITACIÓN

- i. Se determinó el número de Reynolds a partir de la Ecuación 16.
- ii. Se calculó el coeficiente de Darcy con la Ecuación 17.
- iii. La carga dinámica se calculó con la Ecuación 18.
- iv. El flujo volumétrico se determinó a partir del balance de masa.
- v. La carga estática se obtuvo a partir de la suposición de la distribución de la planta.
- vi. Se sumaron las cargas, estática y dinámica.
- vii. A partir del flujo volumétrico y la carga total se seleccionó las bombas con las curvas proporcionadas por el proveedor que cumplieran con los requerimientos.



## VII. RESULTADOS

### A. CANTIDAD DE PLANTAS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON FILTRO DE BOLSA (BAGHOUSE) SEGÚN POTENCIAS

Tabla 8. Número de plantas generadoras de electricidad con filtro bolsa

MW	[33,150]	[150,250]	[250,500]*	[500,750]	[750,1010]
Cantidad de plantas	27	24	41	33	14

\*Este rango de potencias de las plantas generadoras de electricidad se empleará como base para el diseño de la línea de producción debido a que en este se encuentra la mayoría de plantas.

### B. BALANCE DE MASA

Tabla 9. Cantidad de ceniza, diclorometano y activador a usar para la producción de ceniza activada según rango de potencias de plantas generadoras de electricidad

Ítem	MW de plantas de generación eléctrica				
	[33,150]	[150,250]	[250,500]	[500,750]	[750,1010]
Ceniza activada a producir (kg/h)	24.50	39.53	81.58	120.54	164.64
Ceniza (kg/h)	23.27	37.55	77.50	114.51	156.41
Activador (kg/h)	1.23	1.98	4.08	6.03	8.24
Diclorometano (kg/h)	33.25	53.64	110.72	163.59	223.44

\*Para conocer cómo se obtuvo estos datos, ver sección de Metodología.

### C. FLUJOS VOLUMÉTRICOS DE REACTIVOS Y PRODUCTO

Tabla 10. Flujos volumétricos de reactivos y productos

Ítem	MW de plantas de generación eléctrica				
	[33,150]	[150,250]	[250,500]	[500,750]	[750,1010]
Volumen de ceniza activada con mezclar	33.76	54.47	112.43	166.12	195.15
Volumen de ceniza activada sin mezclar	38.62	62.30	128.59	188.13	259.50
Ceniza (L/h)	12.63	20.37	42.05	60.27	84.86
Activador (L/h)	0.99	1.59	3.29	4.86	6.64
Diclorometano (L/h)	25.00	40.33	83.25	123.00	168.00

Balance de energía. A partir de la potencia consumida por cada uno de los equipos, la potencia para manejar la línea de producción de ceniza activada es de 36.45 kW, lo que da como resultado un consumo energético de 131,220 kJ por hora.

## D. TANQUE DE ALMACENAJE DE DICLOROMETANO

Tabla 11. Resultados del tanque de almacenaje de diclorometano

Ítem	Datos calculados	
	Valor	
Volumen de líquido mínimo necesario (m <sup>3</sup> )	0.60	
Volumen de líquido con 20% extra al	0.72	
Volumen del tanque con espacio de cabeza	0.86	
Diámetro del tanque (m)	0.88	
Altura del tanque (m)	1.41	
Características indispensables		
Tipo de tanque	Cerrado, cilíndrico, sobre el suelo, vertical y soldado	
Material	Acero carbón	
Norma de construcción	NFPA 30	
Pintura	Reflectiva	
Protecciones	Aterrizado, con válvula de alivio, alarma de nivel, tanque	

## E. TANQUE DE RECUPERACIÓN DE SOLVENTE

Tabla 12. Resultados del tanque de recuperación de solvente

Ítem	Datos calculados	
	Valor	
Volumen de líquido mínimo necesario (m <sup>3</sup> )	2.00	
Volumen del tanque con espacio de cabeza	2.30	
Diámetro (m)	1.22	
Altura (m)	1.96	
Características indispensables o características del equipo que se escogió		
Tipo de tanque	Cerrado de sección transversal cuadrada, sobre el suelo, vertical, y soldado	
Material	Acero inoxidable 304	
Pintura	Reflectiva	
Protecciones	Aterrizado, válvula de alivio, alarma de nivel, tanque colector	

## F. TUBERÍA DEL TANQUE DE ALMACENAJE DE DICLOROMETANO A TANQUE AGITADO

Tabla 13. Resultados para el cálculo de la tubería que conecta el tanque de almacenaje de diclorometano y el tanque de mezcla

Datos calculados	
Ítem	Valor
Diámetro necesario interno para llenarlo por primera vez (mm)	14.78
Masa de diclorometano a transportar (kg) – para llenarlo por primera vez	2762
Tiempo de descarga (min)	135
Diámetro necesario interno para realizar ajuste (mm)	14.77
Masa de diclorometano a transportar (kg) – para realizar ajuste	132.86
Tiempo de descarga (min)	1.3
Características de la tubería	
Tamaño nominal	DN 10 –NPS 3/8
Material	Acero inoxidable 304
Cédula	40S
Diámetro externo (mm)	17.1
Espesor de la pared (mm)	2.31
Pintura	Reflectiva
Protecciones	Aterrizado

## G. TUBERÍA DESDE TANQUE DE RECUPERACIÓN AL TANQUE DE AGITACIÓN

Tabla 14. Resultados de tubería del tanque de recuperación de solvente al tanque de agitación

Datos calculados	
Ítem	Valor
Diámetro necesario interno (mm)	38.54
Masa de diclorometano a transportar (kg)	2630.71
Tiempo de descarga (min)	18.9
Características de la tubería	
Tamaño nominal	DN 32 –NPS 1 ¼
Material	Acero inoxidable 304
Diámetro externo (mm)	42.2
Cédula	40S
Espesor de la pared mm	3.56
Pintura	Reflectiva
Protecciones	Aterrizado

## H. TANQUE AGITADO PARA DISOLVER ACTIVADOR

Tabla 15. Resultados del tanque de agitación

Datos calculados		
Ítem		Valor
Volumen de líquido mínimo necesario (m <sup>3</sup> )		2.08
Volumen del tanque con espacio de cabeza (m <sup>3</sup> )		2.39
Ancho y largo (m)		1.20
Altura (m)		1.66
Diámetro del impulsor (m)		0.40
Distancia del impulsor desde el fondo del tanque (m)		0.36
Ancho de pala (m)		0.08
Largo de pala (m)		0.10
Espesor de pared (m)		0.10
Potencia del impulsor (W)		6.21 * 10 <sup>-4</sup>
Características indispensables		
Tipo de tanque	Cerrado de sección transversal cuadrada, sobre el	
Material	Acero con recubrimiento de PVDF	
Pintura	Reflectiva	
Impulsor	Axial tipo hidroala	
Protecciones	Aterrizado, con válvula de alivio, alarma de nivel,	
Características del impulsor seleccionado		
Marca del impulsor	White Mountain Process	
Tipo	Pala de hidroala, ver	
Recubrimiento	PVDF	

(White Mountain Process, 2016)

## I. CONDENSADOR

Tabla 16. Resultados de condensador de diclorometano

Datos calculados		
Ítem		Valor
Transferencia de calor (W)		31559.37
Características del condensador seleccionado		
Marca	Bell & Gosset	
Modelo	SU -104-2	
Área superficial	5.21 m <sup>2</sup> , 56 ft <sup>2</sup>	
# de pasos	2	

(GENEMCO, s. f.), (Bell & Gossett, 2015)

## J. SILO DE CENIZA VOLÁTIL

Tabla 17. Resultados del silo para almacenar ceniza volante

Ítem	Datos calculados	
	Valor	
Capacidad en tiempo (día)	1	
Masa de ceniza a almacenar (kg)	1860	
Volumen (m <sup>3</sup> ) con 20% extra	1.05	
Volumen en parte cilíndrica (m <sup>3</sup> )	0.92	
Volumen en tolva (m <sup>3</sup> )	0.14	
Altura de parte cilíndrica (m)	1.82	
Altura de tolva (m)	1.36	
Diámetro de parte cilíndrica (m)	0.8	
Diámetro de salida de tolva (m)	0.32	
Altura de la tolva (m)	1.36	
Diagonal de tolva (m)	1.38	
Ángulo de tolva desde vertical, ver <i>Figura 11</i>	10°	
Características		
Tipo de silo	Cilíndrico	
Tipo de flujo de ceniza alimentado al mezclador	Másico <sup>5</sup>	
Tipo de tolva	Cónica	
Material	Acero inoxidable 304	

## K. TOLVA DE SALIDA DEL MEZCLADOR

Tabla 18. Resultados de tolva de salida del mezclador

Ítem	Datos calculados	
	Valor	
Capacidad volumétrica considerando 20% extra de	0.0466	
Dimensiones de la tolva (largo x base corta x base	2.5 x 0.36 x 0.8 x 1.25	
Ángulo de tolva desde vertical (°)	10	
Características		
Tipo de tolva	Plana de cuña, ver Figura 10	
Tipo de flujo de ceniza alimentado al mezclador	Másico	
Material	Acero carbón con recubierto de PVDF	
Tipo de alimentador de salida	Válvula rotatoria	

<sup>5</sup> Ver Glosario

## L. ALIMENTADOR DE SALIDA DE SILO

Tabla 19. Resultados del alimentador de salida de silo de ceniza volante

Datos calculados	
Ítem	Valor
Potencia para mover el tornillo vacío (W)	0.77
Potencia para mover el tornillo con material (W)	38.04
Potencia total necesaria (W)	38.81
Tiempo de descarga (min)	5
Características	
Tipo	Tornillo
Número de tornillos	1
Tipo de flujo	Másico, ver <a href="#">Figura 12</a> en Anexos
Material	Acero al carbón
Características del tornillo sin fin seleccionado	
Díámetro del tornillo (cm)	10.16
Frecuencia máxima (Hz)	1.33
Tamaño máximo de grumos (cm)	0.64
Capacidad máxima m <sup>3</sup> /h	2.86
Capacidad a 1 RPM ft <sup>3</sup> /h	1.27
Frecuencia (Hz)	0.70
Potencia requerida para mover el alimentador (W)	45.66

(KWS, 2015b)

## M. MEZCLADOR

Tabla 20. Resultados del mezclador

Datos calculados	
Ítem	Valor
Capacidad nominal (m <sup>3</sup> )	0.275
Volumen de mezcla de mezcla (m <sup>3</sup> )	0.110
Transferencia de calor necesaria en enchaquetado con	32,670.74 W
Condiciones de vapor: saturado	9135.55 kPa , entalpía de 2,739 kJ/kg (TLV,
Flujo de vapor dentro de enchaquetado (g/s)	11.93
Características	
Tipo	De listón (de hélice o “ribbon”), ver <a href="#">Figura 14</a>
Número de listones	2
Tipo de mezclado	Convectivo con spray
Material	Acero al carbón
Coefficiente global de transferencia de calor	600 W/m <sup>2</sup> K (Sinnot, 2009)
Características del mezclador seleccionado	
Capacidad (m <sup>3</sup> )	0.1-0.3
Marca	Siehe
Espesor (mm)	5
Masa (kg)	1200
Dimensiones (largo x ancho x alto, m)	2.5 x 0.8 x 1.4
Frecuencia (Hz)	0.68
Potencia requerida para mover el alimentador (kW)	7.5
Característica extra	Alimentación de solución con spray

## N. BOMBA DE VACÍO

Tabla 21. Resultados de la bomba de vacío

Datos calculados	
Ítem	Valor
Capacidad de extracción de carga térmica del Evacuación del vapor de diclorometano ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	32670.74 0.086
Características de la bomba de vacío seleccionada	
Marca	Kurt J. Lesker
Tipo	Seca
Serie	ULVAC DTC, de diafragma
Modelo	DTC-120
Velocidad volumétrica a 60 Hz	$7.2 \text{ m}^3/\text{h}$
Presión	1000 Pa
Potencia de motor	0.4 kW
Dimensiones largo x ancho x alto (cm)	28.9 x 14.2 x 20.2
Masa	27 kg
Sonido	72 db
Material	PTFE (todos los componentes que están expuestos al vacío son de PTFE)

Ideal para gases corrosivos y solventes orgánicos.

