

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL
PARTICULADO GENERADO EN EL MOLINO DE MARTILLOS DE
LA EMPRESA TERRAFORTE**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

ANA MARÍA ALVAREZ CAIZA

any_marie6@hotmail.com

DIRECTORA: ING. LUCÍA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS

lucia.montenegro@epn.edu.ec

Quito, abril 2014

© Escuela Politécnica Nacional (2014)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Ana María Álvarez Caiza, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ana María Álvarez Caiza

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por, Ana María Alvarez Caiza, bajo mi supervisión.

Ing. Lucía Montenegro
DIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto de Titulación primeramente se lo agradezco a Dios por bendecirme en esta etapa de mi vida y por haberme dado la oportunidad de llegar a este punto tan importante de mi formación profesional.

A mi madre, por ser el pilar más importante en mi formación y por demostrarme todo su cariño y apoyo incondicional.

A mis hermanos, Marcia y Diego por ayudarme y apoyarme incondicionalmente.

A mis compañeros de clases quienes me acompañaron en esta trayectoria de aprendizaje y conocimientos.

A mi grupo de control Adry a Carlitos por ser unos buenos amigos, gracias por todo el apoyo, comprensión y sobre todo su amistad.

A todo el personal de la Empresa Terraforte, ya que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme.

A la Ing. Lucía Montenegro por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de la Tesis.

DEDICATORIA

A Dios que me dio la oportunidad de vivir y regalarme una familia maravillosa.

A mis padres por su apoyo, consejos, comprensión y amor, y por apoyarme con los recursos necesarios para estudiar.

A mis hermanos quienes en todo momento han sido un apoyo fundamental para lograr mis metas.

A todos mis amigos, muchas gracias por ser estar conmigo y compartir cosas buenas y malas en todo este tiempo, gracias por ser mis amigos y recuerden que siempre los llevaré en mi corazón.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | PÁGINA |
|---|------------|
| RESUMEN | xii |
| INTRODUCCIÓN | xiv |
| 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 1 |
| 1.1. Descripción de las instalaciones de la empresa Terraforte | 1 |
| 1.1.1. Trituración de la arcilla | 2 |
| 1.1.2. Molienda de la arcilla | 3 |
| 1.1.3. Mezclado de arcilla y agua | 4 |
| 1.1.4. Extrusión y moldeado de la mezcla de arcilla | 4 |
| 1.1.5. Secado y cocción de las fachaletas y ladrillos | 5 |
| 1.1.6. Despacho de material | 5 |
| 1.2. Contaminación atmosférica por material particulado | 6 |
| 1.2.1. Clasificación del material particulado | 6 |
| 1.2.1.1. Partículas gruesas (PM ₁₀) | 7 |
| 1.2.1.2. Partículas finas (PM _{2,5}) | 8 |
| 1.2.2. Clasificación de las fuentes de emisión de partículas | 8 |
| 1.2.2.1. Fuentes naturales de material particulado | 8 |
| 1.2.2.2. Fuentes antropogénicas de material particulado | 9 |
| 1.2.3. Efectos del material particulado | 10 |
| 1.2.3.1. Reducción de la visibilidad | 10 |
| 1.2.3.2. Efectos a la salud | 11 |
| 1.3. Dispositivos de control de material particulado | 13 |
| 1.3.1. Mecanismos de colección de las partículas | 13 |
| 1.3.2. Equipos de control de material particulado | 16 |
| 1.3.2.1. Colectores húmedos | 16 |
| 1.3.2.2. Mecanismo de colección húmeda | 21 |
| 1.3.3. Equipos auxiliares | 23 |
| 1.3.3.1. Tipos de extractores | 23 |
| 1.3.3.2. Sistema de aspersion | 24 |
| 1.3.3.3. Sedimentadores | 25 |
| 1.4. Normativa ambiental vigente en el Distrito Metropolitano de Quito | 27 |
| 2. PARTE EXPERIMENTAL | 30 |
| 2.1. Determinación de la concentración de material particulado generado en el molino de martillos | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 2.1.1. Determinación del material particulado procedente del molino de martillos | 30 |
| 2.1.2. Recolección y medición de partículas de polvo sedimentables | 31 |
| 2.1.3. Determinación de las partículas solubles e insolubles | 31 |
| 2.1.3.1. Determinación del material insoluble de partículas de polvo sedimentables | 31 |
| 2.1.3.2. Determinación del material soluble de partículas de polvo sedimentables | 32 |
| 2.2. Caracterización del material particulado de las emisiones del molino de martillos y del aire ambiente interno y externo a la planta de terraforte | 33 |
| 2.2.1. Determinación del tamaño de partícula | 33 |
| 2.2.1.1. Análisis granulométrico en húmedo | 33 |
| 2.2.1.2. Determinación del tamaño de partícula por dispersión dinámica de luz (DLS) | 34 |
| 2.2.2. Determinación de la densidad del material particulado | 34 |
| 2.2.3. Determinación de la humedad de la arcilla | 35 |
| 2.3. Diseño del sistema de control para material particulado | 36 |
| 2.3.1. Selección del extractor | 36 |
| 2.3.1.1. Tipo de extractor | 36 |
| 2.3.1.2. Pérdidas de carga | 36 |
| 2.3.1.3. Cálculo de la potencia mínima requerida del extractor | 38 |
| 2.3.2. Diseño del lavador de placas de choque húmedas | 38 |
| 2.3.3. Sistema de bombeo | 40 |
| 2.4. Determinación de la dosificación de lodos en el proceso productivo | 43 |
| 2.5. Estimación de los costos del sistema de control para material particulado | 43 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 45 |
| 3.1. Determinación de la concentración de material particulado generado en el molino de martillos | 45 |
| 3.1.1. Determinación del material particulado procedente del molino de martillos | 45 |
| 3.1.2. Recolección y medición de partículas de polvo sedimentables | 45 |
| 3.2. Caracterización del material particulado | 48 |
| 3.2.1. Determinación del tamaño de partícula | 48 |
| 3.2.2. Determinación de la densidad | 51 |
| 3.2.3. Determinación de la humedad | 52 |
| 3.2.3.1. Humedad de la muestra a la salida del molino | 52 |
| 3.2.3.2. Humedad de la pasta | 53 |