(Kurt J. Lesker, 2015)

## O. SISTEMA NEUMÁTICO DE TIRO FORZADO PARA TRANSPORTAR CENIZA ACTIVADA A DUCTO DE GASES DE COMBUSTIÓN Y CENIZA VOLANTE DE SILO DE CENIZA A LÍNEA DE PRODUCCIÓN

Tabla 22. Resultados de sistemas neumáticos para transportar ceniza activada a ducto de gases de combustión y ceniza volante a la línea de producción

Datos calculados	
Ítem	Valor
Potencia (kW)	14.17
Longitud (m)	30
Diámetro de tubería (mm)	127
Velocidad de aire (m/min)	3048
Flujo volumétrico de aire ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	42.48
Pérdida de presión en sistema (kPa)	14
Características del soplador seleccionado	
Tipo de soplador	De presión positiva de desplazamiento positivo
Rango de potencia (kW)	2.2 a 187

(Perry & Don, 1997), (Coperion, 2014)

## P. TUBERÍA DE TANQUE DE AGITACIÓN A MEZCLADOR DE LISTÓN

Tabla 23. Resultados de tubería de tanque de mezcla a mezclador de listón

Ítem	Datos calculados	Valor
Diámetro necesario interno (mm)		39.43
Masa de solución a transportar (kg)		114.80
Tiempo de descarga (min)		7.9
Características de la tubería seleccionada		
Tamaño nominal		DN 32 –NPS 1 ¼
Material		Acero carbón con recubrimiento de PVDF
Cédula		10S
Espesor de la pared (mm)		2.77
Pintura		Reflectiva
Protecciones		Aterrizado

(Atlas Steels, 2012)

## Q. VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO DEL TANQUE DE AGITACIÓN A MEZCLADOR DE LISTÓN

Tabla 24. Resultados de la válvula de control de flujo del tanque de agitación al mezclador de listón

Ítem	Datos calculados	Valor
CV		1.85
Características de la válvula seleccionada		
Tipo de válvula		Diafragma
Presión máxima (kPa)		1206.58
Material del cuerpo de la válvula		Acero
Revestimiento		Polímero fuerte
Material de diafragma		PTFE
Tamaño nominal		DN 32- NPS 1 ¼
Diámetro nominal (mm)		42.2

## R. BOMBA DE TRANSPORTE DE DICLOROMETANO DEL TANQUE DE ALMACENAJE AL TANQUE DE AGITACIÓN

Tabla 25. Resultados de la bomba que transporta diclorometano del tanque de almacenamiento al tanque de agitación.

Ítem	Datos calculados	Valor
Cabeza estática (m)		3
Cabeza dinámica (m)		0.06
Cabeza total (m)		3.06
Flujo másico (kg/h)		1657.38
Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)		1.25
Características de la bomba seleccionada		
Marca		T-MAG
Tipo		De impulsión magnética
Serie		AM
Modelo		TM1C 50 Hz
Material de cubierta		PVDF
Potencia (kW)		0.062 kW
Cabeza máxima (m)		4.57
Flujo máximo (m <sup>3</sup> /h)		2.04

(T-MAG, 2012) \*Misma bomba para transportar diclorometano de la pipa al tanque de almacenamiento.

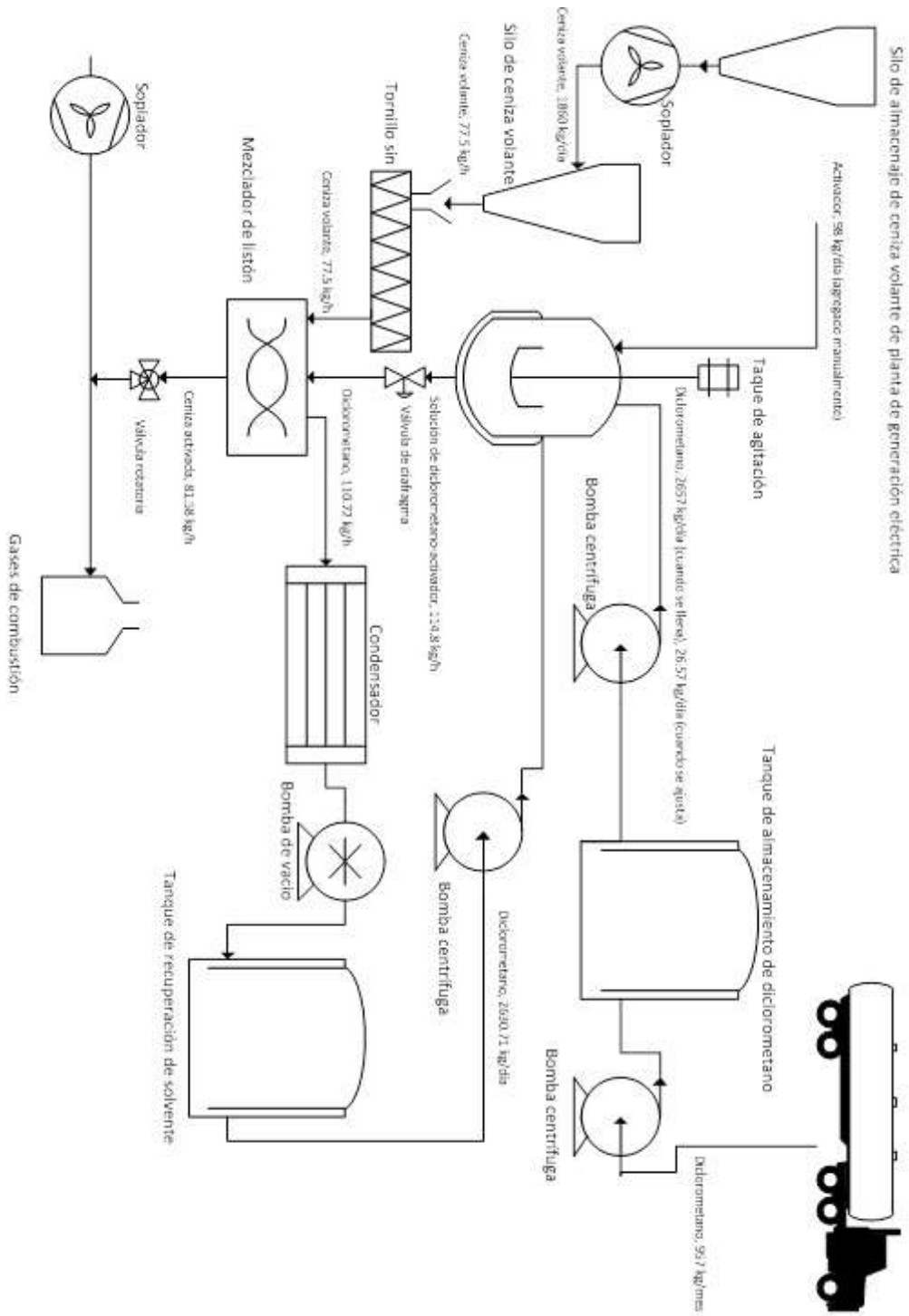
## S. BOMBA DE TRANSPORTE DE DICLOROMETANO DEL TANQUE DE RECUPERACIÓN AL TANQUE DE MEZCLA

Tabla 26. Resultados de la bomba que transporta diclorometano del tanque de recuperación al tanque de agitación

Ítem	Datos calculados	Valor
Cabeza estática (m)		2.3
Cabeza dinámica (m)		0.01
Cabeza total (m)		2.31
Flujo másico (kg/h)		11196.32
Flujo volumétrico (m <sup>3</sup> /h)		5.66
Características de la bomba seleccionada		
Marca		T-MAG
Tipo		De impulsión magnética
Serie		AM
Modelo		TM2G 50 Hz
Material de cubierta		PVDF
Potencia (kW)		0.25 kW
Cabeza máxima (m)		9.75
Flujo máximo (m <sup>3</sup> /h)		5.91

(T-MAG, 2012)

T. DIAGRAMA DE FLUJO



## VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los cinco rangos delimitados de las plantas de generación eléctrica se basaron a partir de un documento del doctor Monterroso el cual cuenta con 139 plantas que emplean filtro de bolsa en los EE. UU. Se delimitaron de tal manera para que no se sobredimensionara el balance de masa de cada uno de los rangos al ser muy amplios.

Se cuantificó el flujo de mercurio emitido por el carbón según la potencia generada de cada planta y el poder calorífico del mismo, ver Marco Teórico. A partir del documento “Método válidos para calcular la tasa de flujo de gases de combustión con referencia a EN 12952-15” se calculó el flujo de los gases de combustión de cada una de las plantas, ver Marco Teórico para conocer las ecuaciones para su determinación. Con estas cantidades, se conoce la cantidad de mercurio por unidad de energía generada (con esto se corrobora el estado de cada planta según el estándar), y cantidad de mercurio por m<sup>3</sup> de gas de combustión. Con los datos de prueba piloto se conoce la concentración del activador en ceniza activada y la cantidad de ceniza activada por volumen que se debe inyectar para cumplir con el estándar, ver Antecedentes.

El objetivo es emplear la menor cantidad de solvente debido a que este se deberá recuperar luego de ser empleado para ayudar a adsorber el activador en la ceniza. La cantidad mínima de solvente a emplear es la que logra disolver el activador; punto de saturación, ver sección de Antecedentes. Conociendo la cantidad de ceniza activada a producir, se determinó la cantidad de activador necesaria con su concentración, 5% (ver sección de Antecedentes), por lo tanto se inició con la cantidad de solvente que disolviera esta cantidad como punto de inicio y se multiplicó dicho valor hasta obtener una especie de pasta entre el diclorometano y la ceniza volátil, dando así un factor de multiplicación de 30. En este valor la ceniza y el solvente se mezclaban bien, sin dejar partes de ceniza no cubiertas de diclorometano.