| | |
|---|------------|
| 3.3. Diseño del sistema de control para material particulado | 54 |
| 3.3.1. Selección del extractor | 54 |
| 3.3.1.1. Tipo de extractor | 54 |
| 3.3.1.2. Pérdidas de carga | 55 |
| 3.3.1.3. Cálculo de la potencia del extractor | 58 |
| 3.3.2. Diseño del lavador de placas de choque húmedas | 59 |
| 3.3.3. Sistema de bombeo | 64 |
| 3.3.3.1. Diseño tanque de almacenamiento de agua | 65 |
| 3.3.3.2. Selección de la bomba | 68 |
| 3.3.4. Diseño del sedimentador | 73 |
| | |
| 3.4. Determinación de la dosificación de lodos en el proceso productivo | 84 |
| | |
| 3.5. Estimación de los costos del sistema de control para material particulado | 91 |
| 3.5.1. Costos de la implementación del sistema de control de material particulado | 91 |
| 3.5.2. Beneficios | 96 |
| | |
| 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 98 |
| | |
| 4.1. CONCLUSIONES | 98 |
| | |
| 4.2. RECOMENDACIONES | 99 |
| | |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 100 |
| | |
| ANEXOS | 109 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | PÁGINA |
|---------------------|--|--------|
| Tabla 1. 1. | Características del molino de martillos | 3 |
| Tabla 1. 2. | Aplicaciones de extractores axiales y centrífugos | 24 |
| Tabla 1. 3. | Aplicaciones de los aspersores | 25 |
| Tabla 1. 4. | Límites máximos permisibles de emisiones al aire para la producción de cemento | 28 |
| Tabla 3. 1. | Resultados de la concentración de material particulado | 45 |
| Tabla 3. 2. | Resultados de la concentración de partículas sedimentables | 47 |
| Tabla 3. 3. | Resultados de la concentración de partículas sedimentables en base al área de los puntos de muestreo de la Empresa Terraforte | 48 |
| Tabla 3. 4. | Resultados del primer ensayo del análisis granulométrico de la muestra a la salida del ducto proveniente del molino de martillos | 49 |
| Tabla 3. 5. | Resultados del segundo ensayo del análisis granulométrico de la muestra a la salida del ducto | 50 |
| Tabla 3. 6. | Tamaño de partícula por dispersión de luz láser | 51 |
| Tabla 3. 7. | Resultados obtenidos del análisis de la densidad de la muestra a la salida del ducto | 51 |
| Tabla 3. 8. | Resultados del ensayo de humedad de la muestra a la entrada del molino | 52 |
| Tabla 3. 9. | Resultados del ensayo de humedad de la pasta | 53 |
| Tabla 3. 10. | Pérdidas de los codos en el ducto | 56 |
| Tabla 3. 11. | Parámetros del extractor centrífugo | 59 |
| Tabla 3. 12. | Especificaciones de los aspersores usados en el lavador de placas de choque húmedas | 61 |
| Tabla 3. 13. | Determinación de la longitud del lavador de placas de choque húmedas mediante el caudal | 62 |
| Tabla 3. 14. | Dimensiones del lavador de placas de choque húmedas | 63 |

| | | |
|-----------------------|--|-----|
| Tabla 3. 15. | Dimensiones de la tolva del lavador de placas de choque húmedas | 64 |
| Tabla 3. 16. | Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua | 68 |
| Tabla 3. 17. | Pérdidas de carga en los accesorios a través de la tubería | 70 |
| Tabla 3. 18. | Características de la bomba centrífuga | 73 |
| Tabla 3. 19. | Dimensiones del tanque de almacenamiento de lodos | 78 |
| Tabla 3. 20. | Resultados del balance de masa en el molino | 85 |
| Tabla 3. 21. | Resultados del balance de masa en el lavador de placas de choque húmedas | 86 |
| Tabla 3. 22. | Resultados balance sistema global | 87 |
| Tabla 3. 23. | Tiempo requerido para la evaporación de los lodos | 90 |
| Tabla 3. 24. | Dimensiones del lecho de secado | 91 |
| Tabla 3. 25. | Costos del lavador de placas de choque húmedas y tolva | 92 |
| Tabla 3. 26. | Costos del tanque de almacenamiento de agua y lodos | 92 |
| Tabla 3. 27. | Costos de los equipos auxiliares | 93 |
| Tabla 3. 28. | Costo de los accesorios y tuberías | 93 |
| Tabla 3. 29. | Costos construcción lecho de lodos | 94 |
| Tabla 3. 30. | Costo total de los equipos, accesorios y tuberías del sistema de control para material particulado | 94 |
| Tabla 3. 31. | Costos de los servicios básicos empleados en el sistema de control para material particulado | 95 |
| Tabla 3. 32. | Costos mano de obra para la construcción del sistema de control para material particulado | 95 |
| Tabla 3. 33. | Beneficios de implementar el sistema de control para material particulado | 96 |
| Tabla AX. 1. | Tamaño de la gota de los aspersores según la presión | 123 |
| Tabla AXII. 1. | Resistencia al estrés de diferentes materiales | 125 |

| | |
|---|-----|
| Tabla AXVI. 1. Datos de las tuberías en el sistema del tanque de almacenamiento de agua y aspersores | 129 |
| Tabla AXVIII. 1. Pérdidas de carga en los accesorios a través de la tubería | 131 |
| Tabla AXVIII. 2. Datos de las tuberías en el sistema de la tolva y tanque de lodos | 133 |
| Tabla AXIX. 1. Resultados de la concentración de material particulado | 136 |
| Tabla AXIX. 2. Condiciones corregidas de la concentración de material particulado | 136 |
| Tabla AXXII. 1. Potencia requerida por las bombas y extractor | 144 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | PÁGINA |
|----------------------|---|--------|
| Figura 1. 1. | Ubicación de la Empresa Terraforte | 1 |
| Figura 1. 2. | Proceso de Producción de fachaletas en la Empresa Terraforte | 2 |
| Figura 1. 3. | Sistema de evacuación del material particulado | 4 |
| Figura 1. 4. | Proceso de moldeado de la pasta de arcilla | 5 |
| Figura 1. 5. | Distribución de tamaños de partículas atmosféricas | 7 |
| Figura 1. 6. | Distribución en porcentajes por tamaño medio del PM ₁₀ durante el período 2007-2012 | 11 |
| Figura 1. 7. | Lugares de asentamiento del material particulado en el tracto respiratorio | 13 |
| Figura 1. 8. | Mecanismos sencillos para la eliminación mecánica de las partículas: | 14 |
| Figura 1. 9. | Torre de aspersion ciclónica | 18 |
| Figura 1. 10. | Torre de aspersion en contracorriente | 19 |
| Figura 1. 11. | Lavador de placas de choque húmedas | 20 |
| Figura 2. 1. | Puerto de muestreo y puntos de muestreo | 30 |
| Figura 2. 2. | Puntos analizados en el sistema del tanque de almacenamiento de agua y aspersores | 41 |
| Figura 2. 3. | Diagrama para el balance de masa | 43 |
| Figura 3. 1. | Puntos de muestreo en la Empresa Terraforte para la medición de partículas de polvo sedimentables | 46 |
| Figura 3. 2. | Análisis granulométrico del primer ensayo de la muestra a la salida del ducto | 49 |
| Figura 3. 3. | Análisis granulométrico del segundo ensayo de la muestra a la salida del ducto | 50 |
| Figura 3. 4. | Ducto de evacuación de material particulado | 54 |
| Figura 3. 5. | Pérdida de carga en la campana | 55 |