La capacidad del tanque de almacenamiento de diclorometano será de 0.86 m<sup>3</sup>, y sus dimensiones cumplirán; diámetro 0.88 m y una altura de 1.11 m, con el estándar NFPA 30, ver Marco Teórico. De acuerdo a la capacidad que se necesita en el tanque de almacenaje de diclorometano se necesita un espesor mínimo nominal de 2.67 mm (0.105 in) en su parte cilíndrica como en la parte superior e inferior. Se construiría un tanque de almacenamiento de diclorometano sobre el suelo y no subterráneo debido a que en los tanques sobre el suelo es más fácil detectar fugas y remediarlas, es más fácil monitorear e inspeccionar a través de un contacto visual sin la necesidad de usar equipo electrónico remoto para su detección y pruebas. Se emplearía un tanque vertical debido a que en este el área del líquido expuesta posiblemente al aire es menor que en un tanque horizontal y por lo tanto habrá menor riesgo de alcanzar el porcentaje de mezcla aire-diclorometano de los límites de explosividad, Tabla 2; y el proceso de oxidación será menor. Otra ventaja que presenta el tanque vertical es la menor área que ocupa que uno horizontal, la base puede

colocarse directamente en una superficie sólida y plana; la altura del tanque permite tener mayor energía potencial que reduce el costo del bombeo, a menor presión, es decir mientras más alto está el líquido en el tanque, menor espesor debe tener la pared por lo que se pueden colocar varios espesores de pared conforme la presión hidrostática disminuye. El material del tanque será acero, del tipo acero carbón ya que este es adecuado para manejar diclorometano seco. El tanque de almacenaje y el tanque de recuperación de diclorometano serán pintados con pintura reflectiva para evitar absorción de calor y pérdida por evaporación.

Se empleará un tanque agitado para disolver el activador en diclorometano porque los tanques agitados son usados comúnmente para realizar disoluciones de manera rápida y homogénea, tienen un amplio rango de capacidades en cuanto al volumen de fluido que se mueve, y pueden manejar un flujo grande si las viscosidades son pequeñas, ver Marco Teórico: Agitación; como es el caso del diclorometano que posee una viscosidad de 0.425 cP, ver Tabla 1. El activador es menos pesado que el líquido, el activador posee una densidad de 1.24 g/mL y el diclorometano de 1.33 g/mL para disolver sólidos que son más pesados en el Marco Teórico se menciona que existen dos métodos. Se empleará el que no genera vórtices; mecanismo de recirculación, el flujo no deberá ser turbulento para evitar ingreso de aire y aumento de la temperatura. Se trabajará con un impeler axial tipo hidroala debido a que presenta un perfil eficiente, incrementa el flujo axial, y reduce la fuerza de corte. El tipo de baffle de hidroala a emplear será de la marca White Mountain Process. Se trabajó con un impeler para flujo laminar porque si se hubiera empleado un impeler para flujo turbulento y se hubiera empleado para  $Re$  menores a 100 la calidad de agitación sería muy pobre. El diclorometano tiene una baja viscosidad, 0.425 cP, es por ello que utilizará un tanque de sección transversal rectangular porque minimiza el flujo tangencial como se puede ver en la sección de Marco Teórico. La altura del impeler desde el fondo del tanque es de 0.36 m, valor obtenido de la relación recomendada por Paul, ver Marco Teórico. Las dimensiones del tanque; base y largo de 1.20 m, y altura de 1.44 m; dimensiones que ocupa el líquido. Considerando un 15% de volumen extra la altura total del tanque es de 1.66 m. Las relaciones para el dimensionamiento se observan la sección del Marco Teórico. El diámetro del impulsor es de 0.40 m, según la relación proporcionada por McCabe, 2007. El ancho y largo de las paletas es de 0.08 m y 0.1 m respectivamente, estos valores se calcularon a partir de las relaciones proporcionadas por McCabe, 2007.

El volumen del tanque de recuperación es 2.30 m<sup>3</sup> debido a que se tendrá una capacidad máxima de recuperación igual a la cantidad de solvente que posee la mezcla. El volumen cuenta con un 15% de volumen extra como factor de seguridad. Debido a que el activador se encuentra en equilibrio con una especie que es altamente oxidante no se puede usar acero en los equipos donde se habrá contacto con el activador. Se puede emplear dos tipos de recubrimientos adecuados según GRACO, Versamatic Y Quick: el PTFE o el PVDF, pero de acuerdo los proveedores al precio de estos materiales, se empleará el segundo, como se puede observar en la Figura 24.

Las dimensiones de la tolva de salida del mezclador y de la tolva del silo de ceniza se decidieron a partir del ángulo encontrado para estas,  $10^\circ$  desde la vertical, ver Figura 10 y Figura 11; del ángulo de fricción interna,  $35^\circ$ ; y el ángulo de fricción de pared con el acero galvanizado de la ceniza volátil,  $35^\circ$ , ver Marco Teórico. Aunque la tolva de salida del mezclador poseerá un recubrimiento con PVDF no hay problema en usar el mismo ángulo de fricción de pared con el acero, ya que con este material el ángulo debe ser menor al de acero por sus propiedades. Se decidió que la tolva a utilizar fuese tipo cuña en el mezclador debido a la geometría con la que se contaba en la salida del mismo.

El volumen en la tolva del silo de ceniza volante es de  $0.14 \text{ m}^3$  y el de la parte cilíndrica del silo es de  $0.92 \text{ m}^3$ . Debido a que el ángulo de reposo de la ceniza es bajo,  $22^\circ$  (Rotter, 2002), el volumen ocupado por esta en el cono superior formado en la parte de arriba del silo es despreciable porque es plana la parte superior. El volumen del silo tiene un 20% más de la necesaria como factor de seguridad. Las dimensiones de la tolva son: alto 1.32 m, diámetro de salida 0.32 m, diagonal 1-38 m; las dimensiones de la parte cilíndrica son 1.82 m de alto, con un diámetro de 0.8 m. Estas dimensiones se determinaron a partir del método para obtener el ángulo desde la vertical de la tolva empleado por Maynard, 2013, ver Metodología.

El material del silo será de acero galvanizado, el cual tiene la ventaja de ser resistente al agua, resistente a la corrosión, poco mantenimiento y un tiempo de vida largo según Lipp, 2015.

El tipo de alimentador de salida del silo de ceniza será un tornillo ya que es un alimentador cerrado adecuado para trabajar con ceniza volante, que es fina. El tornillo tiene unas pocas partes móviles, lo que minimiza el mantenimiento, comparado con una banda y se trabajará con un tornillo de flujo másico porque de esta manera se tendrá un patrón de flujo en el cual todo el material baja a la misma tasa, independientemente de la posición en la que se encuentre. La potencia obtenida para mover el tornillo es mayor a la esperada, ya que esta potencia es calculada para un tornillo estándar, y la potencia de un tornillo de núcleo cónico y paso variable (características de un tornillo de flujo másico) es menor, ver Figura 22 en la sección de Anexos, conclusión obtenida por Fernando, 2009, ver Figura 20 en la sección de Anexos.

Se escogerá un mezclador de listón o “ribbon” porque su capacidad de trabajar con materiales cohesivos y su reducción de la segregación, ver Marco Teórico. El mezclador tendrá dos hélices debido a que la adición de otra hélice, aumenta las regiones de mezclado, ver Marco Teórico. De acuerdo a la capacidad de trabajo recomendada por Charles Ross & Son Company un mezclador de listón debe operar de 30-40% de su capacidad nominal. Ya que la línea de producción tiene un volumen requerido total de mezcla de  $0.110 \text{ m}^3/\text{h}$  (ver Tabla 10), necesita un mezclador de listón de capacidad de  $0.275 \text{ m}^3$  (ver Mezclador en Resultados, página 40) o lo más cercano a este valor. La operación de mezcla será por lotes por las ventajas prácticas que presenta frente a una continua, como tiempo de retención controlado, menor costo de instalación y operación, ver Marco Teórico.

La cantidad de diclorometano a evaporar es de 110.72 kg, Tabla 9, el cual posee una capacidad calorífica de 102.3 J/mol K y un calor de vaporización de 330kJ/kg, Tabla 2. A la ceniza se le transferirá una parte de calor, por lo que se tomó en cuenta el calor transferido a la ceniza. La cantidad de ceniza es de 77.50 kg, Tabla 9, su capacidad calorífica es de 0.8 J/ kg °C, Tabla 28. A partir de estos datos y de un tiempo establecido de 20 minutos para evaporar el diclorometano se determinó la transferencia de calor necesario para dicho proceso, 32,670.74 W.

Tomando como base una planta de generación de electricidad con carbón de 270MW (Maryamchik, 2008), se tiene vapor a una presión y una temperatura de 1325 psig y 487 °C , respectivamente, el cual tiene una entalpía de 2,739 kJ/kg –vapor saturado (TLV, 2015) por lo que se necesita un flujo de vapor de 11.93 g/s dentro del enchaquetado del mezclador de listón. Estos datos son ideales, si no hubiera resistencias de transferencias. Para que la transferencia se pueda lograr las resistencias convectivas y conductivas dentro del mezclador deben ser lo más bajas posibles, es decir el coeficiente global de transferencia de calor debe ser alto. Sinnott considera el coeficiente de un evaporador con vapor afuera de los tubos y un flujo de pesado orgánico dentro del tubo a evaporar de 600 W/m<sup>2</sup> K, ver Marco Teórico, por lo cual este será el valor del coeficiente global de transferencia de calor de diseño para el mezclador de listón cuando funcione como evaporador. Este coeficiente global es el mínimo; se obtiene cuando se trabaja con condiciones adversas: velocidades de flujo pequeñas, líquidos viscosos, convección natural, y ensuciamiento. Por lo tanto es posible aumentar el coeficiente global dependiendo aumentado la velocidad del vapor y haciendo girar la hélice del mezclador más rápido para que haya una mejor homogenización de la temperatura en la mezcla de la ceniza y se reduzca la transferencia por convección natural y haya una mejor transferencia por convección forzada.

Para enfriar el mezclador luego de usarlo para evaporar el diclorometano, se transportará por su enchaquetado agua que se emplea en el condensador para enfriarlo si es necesario, ya que el mezclador debe estar listo en una hora para el siguiente lote porque es la base de tiempo de producción por lote.

Para diseñar el condensador se trabajó con el promedio de los coeficientes de diseño de un condensador de coraza y tubos que recomienda Sinnott, 850 W/ m<sup>2</sup> K, para no subdimensionar o sobredimensionar la transferencia de calor deseada. Se determinó que el área que debe tener el condensador es de 5.15 m<sup>2</sup>, con temperaturas de entrada y salida, del diclorometano de 40°C y 30°C respectivamente, y del agua de 25°C y 30°C respectivamente. El diclorometano fluirá dentro de los tubos y por la coraza el agua, de esta forma sólo los tubos tendrán que ser aleaciones resistentes a una alta corrosión y no todo el intercambiador de calor si se realizara con el diclorometano en la coraza. Se empleará agua como fluido frío debido a que los condensadores son más pequeños que los condensadores que emplean aire, ver Marco Teórico. Otra ventaja de usar agua en lugar de aire es que a relaciones entre 12- 25% de aire hay riesgo de explosión; cómo se puede ver en la Tabla 2; por lo tanto es más peligroso si hay alguna fuga.