| | | |
|-------------------------|---|-----|
| Figura 3. 6. | Diagrama de Moody utilizado para determinar el factor de fricción en el ducto | 58 |
| Figura 3. 7. | Diseño lavador de placas de choque húmedas | 64 |
| Figura 3. 8. | Altura de bomba | 72 |
| Figura 3. 9. | Tanque de almacenamiento de agua y tanque de almacenamiento de lodos | 79 |
| Figura 3. 10. | Puntos analizados en el sistema del colector húmedo y tanque de almacenamiento de lodos | 80 |
| Figura 3. 11. | Altura de bomba vs. caudal para el sistema tolva-tanque de almacenamiento de lodos | 82 |
| Figura 3. 12. | Sistema de control de material particulado | 83 |
| Figura 3. 13. | Balance de masa en el molino | 84 |
| Figura 3. 14. | Balance de masa en el lavador de placas de choque húmedas | 85 |
| Figura 3. 15. | Diagrama de dosificación de lodos al proceso existente | 86 |
| Figura 3. 16. | Nuevo sistema de dosificación de lodos con la corriente del lecho de lodos | 88 |
| Figura AI. 1. | Esquema para la recolección de partículas sedimentables | 110 |
| Figura AV. 1. | Resultados del tamaño de partícula por dispersión de luz láser | 116 |
| Figura AVI. 1. | Resultados de los gases de combustión por el Método EPA 5 | 117 |
| Figura AVIII. 1. | Especificaciones del extractor centrífugo de aspas radiales | 119 |
| Figura AVIII. 2. | Dimensiones del extractor centrífugo de aspas radiales | 120 |
| Figura AXI. 1. | Especificaciones de los aspersores | 124 |
| Figura AXIII. 1. | Detalle de uniones para tapas planas | 126 |
| Figura AXIV. 1. | Tipos de juntas soldadas | 127 |
| Figura AXII. 1. | Curva de la bomba del sistema tanque de almacenamiento de agua y aspersores | 129 |
| Figura AXV. 1. | Corrientes para el balance de masa en el molino | 134 |

| | | |
|------------------------|---|-----|
| Figura AXVI. 1. | Curva de la bomba del sistema tanque de almacenamiento de agua y aspersores | 129 |
| Figura AXIX. 1. | Corrientes para el balance de masa en el molino | 134 |
| Figura AXIX. 2. | Corrientes para el balance de masa en el molino | 135 |
| Figura AXIX. 3. | Corrientes para la dosificación de lodos al proceso | 137 |
| Figura AXX. 1. | Proforma del extractor centrífugo de aspas radiales | 139 |
| Figura AXX. 2. | Proforma de los aspersores y filtro | 140 |
| Figura AXX. 3. | Proforma de la bomba neumática | 141 |
| Figura AXX. 4. | Proforma de los accesorios del sistema de bombeo | 142 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | PÁGINA |
|---|---------------|
| ANEXO I Procedimiento para la recolección de las partículas solubles e insolubles | 110 |
| ANEXO II Análisis granulométrico en húmedo del material fino | 112 |
| ANEXO III Ensayo para de la determinación de la densidad del material particulado | 114 |
| ANEXO IV Ensayo para la determinación de la humedad de la arcilla | 115 |
| ANEXO V Resultados del tamaño de partícula por dispersión de luz láser | 116 |
| ANEXO VI Resultados del monitoreo de emisiones de combustión | 117 |
| ANEXO VII Cálculo de la velocidad en el ducto | 118 |
| ANEXO VIII Especificaciones del extractor centrífugo | 119 |
| ANEXO IX Cálculo del factor de corrección de Cunningham | 121 |
| ANEXO X Tamaños de gotas proporcionadas por los aspersores | 123 |
| ANEXO XI Especificaciones de los aspersores | 124 |
| ANEXO XII Resistencia al estrés | 125 |
| ANEXO XIII Detalle de uniones para tapas planas | 126 |
| ANEXO XIV Eficiencia de la junta | 127 |
| ANEXO XV Cálculo del número de Reynolds para la tubería de succión y descarga | 128 |

| | |
|--|-----|
| ANEXO XVI | 129 |
| Altura de bomba entre el tanque de almacenamiento de agua y aspersores | |
| ANEXO XVII | 130 |
| Especificaciones de la bomba centrífuga | |
| ANEXO XVIII | 131 |
| Altura de bomba entre la tolva y tanque de almacenamiento de lodos | |
| ANEXO XIX | 134 |
| Balance de masa para la dosificación de lodos | |
| ANEXO XX | 139 |
| Cotizaciones de los equipos auxiliares para el sistema de control para material particulado | |
| ANEXO XXI | 143 |
| Cálculo del precio de la bomba centrífuga | |
| ANEXO XXII | 144 |
| Determinación de los costos de agua y energía eléctrica para el sistema de control para material particulado | |

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se realizó el diseño de un sistema de control para material particulado en el molino de la Empresa Terraforte para poder cumplir con la normativa ambiental de emisiones al aire vigente en el Distrito Metropolitano de Quito, además de mejorar la calidad del medio ambiente.

En la etapa inicial del proyecto se determinó la concentración total de material particulado emitido por el molino mediante dos métodos. Con el primero se determinó una concentración de $648,20 \text{ mg/m}^3$, incumpléndose con la norma referida en el Anexo 3 en el Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental, mediante el segundo, se cuantificó el material particulado sedimentable en el aire ambiente en cuatro puntos, observándose que se excedió en 2 de ellos, en el área externa y área de molienda se determinó una concentración de $6,33 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ y $3,03 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ respectivamente, ambas concentraciones excedieron el valor norma de $1,00 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ al establecido en el Anexo 4 del Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental.

Para determinar las características del material particulado a tratarse, se realizó una caracterización donde se determinó el tamaño de partícula obteniéndose $1,06 \text{ }\mu\text{m}$ y la densidad fue de $2,62 \text{ g/cm}^3$, datos que se usaron posteriormente para el diseño del colector húmedo. Además se determinó la humedad de la arcilla, a la entrada y salida del molino de $7,13 \%$ y $15,21 \%$ respectivamente, resultados que se usaron para determinar la recirculación de lodos al proceso productivo.

Se estableció que el método de tratamiento más adecuado es un colector húmedo, específicamente el lavador de placas de choque húmedas, porque no se generarán desechos en el proceso, ya que los lodos reingresarán a producción y además el tamaño de partícula se encuentra dentro del rango de $0,1$ y $20 \text{ }\mu\text{m}$. Después de realizar el diseño, se concluyó que es necesario un lavador de $1,7 \text{ m}$ de largo, $0,6 \text{ m}$ de ancho y $0,6 \text{ m}$ de alto, con lo que se prevé disminuir la

concentración de material particulado en un 90 %, alcanzando un valor de 64,81 mg/m³, que se encuentra dentro de norma.

Para determinar la dosificación de lodos de retorno al proceso, se realizó un balance de masa entre el molino y el lavador de placas de choque húmedas, observándose que la adición de lodos alteraba el proceso, ya que actualmente se tiene una humedad de 15,21 %, mientras que en el segundo caso, al implementar el lavador de placas de choque húmedas la humedad subiría a 36,84 %. Razón por la cual se debe desviar el 70,00 % de agua proveniente del lavador de placas de choque húmedas a un lecho de secado de lodos y el resto se agregaría a la siguiente etapa del proceso para obtener 16,00 % de humedad, valor establecido en el rango que maneja la Empresa Terraforte.

Se concluyó que si bien el proyecto no es financieramente rentable, si lo es en el aspecto medio ambiental, ya que con esta inversión se cumplirá con las normas del Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundario Libro VI Anexo 3 y 4.

INTRODUCCIÓN

Una actividad muy importante de las parroquias de San Antonio de Pichincha y Calacalí, donde el movimiento de material pétreo es constante es la producción de ladrillos, debido a que el mineral se somete a una reducción de tamaño, lo que provoca una elevada concentración de partículas en suspensión y sedimentables. (De la Rosa, 2008, p. 85)

En la Empresa Terraforte, ubicada en el sector de Calacalí no se ha realizado un monitoreo de la calidad del aire ambiente, por lo que no se cuenta con datos de la concentración de material particulado. Sin embargo, esta tendencia se puede observar con una evaluación de la calidad del aire de una zona donde fabrican ladrillos en la ciudad de Cochabamba en Bolivia. Según Gallegos (2006), al realizar esta evaluación en la zona de producción de ladrillos en Champa Rancho en la ciudad de Cochabamba, existe una gran diferencia entre el nivel de concentración promedio de PM_{10} en Champa Rancho con un valor de $124,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en Pacata Alta la zona residencial fue de $25,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La concentración en la zona industrial es 5 veces más alta ya que la primera zona es industrial en donde se usan hornos para la elaboración de ladrillos (p. 205)

La contaminación por material particulado en la Empresa Terraforte es evidente ya que la concentración emitida por el molino es $648,20 \text{ mg}/\text{m}^3$, excediendo el valor norma de $100 \text{ mg}/\text{m}^3$, además que la calidad del aire ambiente en dos áreas de la planta es baja, en el área externa y área de molienda se tiene una concentración de $6,33$ y $3,03 \text{ mg}/\text{cm}^2 \times 30 \text{ d}$ respectivamente, ambas superan el valor norma de $1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \times 30 \text{ d}$.

Para solucionar el problema antes mencionado, se diseñó un sistema de control para material particulado en el molino de martillos, cuyo equipo principal es un colector húmedo que separa las partículas de polvo del aire mediante gotas de agua proporcionadas por aspersores. La ventaja de este sistema es que no existe generación de residuos ya que el lodo será ingresado nuevamente a la siguiente etapa del proceso.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES DE LA EMPRESA TERRAFORTE

Ladrillera Terraforte es una empresa ecuatoriana ubicada en Calacalí (zona industrial de Quito), dedicada a la producción y comercialización de productos de arcilla para la construcción como: ladrillos, tejas, fachaletas entre otros, su ubicación se indica en la Figura 1.1.



Figura 1. 1. Ubicación de la Empresa Terraforte

Ladrillera Terraforte cuenta con 20 empleados en las diferentes áreas, es considerada una pequeña empresa debido a que se encuentra en el rango de 10 a 50 empleados. (Alvarez y CEPAL , 2009, p. 24).

El área ocupada por la empresa Terraforte es alrededor de 2 hectáreas, divididas en área administrativa y área de producción.

El área administrativa está formada por:

- Oficina de gerencia
- Oficina de contabilidad
- Oficina de ventas

El área de producción está formada por:

- Área de trituración
- Área de molienda
- Área de mezclado
- Área de extrusión y moldeo
- Área de despacho de material

En Terraforte se lleva a cabo una serie de procesos estandarizados para asegurar la calidad del producto, desde la elección del material arcilloso hasta el empaquetamiento final. La materia prima utilizada es fundamentalmente arcilla, constituida principalmente de sílice (51,76 %), alúmina (15,81 %) y cantidades pequeñas de óxidos, porcentajes manejados por la empresa Terraforte (Zapata, 2013, p.79).

A continuación se describe cada etapa del proceso de producción de la Empresa Terraforte, indicado en la Figura 1.2.

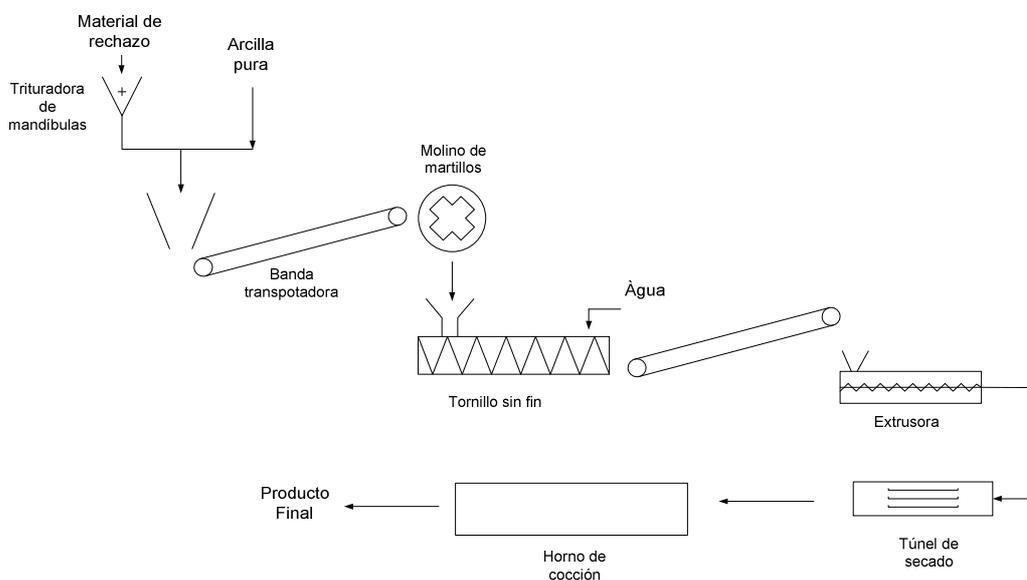


Figura 1. 2. Proceso de producción de fachaletas en la Empresa Terraforte

1.1.1. TRITURACIÓN DE LA ARCILLA

El material que no ha cumplido con los estándares de calidad del producto,

llamado material de rechazo, se procesa nuevamente en una trituradora de mandíbulas obteniendo arcilla de 1/2 pulgada de tamaño promedio de partícula. Acabado este proceso, el material de rechazo es mezclado con la arcilla pura proveniente de las minas en una proporción del 5 % de material de rechazo, valor fijado por la empresa.