Se empleará una bomba de vacío de funcionamiento seco; ver Marco Teórico; porque no deberá contaminarse el vapor de diclorometano porque este deberá recuperarse. La velocidad a la que se evacuará será de  $0.096 \text{ m}^3/\text{min}$ , debido a que por cada  $0.028 \text{ m}^3/\text{min}$  se puede evacuar de una manera efectiva la raíz cuadrada de toneladas de refrigeración (TRF) de un sistema; ver Marco Teórico; y se tiene 9.29 TRF ( $32670.74 \text{ W}$ ). El modelo que cumple con esta velocidad es el DTC-120. Los componentes de la bomba de vacío que están expuestos al vacío son de PTFE debido a que este polímero es resistente al diclorometano, está categorizado como excelente para este solvente según GRACO.

Se empleará una válvula rotatoria como alimentador de salida de la tolva de ceniza activada porque es un alimentador común para descargar materiales a un sistema de transporte neumático y puede manejar la ceniza porque no es cohesiva, ver Marco Teórico.

A partir de los nomogramas obtenidos de Perry 1997, ver Marco Teórico, se determinó la potencia de los sistemas neumáticos la cual es de  $14.17 \text{ kW}$ , para el sistema de transporte de ceniza activada a la chimenea como del sistema del silo de ceniza a la línea de producción. La longitud considerada ambos sistemas fue de 30 metros; incluyendo tubería vertical, horizontal, y accesorios. La velocidad obtenida del aire a partir de la tabla 21-13 de Perry, fue de  $3200 \text{ m}/\text{min}$ , a partir de la densidad más cercana,  $1920 \text{ kg}/\text{m}^3$ , a la densidad de la ceniza ( $1940 \text{ kg}/\text{m}^3$ , Tabla 27. La velocidad de aire y la longitud son los únicos datos necesarios para poder emplear los nomogramas y predecir la potencia del sistema. Se emplearán sopladores de tiro forzado debido a que estos los sopladores son menos costosos que los de tiro inducido, ver Marco Teórico.

De acuerdo al intervalo de velocidades recomendado por McCabe cuando el flujo es por gravedad desde tanques elevados, se trabajó con la velocidad promedio de este intervalo, de  $0.15 \text{ m}/\text{s}$ , en la tubería del tanque de mezclado al mezclador de hélice; ya que el tanque se colocará arriba del mezclador y el diclorometano se transportará por medio de la gravedad. Desde el tanque de recuperación del solvente hacia el tanque de mezcla, y del tanque de almacenaje de diclorometano a tanque de mezcla se tendrá una velocidad de diclorometano de  $1.5 \text{ m}/\text{s}$ , velocidad recomendada para el diclorometano líquido en tuberías de acero, ver Marco Teórico. A partir de estas velocidades se encontró el área de la sección transversal de las tuberías con la ecuación de continuidad, Ecuación 20, y a partir de esta el diámetro, Ecuación 19.

La válvula de diafragma se empleará para regular el flujo de salida del tanque de mezclado del activador y del diclorometano debido a que presenta varias ventajas sobre otras válvulas; ver Marco Teórico; y la ventaja principal es que en la válvula de diafragma únicamente el diafragma está en contacto con diclorometano. Se empleará acero carbón porque el metal no estará en contacto con el diclorometano, el diafragma será de PTFE ya que este polímero es resistente al diclorometano y a la especie que está en equilibrio del activador, la cual es corrosiva. Debido a que se tiene un CV de 5 y el CV necesario es de 1.85 se pondrá tener un mayor flujo si es necesario. La presión que soporta la válvula es mucho mayor a la

presión a la cual estará sometida, ya que la presión máxima es de 15.5 psi, obtenida a partir de la presión ejercida por el fluido más la presión atmosférica.

El tanque de mezclado, el tanque de almacenamiento de diclorometano, el mezclador de listón, el condensador, la bomba de vacío y toda tubería que esté en contacto con diclorometano se deberá aterrizar para evitar descargas electrostáticas que puede causar fuentes de ignición.

La cabeza total necesaria de la bomba del tanque de recuperación es de 2.31 m y la del tanque de almacenaje de 3.06 m; el flujo volumétrico de la primera es de 5.66 m<sup>3</sup>/h y el de la segunda de 1.25 m<sup>3</sup>/h por lo que el modelo que se escogió de ambas bombas cumplen con estos parámetros. La bomba marca T-MAG, modelo TM2G 50 Hz tiene una cabeza máxima de 9.75 m y un flujo máximo de 5.91 m<sup>3</sup>/h, la cual se escogerá para el tanque de recuperación. La bomba marca T-MAG, modelo TM1C 50 Hz tiene una cabeza máxima de 4.57 m y un flujo máximo de 2.04 m<sup>3</sup>/h, la cual se elegirá para el tanque de almacenaje.

La disminución de emisiones de mercurio evitará daños a la salud de las personas, como dolores de cabeza, al corazón, daños al sistema inmune, y problemas en recién nacidos con disminución en las habilidades de pensar y aprender. A nivel ecológico, al disminuir la exposición de metilmercurio, formado por mercurio oxidado (Hg<sup>2+</sup>), las aves y mamíferos que comen peces, aumentarán su reproducción, su tiempo de vida, y tendrán mayor desarrollo y un comportamiento.

## IX. CONCLUSIONES

1. Los cinco rangos delimitados de las plantas de generación eléctrica determinados a partir de un documento que cuenta con 139 plantas que emplean filtro de bolsa en los EE. UU. son de 33 a 150 (incluido) MW, de 150 a 250 (incluido) MW, de 250 a 500 (incluido) MW, de 500 a 750 (incluido) MW, y de 750 a 1010 (incluido) MW. Estos rangos permiten no sobredimensionar el equipo.
2. El balance de masa del rango de plantas generadoras de electricidad de 250 a 500 (incluido) MW se estableció como sigue, ceniza activada a producir 81.58 kg/h, ceniza 77.5 kg/h, activador, 4.08 kg/h, y diclorometano 110.72 kg/h tomando como base la producción de un lote cada hora.
3. La potencia necesaria para manejar la línea de producción de ceniza activada para el rango de plantas de 250 a 500 (incluido) MW, es de 36.45 kW y la energía es de 131,220 kJ/h.
4. Los equipos necesarios para la línea de producción de ceniza activada para el rango de plantas generadoras de electricidad de 250 a 500 (incluido) MW son: un tanque de almacenaje de diclorometano con una capacidad de 4.49 m<sup>3</sup>, un tanque de agitación de 2.39 m<sup>3</sup>, un tanque de recuperación de 2.18 m<sup>3</sup>, un mezclador tipo listón de 0.3 m<sup>3</sup>, un condensador con un área de 5.21 m<sup>2</sup>, una bomba de transporte de diclorometano del tanque de almacenamiento al tanque agitado con un flujo volumétrico máximo de 1.25 m<sup>3</sup>/h, una bomba de transporte de diclorometano del tanque de recuperación al tanque de agitación con un flujo máximo de 5.91 m<sup>3</sup>/h, una bomba de vacío de 7.2 m<sup>3</sup>/h, un silo de ceniza de 1.05 m<sup>3</sup>, dos sistemas neumáticos de tiro forzado para transportar la ceniza volante a la línea de producción, y otro para transportar la ceniza activada hacia la chimenea de 14.17 kW cada uno. Ver detalles en la sección de Resultados.



## X. RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas con una concentración menor de activador en la ceniza activada para emplear menor cantidad de activador y de igual forma cumplir con la norma establecida por la EPA.
2. Realizar prueba de homogenización en mezcla usando evaporación del solvente, pesando posteriormente una cantidad de muestras de distintas posiciones en la mezcla.
3. Realizar curva de equilibrio diclorometano-activador.
4. Validar las características de la ceniza de proceso de cada planta con las de la ceniza empleada en este trabajo.
5. Verificar que el porcentaje de pérdida de solvente sea el mínimo, por debajo del 1%, límite máximo de diseño establecido.



## XI. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. (2013). Norma UNE-EN 450-1:2013. Recuperado 19 de junio de 2015, a partir de <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0051480&pdf=#.VYSWzVKmgm8>
- Aliasso, J., & Graham Corporation. (1999). Choose the right vacuum pump. Recuperado 16 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.graham-mfg.com/usr/pdf/techlibvacuum/222.pdf>
- ASTM. (1994). *ASTM C311 -94a. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. Recuperado a partir de <http://www.astm.org/Standards/C311.htm>
- Atlas Steels. (2012). Nominal Dimensions of Pipe. Recuperado 19 de diciembre de 2015, a partir de [http://www.atlassteels.com.au/documents/Pipe\\_Dimensions\\_chart\\_rev\\_Jan\\_2012.pdf](http://www.atlassteels.com.au/documents/Pipe_Dimensions_chart_rev_Jan_2012.pdf)
- Bell & Gossett. (2015). Large Straight Tube Heat Exchangers. Recuperado a partir de <http://bellgossett.com/heat-exchangers/straight-tube-heat-exchangers/large-straight-tube-heat-exchangers/>
- Carr, R. (1969). Properties of Solids. *Chemical Engineering*.
- Charles Ross & Son Company. (s. f.). Specifying ribbon blenders. Recuperado 10 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.ribbonblenders.com/pdf/spec%20rb.pdf>
- Chemical Book. (2008). Dichloromethane CAS#: 75-09-2. Recuperado 2 de noviembre de 2015, a partir de [http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB7740372\\_EN.htm](http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB7740372_EN.htm)
- Coperion. (2014). Coperion K-Tron Pressure Blower Packages. Recuperado 19 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.ktron.com/process-equipment/pneumatic-conveying/blower-packages/pressure-blower.cfm>
- Dietsche, W. (1998). Mix or Match: Choose the best mixers every time. *Chemical Engineering*.

- DOW. (s. f.). Cloruro de metileno. Recuperado 1 de diciembre de 2015, a partir de [http://www.dow.com/safechem/eu/esp/es/pdfs/TDS\\_Cloruro\\_De\\_Metileno.pdf](http://www.dow.com/safechem/eu/esp/es/pdfs/TDS_Cloruro_De_Metileno.pdf)
- Encyclopedia of chemical engineering equipment. (2014). Condensers - Heat Transfer. Recuperado 18 de diciembre de 2015, a partir de <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/HeatTransfer/Condensers/Condensers.html>
- EPA. (1997). *Mercury Study Report to Congress, Volume III: Fate and Transport of Mercury in the Environment*. U. S.: EPA. Recuperado a partir de 1997
- EPA. (2011a, febrero 23). EPA Establishes Clean Air Act Standards for Boilers and Incinerators / Sensible standards provide significant public health benefits while cutting costs from initial proposal by nearly 50 percent. Recuperado 17 de junio de 2015, a partir de <http://yosemite.epa.gov/opa/admpress.nsf/d0cf6618525a9efb85257359003fb69d/06ddff3abfb133d585257840005e6406!opendocument>
- EPA. (2011b, marzo 16). Clean Air Mercury Rule | US EPA. Recuperado 17 de junio de 2015, a partir de <http://www.epa.gov/mercuryrule/>
- EPA. (2012). Federal Register. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants From Coal- and Oil-Fired Electric Utility Steam Generating Units and Standards of Performance for Fossil-Fuel-Fired Electric Utility, Industrial-Commercial- Institutional, and Small Industrial-Commercial-Institutional Steam Generating Units; Final Rule. Recuperado 5 de octubre de 2015, a partir de <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2012-02-16/pdf/2012-806.pdf>
- EPA. (2015, junio). How is EPA reducing mercury emissions from power plants? Recuperado 17 de junio de 2015, a partir de <http://publicaccess.supportportal.com/link/portal/23002/23012/Article/17919/How-is-EPA-reducing-mercury-emissions-from-power-plants>