1.1.2. MOLIENDA DE LA ARCILLA

Todo el material es colocado en una tolva y dirigido hacia el molino de martillos mediante una banda transportadora. En el molino, debido al impacto de los martillos, se genera material más fino que es evacuado mediante un ducto. Las características del molino se indican en la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1. Características del molino de martillos

| | |
|----------------------------|-------------------------|
| Material molido | Arcilla |
| Capacidad | 3,5 Ton/h |
| Tiempo de uso | 16 horas (Lunes-Sábado) |
| Número de martillos | 24 |
| Tipo de martillos | Fundidos 12-15% Cr |
| Tamaño de partícula | 87% en malla 80 |

Terraforte, 2013

Sistema de evacuación

Debido al impacto de los martillos, se genera material fino que se eleva e ingresa al ducto, por una campana de extracción colocada a la salida del molino, una parte de este material ingresa nuevamente al siguiente proceso con la ayuda de un hidrociclón y el resto es evacuado hacia el exterior de la fábrica mediante el ducto. El sistema de evacuación se indica en la Figura 1.3.



Figura 1. 3. Sistema de evacuación del material particulado

En el proyecto actual se pretende disminuir la concentración de material particulado emitido por el molino al medio ambiente mediante un colector húmedo.

1.1.3. MEZCLADO DE ARCILLA Y AGUA

Antes de la operación de moldeo, se realiza el mezclado donde se adiciona del 16-18% de agua, rango establecido en la Empresa Terraforte, para obtener la base del producto final. En este proceso se trata de dar a la arcilla la plasticidad suficiente, para que al pasar por la extrusora consiga y conserve la forma del molde perfectamente, después de la aplicación de la fuerza. Esta es una propiedad muy importante ya que define la ductilidad de los productos en la extrusión (Fenili, 2004, p. 2).

1.1.4. EXTRUSIÓN Y MOLDEADO DE LA MEZCLA DE ARCILLA

El moldeo consiste en hacer pasar la mezcla de arcilla a través de un molde al

final de la extrusora. Los moldes son de diferentes formas dependiendo del producto a fabricarse como ladrillos, fachaletas y tejas. Luego de la extrusión se obtiene un bloque continuo que pasa a través de un cortador para darle las dimensiones adecuadas dependiendo del producto, como se indica en la Figura 1.4. Terminado este proceso, los bloques se colocan en coches para ingresar al secado.

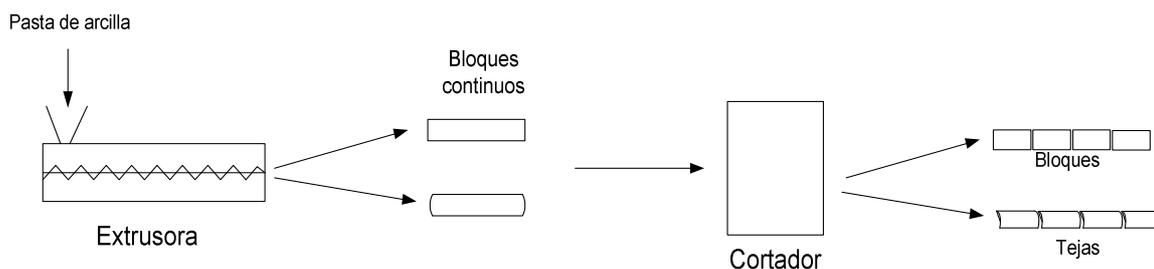


Figura 1. 4. Proceso de moldeado de la pasta de arcilla

1.1.5. SECADO Y COCCIÓN DE LAS FACHALETAS Y LADRILLOS

El secado es una de las fases más importantes en el proceso de producción, ya que de esta etapa depende la calidad del producto reflejada en la ausencia de fisuras. Los coches con los diferentes tipos de productos ingresan a un túnel donde son secados a una temperatura de 72 °C por 24 horas. El objetivo principal del secado es eliminar la cantidad de agua que fue agregada en la humidificación, para pasar a la etapa de cocción.

En la última etapa el material seco es colocado en vagonetas, para la cocción en el horno de producción continua de 85 m de longitud a una temperatura de cocción de 900 °C a 1000 °C por 38 horas. Una vez finalizado este proceso las vagonetas son llevadas por las vías de trabajo al área de descarga.

1.1.6. DESPACHO DE MATERIAL

El material es clasificado y sometido a una revisión manual por el personal,

realizando un control superficial en búsqueda de fisuras, grietas, roturas o similares, si las piezas se encuentran con fallas, son clasificadas como material de rechazo e ingresan nuevamente al proceso como materia prima; por el contrario si se encuentran en buen estado son colocadas en palets de madera que posteriormente serán envueltos en films de plástico para su posterior venta.

1.2. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO

Actualmente, el llamado “aire puro” ya no existe debido a que se puede apreciar una gran cantidad de partículas y gases en la atmósfera, que principalmente son emitidos por los combustibles de mala calidad e industrias. (Flores, 1997, p. 123).

La contaminación al aire se da por la presencia de sustancias nocivas en la atmósfera que están presentes un tiempo suficiente y en condiciones tales que afectan la salud y el confort de las personas o al medio ambiente (Flores, 1997, p. 129).

1.2.1. CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO

El material particulado es una mezcla de partículas sólidas finas y gotas líquidas suspendidas en el aire. Se presenta de dos formas: sólido en forma de polvo, ceniza u hollín; y líquido como aerosol o sólidos suspendidos en mezclas líquidas. Su tamaño varía de 0,1 a 100,0 μm , se divide en polvo fino (menor de 100 μm de diámetro), polvo grueso (mayor de 100 μm de diámetro), vapores (0,01-1,00 μm de diámetro) y neblinas (0,1-10,0 μm de diámetro). (Fierro, 2000, p. 2; Wark y Warner, 2002, p. 27) La distribución de tamaños de partícula se aprecia en la Figura 1.5.

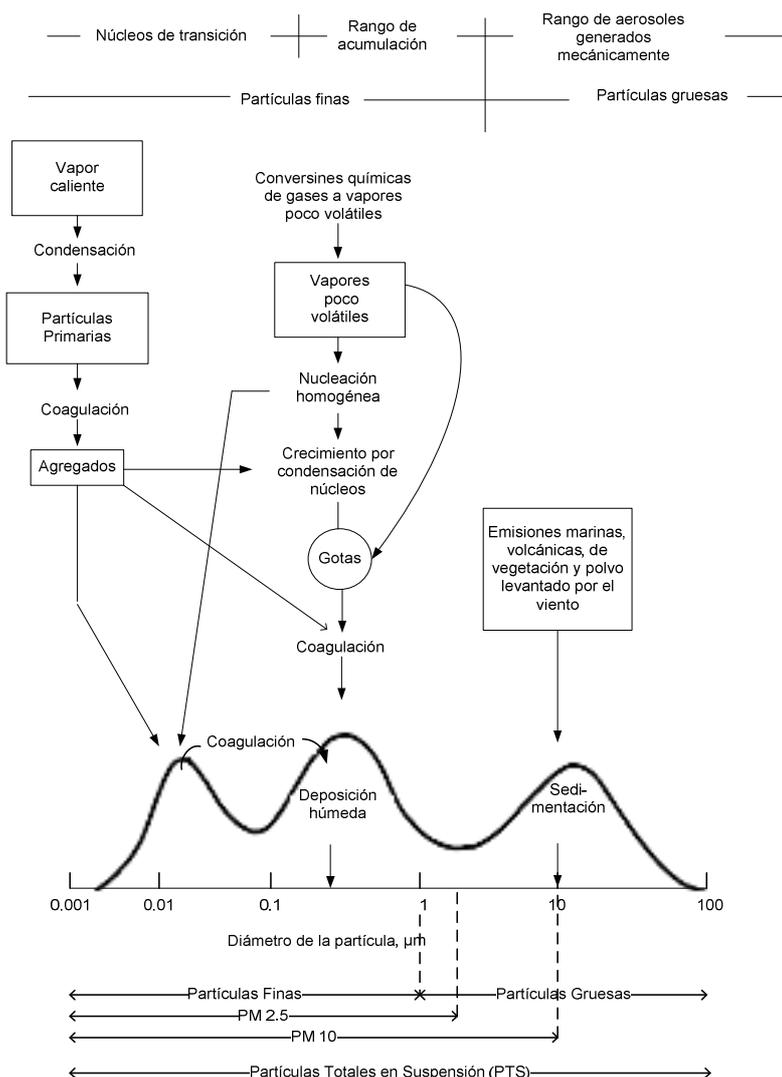


Figura 1. 5. Distribución de tamaños de partículas atmosféricas (Gallardo et al., 2006, p.110)

1.2.1.1. Partículas gruesas (PM₁₀)

Se designa como PM₁₀ al material particulado de diámetro aerodinámico entre 2,5 y 10 micrones, entendiéndose como diámetro aerodinámico, el diámetro de una esfera con densidad unitaria que sedimenta en aire quieto a la misma velocidad que la partícula. Principalmente se compone de partículas primarias emitidas directamente a la atmósfera tanto por fuentes naturales o por antropogénicas. Las partículas PM₁₀ permanecen en la atmósfera desde minutos a horas y pueden viajar distancias de hasta 10 km. (Gallegos R, 2006, p. 196; Fierro, 2000, p.2).

1.2.1.2. Partículas finas (PM_{2,5})

Se designa como PM_{2,5} al material particulado cuyo diámetro aerodinámico es menor a 2,5 micrones. Estas partículas representan la mayor cantidad de polvo suspendido en el ambiente ya que al ser más pequeñas tardan más tiempo en depositarse, entre 5-10 días. Las partículas finas están compuestas principalmente por materiales carbonáceos, compuestos inorgánicos (sulfatos, nitratos y amonio) y trazas de metales (Bhola et al., 2010, p.171).

En la Empresa Terraforte el molino de martillos emite material particulado fino desde el PM_{2,5}.

1.2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PARTÍCULAS

El material particulado puede ser de origen antropogénico o de origen natural y es emitido directamente mediante fuentes primarias o pueden formarse en la atmósfera mediante precursores gaseosos considerados fuentes secundarias (América y Palacios, 1997, p 130).

1.2.2.1. Fuentes naturales de material particulado

En general, la contaminación provocada por fuentes naturales es menor que por fuentes antropogénicas. Algunas partículas provienen de fuentes naturales primarias como el rocío del agua de mar, erupciones volcánicas, procesos geotérmicos, erosión del suelo así como de materiales arrastrados por el viento o por la explotación minera, entre otros. Las partículas de fuentes naturales tienden a ser gruesas, con un tamaño promedio de 10 µm, por esto permanecen en el aire corto tiempo ya que poseen altas velocidades de sedimentación. Como ejemplo de estas fuentes son las geológicas y las quemadas (García, 2006, p.5).

- Fuentes Geológicas: Estas fuentes se refieren al material que queda

flotando en el aire debido a la actividad minera, procesos de construcción y del polvo arrastrado por el viento. Entre los principales procesos que emiten material particulado se encuentran la industria del cemento, procesos de minería como la molienda de piedras así como el transporte de arena. En la mayoría de estos procesos se emiten partículas con tamaño superior a 2,5 micrómetros.

- Quemadas: Se refiere a las quemadas a campo abierto, como los incendios forestales, quemadas en la agricultura, quemadas controladas, las cuales emiten una gran cantidad de material particulado.

1.2.2.2. Fuentes antropogénicas de material particulado

Las fuentes antropogénicas originan partículas finas de diámetro menor a 10 μm . La mayoría de éstas son generadas por fuentes primarias, en procesos de combustión como la quema de combustibles fósiles para la generación de vapor, procesos industriales de extracción y transformación, quema de campos agrícolas, combustión en motores y en menor cantidad por otros procesos industriales. Estas partículas incluyen elementos tóxicos, en comparación con las partículas emitidas por fuentes naturales. Estas fuentes pueden ser fijas o móviles (The World Bank Group, 1998, p.202).

Fuentes fijas

Se refieren aquellas que no presentan movimiento, es decir la emisión se produce en el mismo sitio. En las zonas alejadas de las ciudades las fuentes fijas se encuentran principalmente en los procesos industriales como refinerías, procesos metalúrgicos, centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, etc, donde existe quema de combustibles sólidos que ocasiona gran cantidad de material particulado. En estas fuentes el material particulado suele ser evacuado mediante chimeneas o ductos (García, 2006, pp. 6, 7; América y Palacios, 1997, p. 130).