- Fernandez, J., Cleary, P., & McBride, W. (2009). Effect of screw design on hopper draw down by a horizontal screw feeder. Recuperado 10 de diciembre de 2015, a partir de [http://www.cfd.com.au/cfd\\_conf09/PDFs/122FER.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_conf09/PDFs/122FER.pdf)
- Flow Control Norway AS. (2015). Ball Valves. Recuperado 21 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.flowcontrol.no/valves/ball-valves-2/>
- Fluid Velocities in Pipes. (s. f.). Recuperado 4 de enero de 2016, a partir de [http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-velocities-pipes-d\\_1885.html](http://www.engineeringtoolbox.com/fluid-velocities-pipes-d_1885.html)
- GENEMCO. (s. f.). Microsoft Word - GOB5471bellgossetshelltube.doc - GOB5471bellgossetshelltube.pdf. Recuperado 18 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.genemco.com/catalog/pdf/GOB5471bellgossetshelltube.pdf>
- GM Engineering. (2015). Valve Installation. Recuperado 20 de diciembre de 2015, a partir de [http://www.gmengg.com/resource\\_centre/valve\\_installation.php](http://www.gmengg.com/resource_centre/valve_installation.php)
- Government Accountability Office. (2005). *Clean Air Act. Emerging Mercury Control Technologies Have Shown Promising Results, but Data on Long-Term Performance Are Limited.*
- GRACO. (2013). Chemical Compatibility Guide Chemical Compatibility Guide - Graco\_ChemCompGuideEN-B.pdf. Recuperado 20 de noviembre de 2015, a partir de [http://www.graco.com/content/dam/graco/ipd/literature/misc/chemical-compatibility-guide/Graco\\_ChemCompGuideEN-B.pdf](http://www.graco.com/content/dam/graco/ipd/literature/misc/chemical-compatibility-guide/Graco_ChemCompGuideEN-B.pdf)
- Graham, D., Harnevie, H., van Beek, R., & Blank, F. (2012). Validated methods for flue gas flow rate calculation with reference to EN-12952-15.
- INSHT. (2005). Fichas FISQ. Recuperado 26 de junio de 2015, a partir de <http://www.insht.es/portal/site/Insht/menuitem.a82abc159115c8090128ca10060961ca/?vgnnextoid=4458908b51593110VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD&ce=&rtecs=&nu=&einecs=&y=0&cas=&x=0&icsc=&text=diclorometano>

Kotz, J. C., Treichel, P., & Weaver, G. C. (2006). *Chemistry & chemical reactivity* (6th ed). Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole.

Kurt J. Lesker. (2015). Kurt J. Lesker Company | ULVAC Chemical—DTC Series | Vacuum. Recuperado 17 de diciembre de 2015, a partir de [http://www.lesker.com/newweb/vacuum\\_pumps/diaphragmpump\\_ulvac\\_dtc.cfm](http://www.lesker.com/newweb/vacuum_pumps/diaphragmpump_ulvac_dtc.cfm)

KWS. (2015a). Conveyor Capacity. Recuperado 11 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/capacity.htm>

KWS. (2015b). Mass Flow Screw Feeders. Recuperado 9 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.kwsmfg.com/products/mass-flow-screw-feeders.htm>

KWS. (2015c). Screw Conveyor Materials Table. Recuperado 11 de diciembre de 2015, a partir de [http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/dg\\_materials-table.htm](http://www.kwsmfg.com/services/screw-conveyor-engineering-guide/dg_materials-table.htm)

Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace- Alibaba.com. (s. f.). Recuperado 16 de enero de 2016, a partir de <http://www.alibaba.com/?uptime=20111230&ptsid=101200000604534&crea=21430684387&plac=&netw=g&device=c&ptscode=0110101010010001>

Martin, J., Hamilton, B., Ventura, S., Osterman, M., Wilson, E., & Mathews, T. (2012). *Births: Final Data for 2010*. (National Vital Statistics Reports No. 1) (p. 72). EE.UU.: Department of health and human services. Recuperado a partir de [http://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr61/nvsr61\\_01.pdf](http://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr61/nvsr61_01.pdf)

Maryamchik, M. (2008). Technical paper: Operating Experience and New Development. Babcock & Wilcox power generation group. Recuperado 15 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.babcock.com/library/Documents/BR-1804.pdf>

Maynard, E. (2008). Blender Selection And Avoidance of Post-Blender Segregation. *Chemical Engineering*.

Maynard, E. (2013). Ten Steps to an Effective Bin Design. Recuperado 21 de noviembre de 2015, a partir de [https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20131125\\_1.pdf](https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20131125_1.pdf)

- McCabe, W. L., Smith, J. C., Harriot, P., & Piombo, A. C. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- MEL Equipment Encyclopedia. (2015). Valves - Transport and Storage. Recuperado 21 de diciembre de 2015, a partir de <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/TransportStorage/Valves/Valves.html>
- Monterroso, R., & Krutkramelis, K. (s. f.). X\_FA Fact Sheet. On-site mercury removal system for coal-fired power plants. Pollution Control Technologies.
- Muzzio, F., & Alexander, A. (2005). Scale Up of Powder-Blending Operations. Recuperado 1 de diciembre de 2015, a partir de [http://images.alfresco.advanstar.com/alfresco\\_images/pharma/2014/08/22/c3495c71-6c68-44d2-926b-1be1fe5b3bbf/article-150852.pdf](http://images.alfresco.advanstar.com/alfresco_images/pharma/2014/08/22/c3495c71-6c68-44d2-926b-1be1fe5b3bbf/article-150852.pdf)
- NEI. (2014, junio). 2011 NEI, version I, Technical Support Document. Recuperado a partir de [http://www.epa.gov/ttn/chief/net/2011nei/2011\\_nei\\_tsdv1\\_draft2\\_june2014.pdf](http://www.epa.gov/ttn/chief/net/2011nei/2011_nei_tsdv1_draft2_june2014.pdf)
- NESCAUM. (2003). *Mercury emissions from coal fired power plants* (Northeast States for Coordinated Air Use Managment). Masachusetts. Recuperado a partir de [www.nescaum.org/documents/rpt031104mercury.pdf](http://www.nescaum.org/documents/rpt031104mercury.pdf)
- NFPA. (2015). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. Recuperado 28 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/document-information-pages?mode=code&code=30>
- NHANES. (2013). *Trends in Blood Mercury Concentrations and Fish Consumption Among U.S. Women of Childbearing Age, 1999-2010* (p. 81). EE.UU.: EPA. Recuperado a partir de <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/fishshellfish/fishadvisories/upload/Trends-in-Blood-Mercury-Concentrations-and-Fish-Consumption-Among-U-S-Women-of-Childbearing-Age-NHANES-1999-2010.pdf>

- NTP. (2011). Report on Carcinogens (12th Ed. ) -. Recuperado 26 de junio de 2015, a partir de [https://books.google.com.gt/books?id=raW5FLj408QC&pg=PA148&dq=dichloromethane+%2B+uses&hl=en&sa=X&ei=SMWVb-SH8Oy-AHt84HgAQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.gt/books?id=raW5FLj408QC&pg=PA148&dq=dichloromethane+%2B+uses&hl=en&sa=X&ei=SMWVb-SH8Oy-AHt84HgAQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Obla, K. (2008). *Specifying Fly Ash for Use in Concrete* (p. 7). Concrete InFocus. Recuperado a partir de <http://www.nrmca.org/research/cif%20spring%2008%20fly%20ash.pdf>
- Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (Eds.). (2004). *Handbook of industrial mixing: science and practice*. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience.
- Perry, R. H., & Don, G. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (7.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (1984). *Manual del ingeniero químico* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (8th ed). New York: McGraw-Hill.
- Piping Materials Cost Ratios. (s. f.). Recuperado 5 de enero de 2016, a partir de [http://www.engineeringtoolbox.com/piping-materials-cost-ratios-d\\_864.html](http://www.engineeringtoolbox.com/piping-materials-cost-ratios-d_864.html)
- Primo, E. (1995). *Química orgánica básica y aplicada: de la molécula a la industria*. 2 2. Valencia [etc.]: Universidad Politécnica de Valencia [etc.].
- Quick Cut. (s. f.). Chemical-Resistance-Chart.pdf. Recuperado 17 de noviembre de 2015, a partir de <http://www.quickcutgasket.com/pdf/Chemical-Resistance-Chart.pdf>
- Quimnet. (2015). Los silos para almacenaje | QuimiNet.com. Recuperado 16 de enero de 2016, a partir de <http://www.quiminet.com/articulos/los-silos-para-almacenaje-16412.htm>
- Robinson, M., & Cleary, P. (s. f.). Flow and Mixing Performance in Helical Ribbon Mixers. Recuperado 10 de noviembre de 2015, a partir de [http://people.maths.ox.ac.uk/robinsonm/HelicalRibbonPaper\\_issue6\\_clean.pdf](http://people.maths.ox.ac.uk/robinsonm/HelicalRibbonPaper_issue6_clean.pdf)
- Rotter, J. (2002). Background discussion document for EN\_1991-4. Recuperado 8 de diciembre de 2015, a partir de [http://eurocodes.fi/1991/1991-4/background1991-4/Background\\_to\\_prEN\\_1991-4%20\\_version\\_15\\_\(2002-04\).pdf](http://eurocodes.fi/1991/1991-4/background1991-4/Background_to_prEN_1991-4%20_version_15_(2002-04).pdf)

- Sear, L. K. A. (2001). *Properties and Use of Coal Fly Ash: A Valuable Industrial By-product*. Thomas Telford.
- Siehe Industry. (2014). Horizontal Ribbon Mixer working principle/technical parameters,pictures price,machine manufacturer - Siehe Industry. Recuperado 7 de diciembre de 2015, a partir de <http://sieheindustry.com/products/detail-powder/Blenders/HorizontalRibbonMixer.html>
- Sigma-Aldrich. (2013). Safety Data Sheet. Recuperado 9 de septiembre de 2015, a partir de <https://msdsmanagement.msdsoln.com/pdf/?libraryID=JGB496&pageID=3&nw=true&autoOpen=false>
- Sinnot, R. (2009). Overall Heat Transfer Coefficients | Blackmonk Engineering. Recuperado a partir de <http://blackmonk.co.uk/2009/10/22/overall-heat-transfer-coefficients/>
- Sinnott, R. K., Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (2006). *Chemical engineering design* (4. ed., reprinted). Amsterdam: Elsevier, Butterworth-Heinemann.
- Stanley-Wood, N. (2008). Bulk Powder Properties: Instrumentation and Techniques. En D. M. Reader (Ed.), *Bulk Solids Handling* (pp. 1-67). Blackwell Publishing Ltd. Recuperado a partir de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781444305449.ch1/summary>
- Staudt, J., Andover Technology Partners, & M.J. Bradley & Associates LLC. (2011). *Control Technologies to Reduce Conventional and Hazardous Air Pollutants from Coal-Fired Power Plants* (p. 36). Boston: NESCAUM.
- Testo. (2010). Gases de combustión | Academia Testo. Recuperado 15 de enero de 2016, a partir de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion-1>
- TLV. (2015). Calculadora: Tabla de Vapor Sobrecalentado | TLV. Recuperado 15 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.tlv.com/global/LA/calculator/superheated-steam-table.html>
- T-MAG. (2012). AM Series Pumps - T-Mag Magnetic Drive Pumps | Sealless Pumps | Chemical Pumps. Recuperado a partir de <http://www.tmagpumps.com/products/Mag-Drive-Pump/AM>

- TOXNET, E. U. (2015, junio 26). Hazardous Substances Data Bank. Recuperado 26 de junio de 2015, a partir de <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?./temp/~5XhF3G:1>
- T&P. (s. f.). Escogiendo la Bomba de Vacío correcta. Recuperado 17 de diciembre de 2015, a partir de [http://www.typrefrigeracion.com.mx/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=564&category\\_id=334&option=com\\_virtuemart&Itemid=11](http://www.typrefrigeracion.com.mx/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=564&category_id=334&option=com_virtuemart&Itemid=11)
- Underwriters Laboratories. (1968a). STEEL ABOVEGROUND TANKS FOR FLAMMABLE AND COMBUSTIBLE LIQUIDS UL 142-1968. Recuperado 16 de enero de 2016, a partir de <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/006/ul.142.1968.html>
- Underwriters Laboratories. (1968b). STEEL ABOVEGROUND TANKS FOR FLAMMABLE AND COMBUSTIBLE LIQUIDS UL 142-1968. Recuperado 16 de enero de 2016, a partir de <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/006/ul.142.1968.html>
- UNEP. (2013). Global Mercury Assesment 2013. Recuperado a partir de <http://www.unep.org/PDF/PressReleases/GlobalMercuryAssessment2013.pdf>
- UPME. (2005). *La cadena del carbón: el carbón colombiano fuente de energía para el mundo*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
- USGS. (2001). *Mercury in U.S. Coal - Abundance, Distribution, and Modes of Occurrence*.
- Valfonta. (2015). How to choose the right valve. Recuperado 20 de diciembre de 2015, a partir de <http://www.valfonta.com/en/general-catalogs/How%20to%20choose%20the%20right%20valve.pdf>
- Versamatic. (2015). Chemical\_resistance\_guide.pdf. Recuperado 17 de noviembre de 2015, a partir de [http://www.versamatic.com/pdfs/chemical\\_resistance\\_guide.pdf](http://www.versamatic.com/pdfs/chemical_resistance_guide.pdf)
- White Mountain Process. (2016). Industrial Mixing Impellers. Recuperado 17 de enero de 2016, a partir de <http://www.wmprocess.com/industrial-mixing-impellers/>

Wilcox, J., Rupp, E., Ying, S., Lim, D.-H., Negreira, A., Kirchofer, A., ... Lee, K. (2011). Mercury adsorption and oxidation in coal combustion and gasification processes. Recuperado a partir de [http://cec-lab.stanford.edu/documents/science\\_32.pdf](http://cec-lab.stanford.edu/documents/science_32.pdf)



## XII. ANEXOS

### A. APARIENCIA FÍSICA DEL ACTIVADOR

Figura 2. Apariencia física de activador con proveedor Jiangyin Lanyu Chemical Co.



(«Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace-Alibaba.com», s. f.)

Figura 3. Apariencia física del activador del proveedor Shaanxi TOP Pharm Chemical Co



(«Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace-Alibaba.com», s. f.)

## B. EMBALAJE DE TRANSPORTE DEL ACTIVADOR

Figura 4. Embalaje para transportar el activador por el proveedor Jiangyin Lanyu Chemical Co.



(«Manufacturers, Suppliers, Exporters & Importers from the world's largest online B2B marketplace-Alibaba.com», s. f.)

## C. CAJA DE CARR PARA MEDIR DENSIDAD AIREADA Y COMPACTA.

La caja de Carr (Stanley-Wood, 2008) empleada para medir la densidad aireada y compacta se observa en la Figura 5. Se empleó un método similar a la caja de Carr requerida en la norma ASTM D 6393-99. El material de la caja fue de vidrio. Las dimensiones reales fueron: altura 5.7cm, largo 7cm, ancho 5.9 cm, Figura 6.

Figura 5. Caja de Carr para medir densidad aireada y compacta

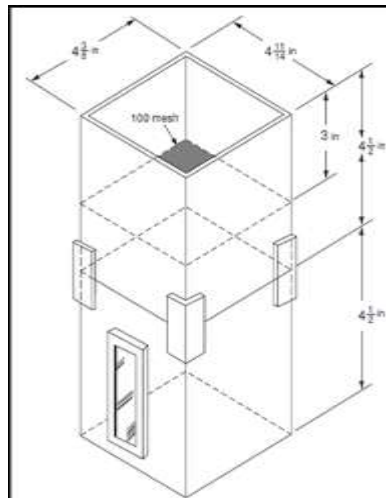
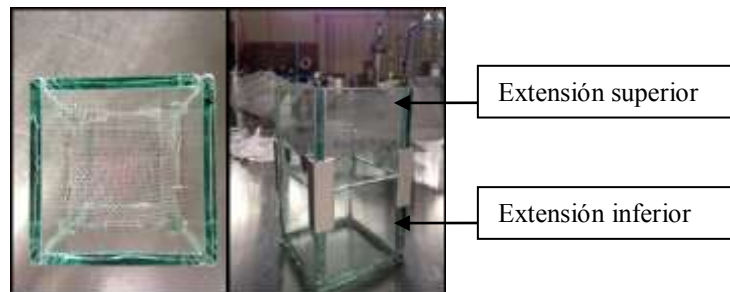


Figura 6. Caja para medir densidad  
aireada y compacta



### 1. Ilustración del método para realizar la medición de densidad aireada

Figura 8. Incorporación de ceniza en  
extensión inferior



Figura 7. Eliminación de sólido excedente en  
extensión inferior



## D. MEZCLA DE CENIZA VOLÁTIL CON DICLOROMETANO CON UN FACTOR DE MULTIPLICACIÓN DE 30 RESPECTO AL PUNTO DE SATURACIÓN DEL ACTIVADOR

Figura 9. Mezcla de ceniza y diclorometano con un factor de multiplicación de 30 respecto al punto de saturación de solubilidad del activador en el diclorometano



## E. PROPIEDADES DE CENIZAS ENCONTRADAS EXPERIMENTALMENTE

Tabla 27. Propiedades de cenizas encontradas experimentalmente

Propiedad	Valor
Densidad aireada (g/mL $\pm$ 0.02)	1.92
Densidad compactada (g/mL $\pm$ 0.03)	2.11
Densidad de trabajo (g/mL $\pm$ 0.05)	1.94
Compresibilidad (%)	8.78
Humedad (%m/m $\pm$ <b>0.789</b> * $10^{-5}$ )	0.263

\*Datos obtenidos experimentalmente

## F. PROPIEDADES DE CENIZAS ENCONTRADAS EN LA LITERATURA

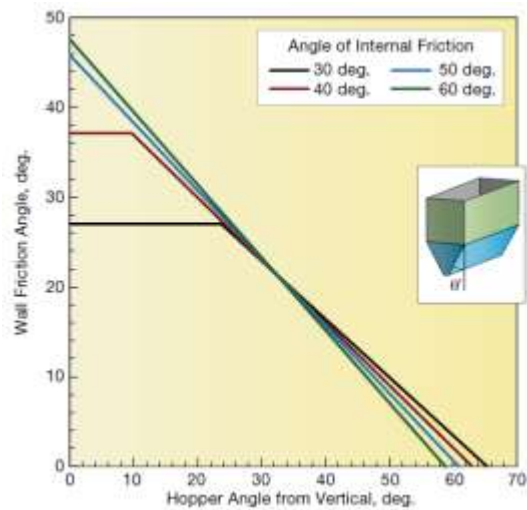
Tabla 28. Propiedades de ceniza encontradas en la literatura

Propiedad	Valor
Capacidad calorífica (J/ kg K)	0.8

(Sear, 2001)

## G. GRÁFICA PARA ENCONTRAR ÁNGULO DE TOLVA DE MEZCLADOR

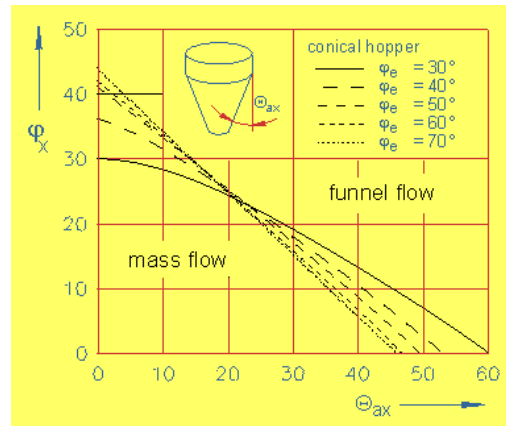
Figura 10. Gráfica para obtener ángulo de tolva tipo plana de cuña empleada para diseñar tolva de mezclador



(Maynard, 2013)

## H. GRÁFICA PARA ENCONTRAR ÁNGULO DE TOLVA DE SILO

Figura 11. Gráfica para obtener ángulo de tolva cónica empleada para diseñar tolva de silo de ceniza volante



## I. CLASIFICACIÓN DE CENIZA PARA SU DOSIFICACIÓN CON TORNILLO SIN FIN

Peso medio por pie cúbico de la ceniza volante (kg): 77-99 (35-45 lb)

Categoría de capacidad: 30B

Factor H.P.: 3.5

Serie de componentes: C4

Categoría de abrasividad: Altamente corrosivo

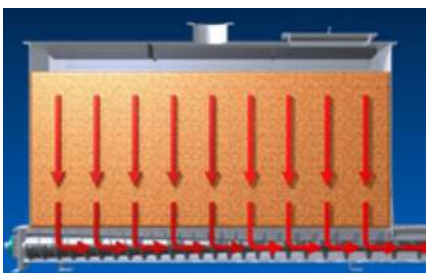
Categoría de corrosividad: No corrosivo

Categoría de fluidez: Fluye fácilmente

(KWS, 2015c)

## J. TIPO DE FLUJO EN EL ALIMENTADOR DE SALIDA DEL SILO DE CENIZA

Figura 12. Tornillo de flujo másico



## K. TIPO DE IMPULSOR A USAR EN EL TANQUE DE AGITACIÓN

Figura 13. Impulsor tipo hidroala para flujo laminar



(White Mountain Process, 2016)

## L. TIPO DE MEZCLADOR USADO

Figura 14. Mezclador tipo listón (hélice y “ribbon”)



## M. NOMOGRAMAS EMPLEADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE POTENCIA DE LOS SISTEMAS NEUMÁTICOS

Figura 15. Nomograma No. 1 para determinación de potencia de sistema neumático.