Fuentes móviles

Estas fuentes generan gran cantidad de partículas suspendidas, que se debe al creciente número de vehículos como buses, volquetas, transporte industrial, entre otros. Estas emisiones en gran medida, provienen de los gases de escape de los vehículos, además incluyen emisiones debido al desgaste de llantas y frenos aunque en menor cantidad. Los vehículos a diesel son principalmente los responsables de la emisión de material particulado primario. (García, 2006, p.7).

Fuentes secundarias

Son aquellas fuentes que emiten sustancias tanto orgánicas como inorgánicas que al llegar a la atmósfera dan lugar a partículas secundarias mediante reacciones químicas y fotoquímicas entre los contaminantes primarios y las especies químicas que se encuentran usualmente en la atmósfera, especialmente el oxígeno y agua. Algunos de los contaminantes secundarios son el ácido sulfúrico, ácido nítrico y los compuestos oxidantes que constituyen el smog fotoquímico, siendo el más relevante el ozono troposférico (Wark Warner, 2002, p. 27; América y Palacios, 1997, p. 141).

1.2.3. EFECTOS DEL MATERIAL PARTICULADO

1.2.3.1. Reducción de la visibilidad

Uno de los problemas más frecuentes de las partículas sobre el medio ambiente, es la reducción de la visibilidad y la luz solar directa, como consecuencia de la absorción y dispersión de la misma, en distinta dirección a la que incide (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2005, p.87; Wark y Warner, 2002, p.28).

Según la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, en el

período 2007-2012, se determinó que las partículas menores a 1 micra son las de mayor porcentaje dentro las partículas PM₁₀, como se observa en la Figura 1.6.

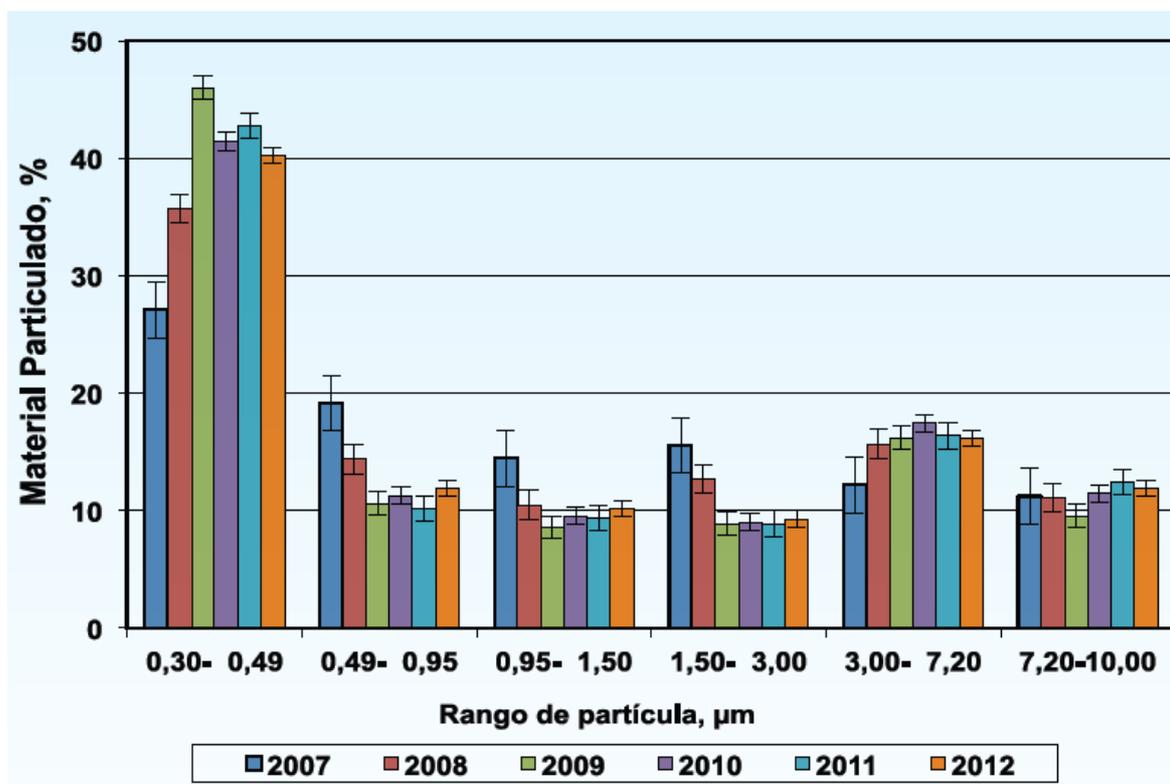


Figura 1. 6. Distribución en porcentajes por tamaño medio del PM₁₀ durante el período 2007-2012

(Secretaría de Ambiente, 2012, p.79)

Las partículas comprendidas entre 0,4 y 0,8 micras, provocan interferencias en la transmisión de la luz en el aire, reducción de la claridad visual, visibilidad a largas distancias y cantidad de luz que llega al suelo, debido a que no permiten el paso de la luz, por la proximidad de su tamaño a la longitud de onda de la luz visible (Secretaría de Ambiente, 2012, p.79).

1.2.3.2. Efectos a la salud

El material particulado es un contaminante que puede generar problemas a la salud como resultado de la absorción e inhalación de polvo inorgánico. Los

principales son efectos respiratorios, pulmonares y agravamiento de afecciones respiratorias y cardiovasculares. Este afecta a toda la población pero la susceptibilidad a la contaminación depende de la edad y salud de cada persona (Bhola, Molina y Ojha, 2010, p.171; Glynn y Heinke, 1999, p. 500).

Depósito de partículas en el árbol respiratorio

Las partículas al ser inhaladas pueden depositarse en el tracto respiratorio, su localización depende de algunos factores, que pueden ser clasificados en tres grupos principales (Australian Government, 2004, p. 44):

- Propiedades fisicoquímicas
- Anatomía del árbol respiratorio
- Patrones de flujo de aire en los pulmones

Los factores agrupados en las propiedades fisicoquímicas incluyen tamaño de partícula, densidad, forma y carácter hidrofóbico o higroscópico. El tamaño de partícula cumple un rol muy importante ya que determina el lugar de deposición en el tracto respiratorio.

Las partículas de polvo de gran dimensión mayores a 10 μm no son problema para la salud ya que son retenidas por la cavidad nasal, específicamente por el movimiento de finos pelitos denominados cilios los cuales se encargan de llevar el polvo hacia la laringe y fuera de la garganta, en donde es más fácil toser o tragar (Alois y Wagner, 2005, p. 4).

En la Figura 1.7 se observa el sistema respiratorio, en el que se localizan las distintas áreas, donde se pueden depositar las partículas dependiendo de su tamaño.