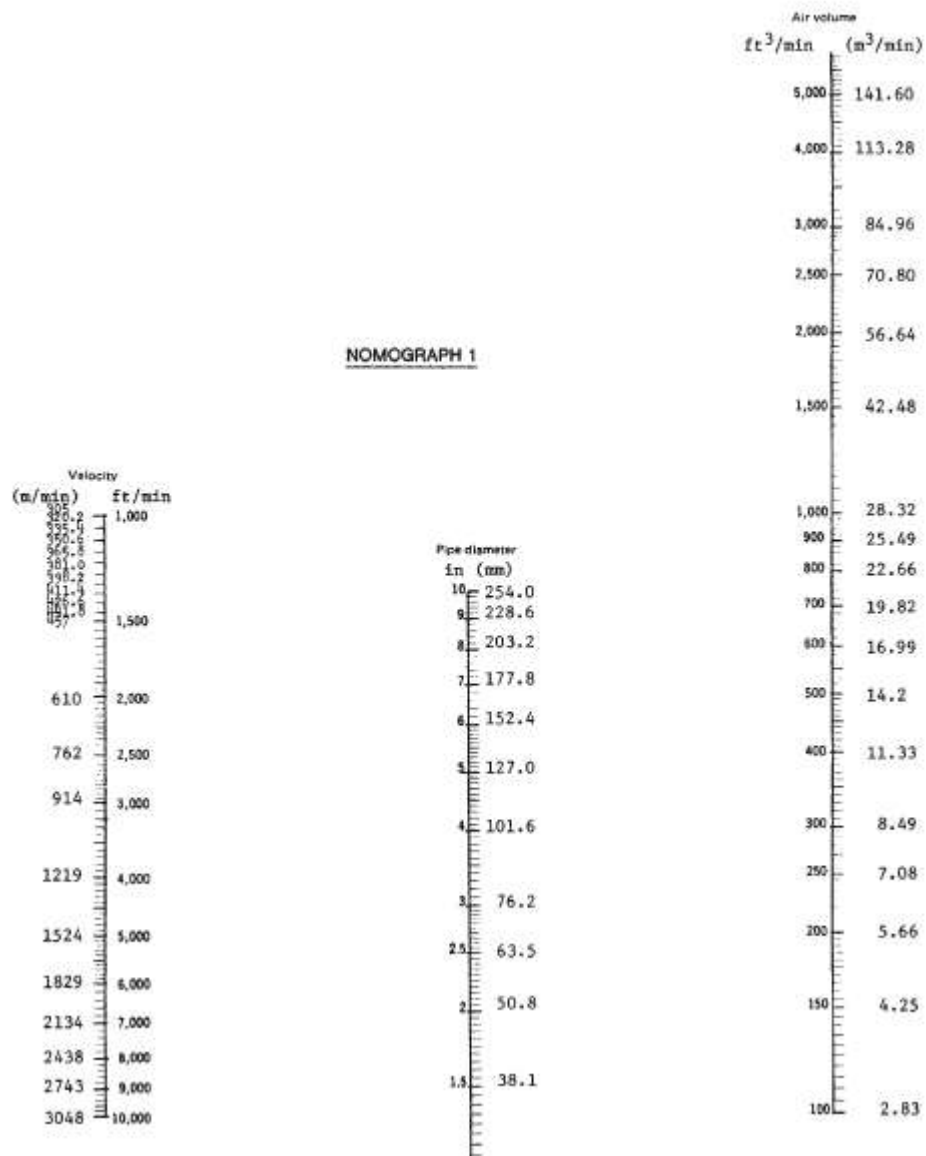


Figura 16. Nomograma No. 2 para determinación de potencia de sistema neumático.

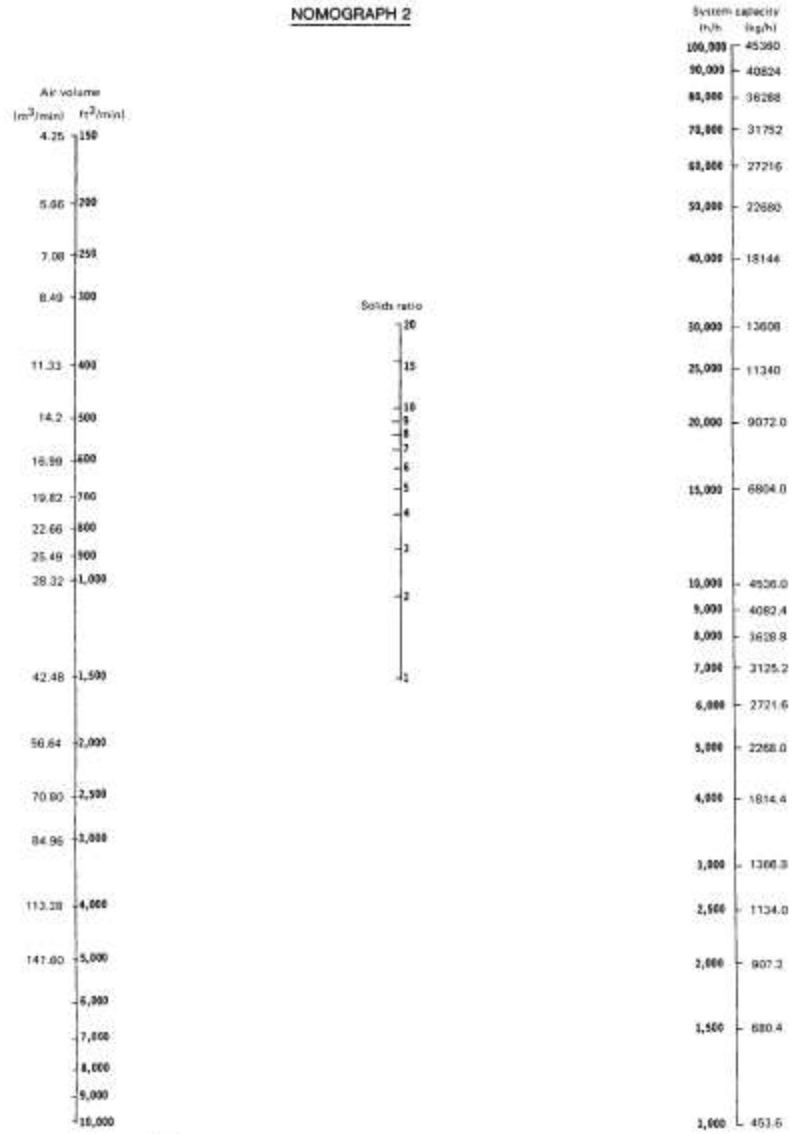


FIG. 21-13 (Continued)

Figura 17. Nomograma No. 3 para determinación de potencia de sistema neumático.

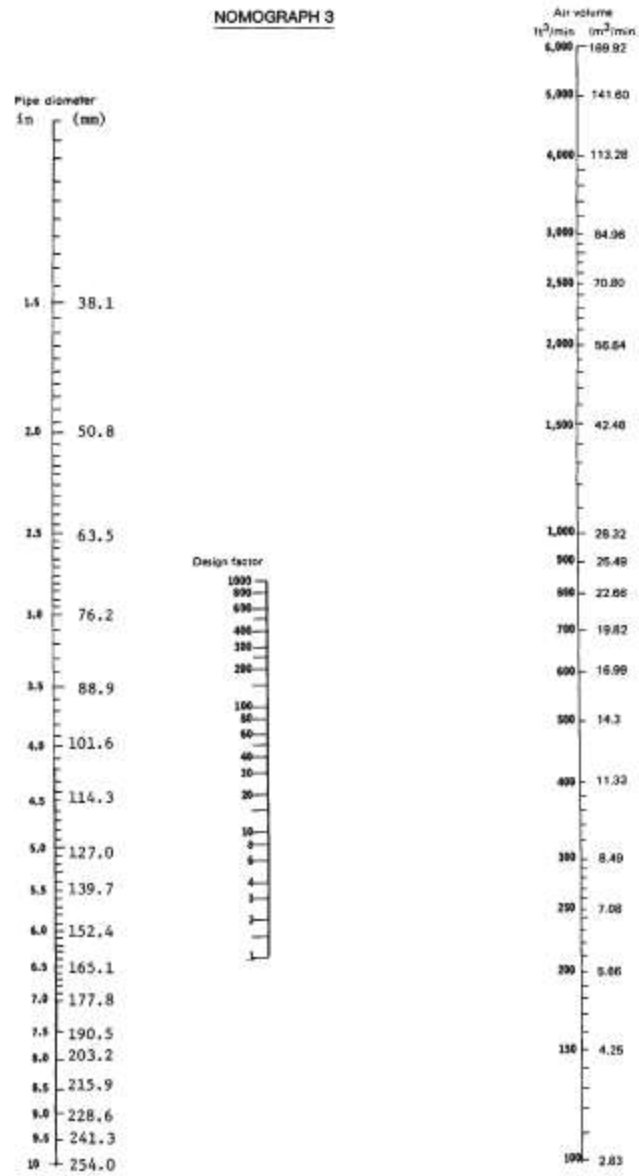


FIG. 21-13 (Continued)

Figura 18. Nomograma No. 4 para determinación de potencia de sistema neumático.

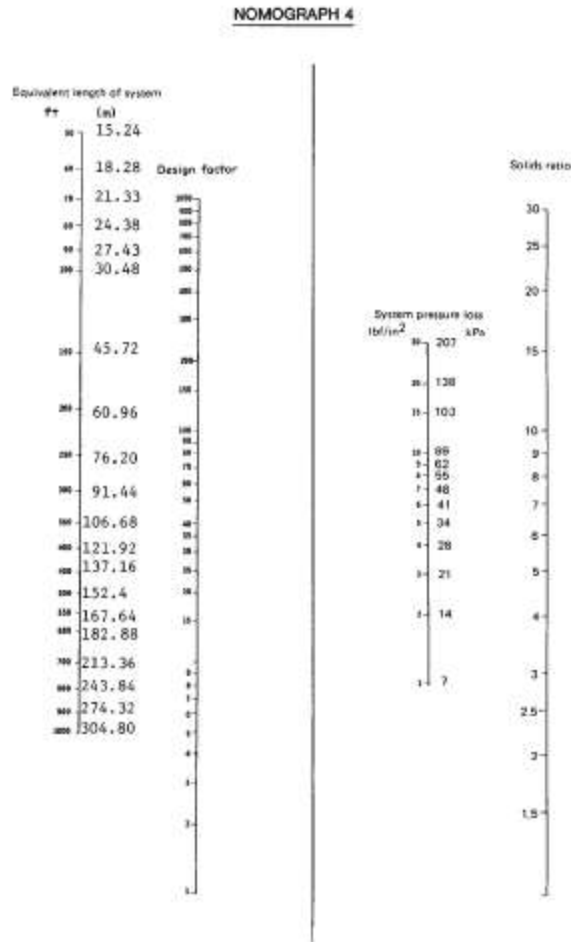


FIG. 21-13 (Continued)

Figura 19. Nomograma No. 5 para determinación de potencia de sistema neumático.

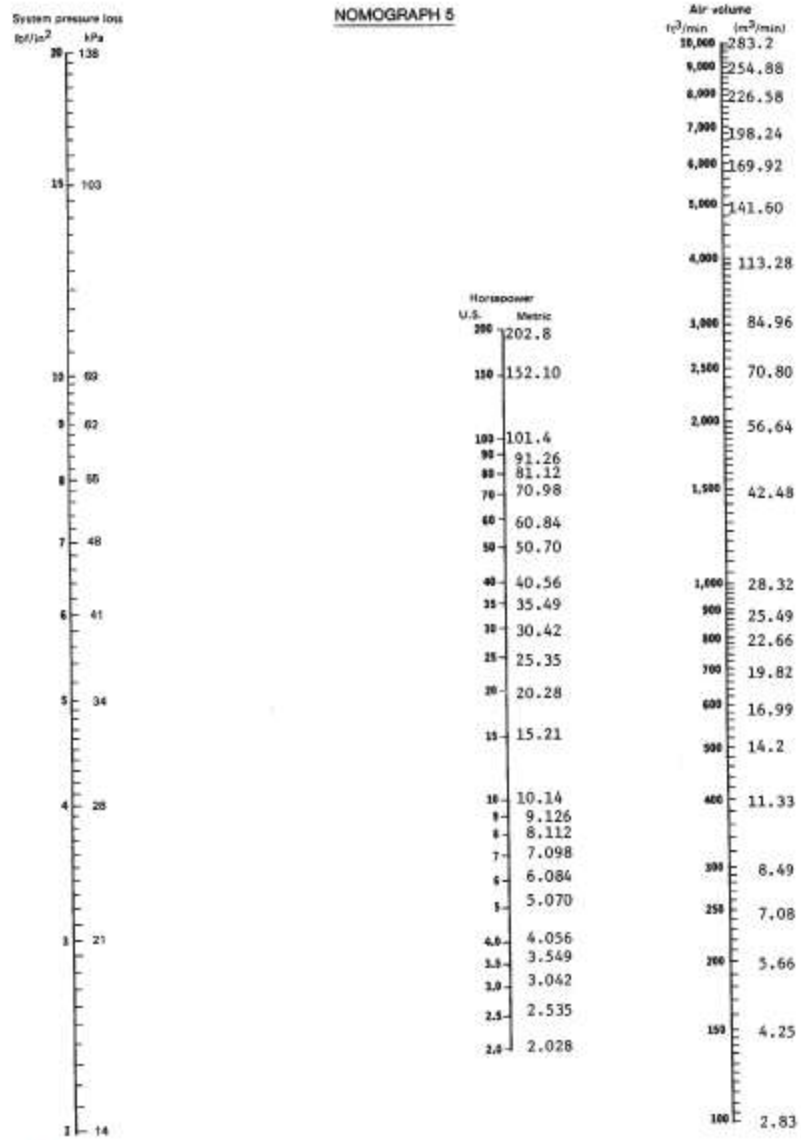


FIG. 21-13 (Continued)

## N. EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDIR PROPIEDADES DE LA CENIZA VOLANTE

1. Balanza analítica para medir densidad (aireada y compacta) y humedad

Marca: OHAUS

Modelo: Pioneer

Capacidad (g): 110

Sensibilidad (g): 0.0001

Repetibilidad (mg): 0.1

2. Mufla empleado para medir humedad en ceniza

Marca: Blue M

Tipo: Stabil-Therm Gravity Oven

Modelo: OV-18A

Rango de temperatura: 38 -288°C

3. Horno empleado para medir humedad en ceniza

Marca: Barnstead International

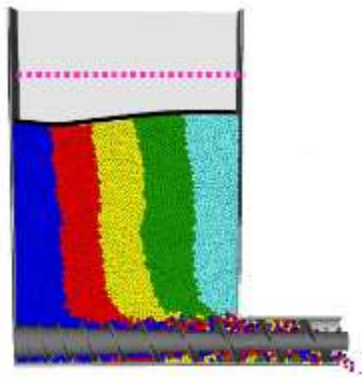
Tipo: 48000

Modelo: F48055

Rango de temperatura: 1093°C (manera continua)

## O. ALIMENTADORES DE TORNILLOS DEL ESTUDIO DE (FERNANDEZ, CLEARY, & MCBRIDE, 2009)

Figura 20. Simulación de patrón de flujo másico de alimentador de salida de tornillo F del estudio de (Fernandez *et al.*, 2009).



El tornillo F fue el destacado de los 6 tornillos estudiados, en descarga homogénea y potencia consumida en relación a su eficiencia de obtener un flujo másico, ver Figura 21 y Figura 22 (Fernandez *et al.*, 2009).

Figura 21. Tasas de flujos másicos de diferentes columnas coloreadas de partículas en una tolva, medidas en la salida de la tolva luego de 30 segundos.

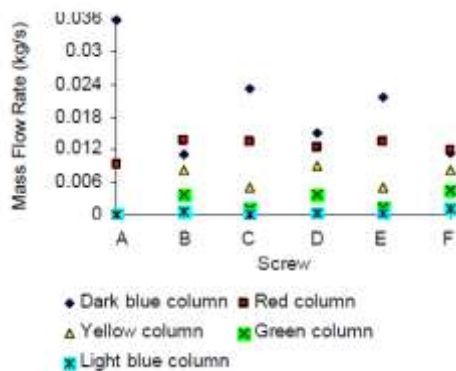


Figura 22. Consumo de potencia total, de corte y normal.

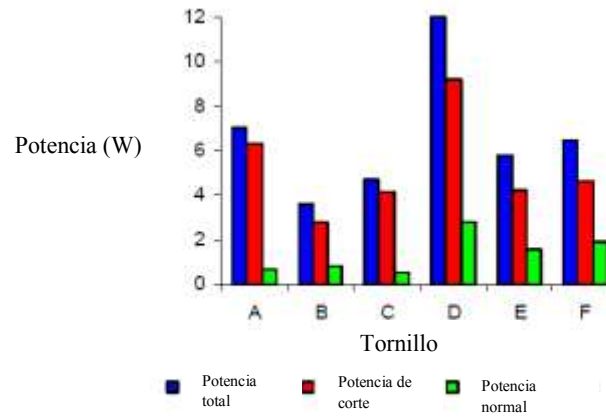


Figura 23. Propiedades geométricas de los diseños de los seis tornillos.

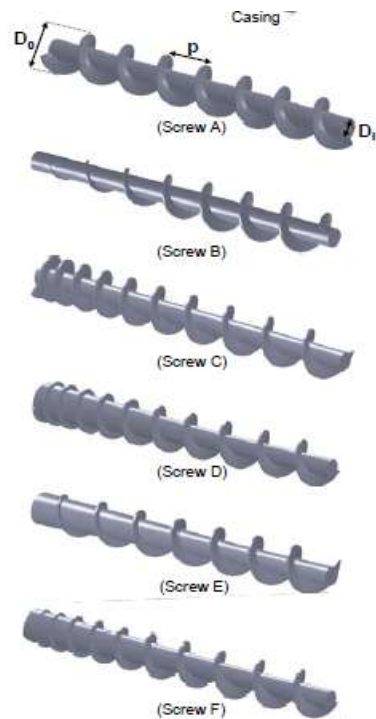
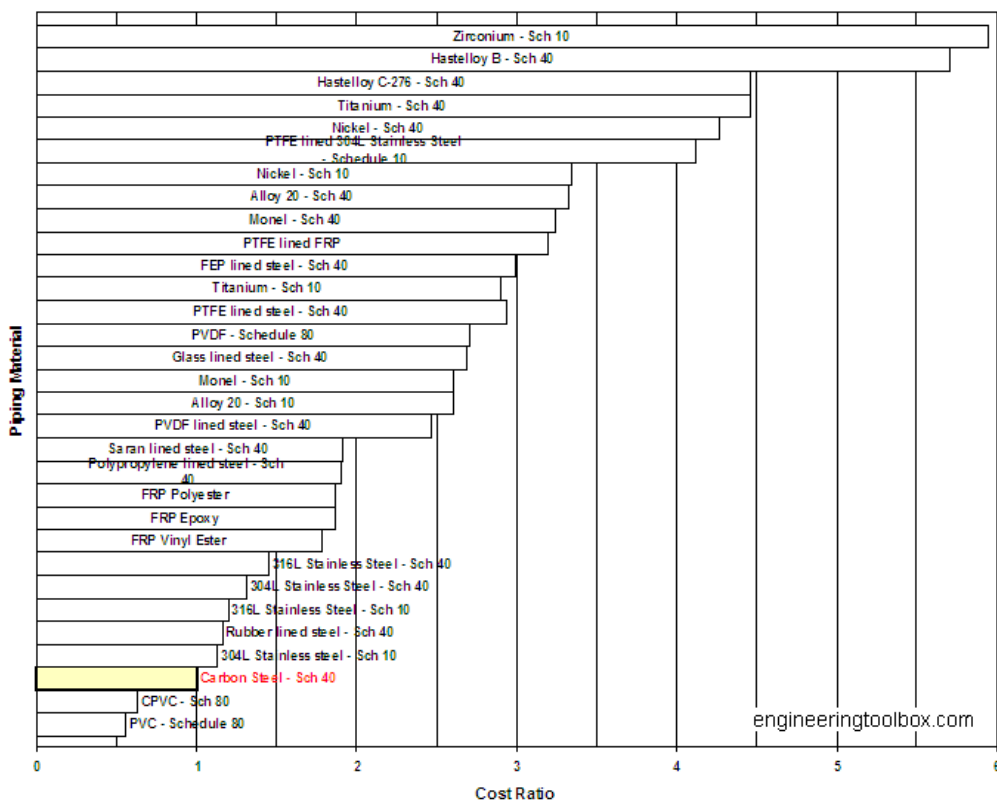


Tabla 29. Propiedades geométricas de los diseños de los seis tornillos del trabajo de Fernández, 2009.

Tornillo	Diámetro externo de hélice	Diámetro de eje (mm)	Paso (mm)
A	52.5	22.5	52.5
B	22.5-52.5	22.5	52.5
C	52.5	22.5	12-52.5
D	52.5	45-22.5	12-52.5
E	37.5-52.5	37.5-22.5	52.5
F	37.5-52.5	37.5-22.5	12-52.5

## P. RELACIONES DE COSTOS DE MATERIALES DE RECUBRIMIENTO

Figura 24. Relaciones de costos de algunos materiales comunes para recubrir.



(«Piping Materials Cost Ratios», s. f.)



### XIII. GLOSARIO

Cocombustión: Uso combinado de dos combustibles en una central de generación eléctrica

Flujo másico: El término flujo másico describe un patrón de flujo en el cual todo el material baja a la misma tasa, independientemente de la posición en la que se encuentre.

Inertización: Una técnica en la cual una mezcla de un combustible se convierte en no inflamable agregando un gas inerte o un polvo no combustible.

Número de flujo: Es una medida de la velocidad volumétrica de flujo de un impeler.

Número de potencia: Es una medida que se usa para calcular la potencia consumida por el impulsor.

Protección contra exposiciones: Protección contra el fuego para estructuras en propiedades adyacentes al área de almacenaje de un líquido proporcionada por bomberos públicos o una brigada privada establecida en una parte adyacente al área de almacenaje del líquido.

Puzolana: Materia finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice- alúmina) capaces, a la temperatura ordinaria, de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas.

Velocidad volumétrica de flujo: cantidad de líquido abandonando la región del rotor del impulsor.



## XIV. SIGLAS

CAA	Clean Air Act
CAMR	Clean Air Mercury Rule
DOE	Department of Energy
EPA	Environmental Protection Agency
ICC	International Code Council
MATS	Mercury and Air Toxics Standards
NEI	National Emissions Inventory
NESCAUM	Northeast States for Coordinated Air Use Management
NFPA	National Fire Protection Association
NHANES	National Health and Nutrition Examination Survey
UNEP	United Nations Environment Programme