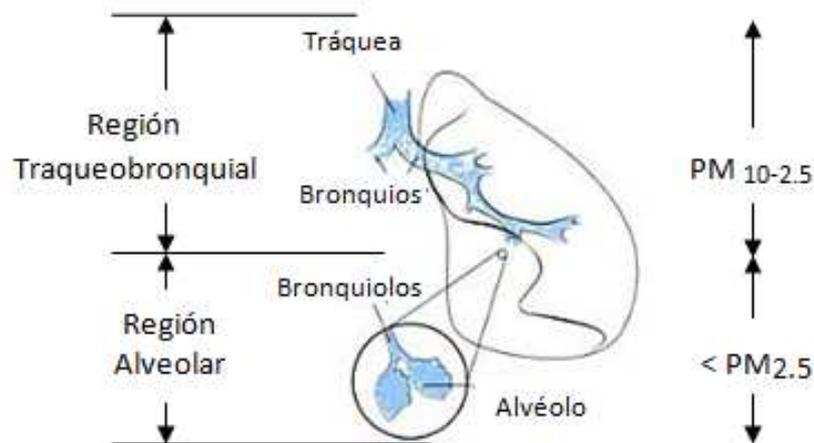


Figura 1. 7. Lugares de asentamiento del material particulado en el tracto respiratorio
(Devlin, 2000, p. 1027)

El PM_{10} se deposita en la región traqueobronquial, en un tiempo promedio de 2 días, contribuyendo al aumento de enfermedades respiratorias como bronquitis, asma, entre otras y exacerbando los efectos de enfermedades cardiovasculares. Estas partículas, causan la disminución de la función pulmonar, incrementando la presencia de enfermedades crónicas respiratorias y en casos extremos muerte prematura (Bhola et al., 2010, p. 171; Siñadi y Mancilla, 2011, p.3).

Las partículas menores a $2,5 \mu m$ pueden alcanzar la cavidad alveolar, por esta razón las zonas más riesgosas son los bronquiolos, donde existe una estructura de intercambio gaseoso. Si las partículas logran llegar hasta este sitio pueden ejercer una acción agresiva local, como neumoconiosis o pasar al torrente sanguíneo (Falagán et al., 2000, p. 19; Segarra, 2006, p.306).

1.3. DISPOSITIVOS DE CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO

1.3.1. MECANISMOS DE COLECCIÓN DE LAS PARTÍCULAS

La separación de partículas de polvo de una corriente gaseosa se da por distintos

métodos, cada uno de estos depende de la naturaleza química de las partículas, caudal y temperatura de la corriente gaseosa. También depende de las propiedades físicas de las partículas, entre las más relevantes la forma, densidad y tamaño de las partículas. Esta última es la más importante, ya que al disminuir el tamaño de partícula la separación de las partículas se dificulta. En la Figura 1.8 se muestra los modelos básicos para la eliminación mecánica de las partículas, en donde el interceptor es una gota de líquido (Gallego et al., 2012, p. 337; McCabe, Smith y Harriot, 1991, p. 1051).

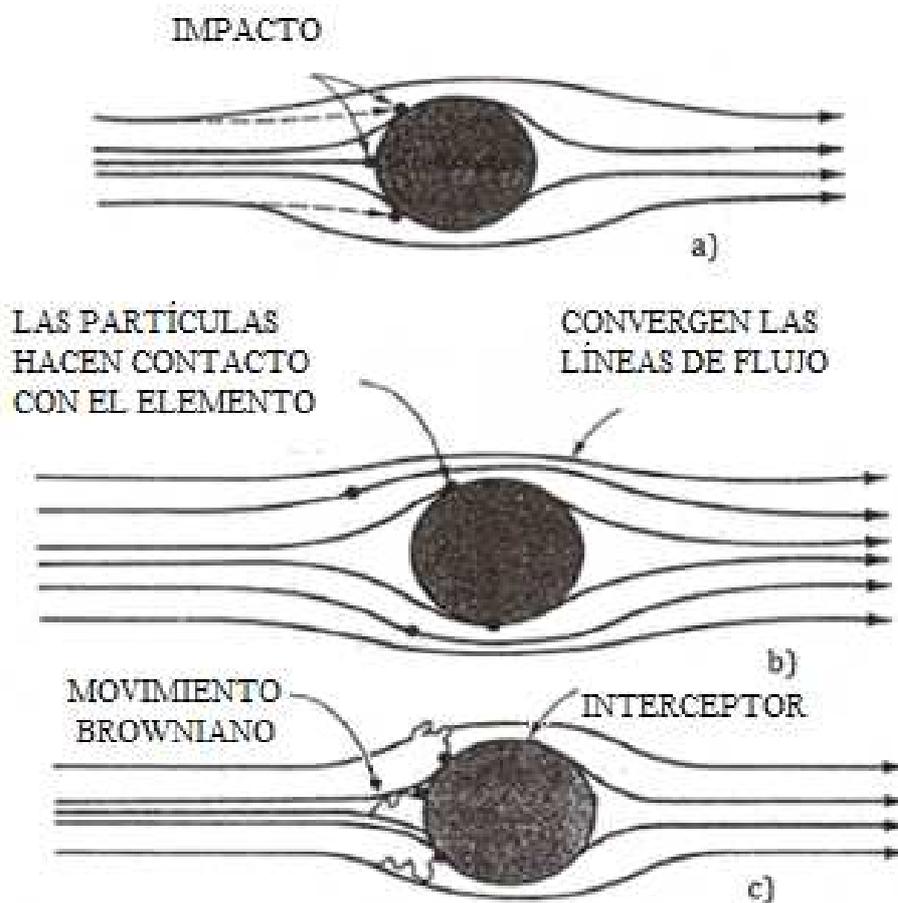


Figura 1. 8. Mecanismos sencillos para la eliminación mecánica de las partículas:
a) impactación por inercia; b) intercepción directa; c) difusión
(Wark y Warner, 2002, p. 234)

La impactación por inercia y la intercepción directa, son los mecanismos más importantes para partículas mayores a $1\ \mu\text{m}$, mientras que la difusión es el mecanismo predominante para partículas menores a $1\ \mu\text{m}$, estos mecanismos se

describen a continuación:

Impactación por inercia

Este mecanismo explica el comportamiento de las partículas con diámetros mayores de 10 μm . El gas residual fluye a lo largo de las líneas de corriente alrededor de la gota (interceptor), las partículas grandes debido a su masa chocan contra el interceptor como se observa en la Figura 1.8 caso a, mientras que las partículas pequeñas evitan chocar con el mismo y lo rodean. El flujo turbulento incrementa la recolección por impactación (Gallego et al., 2012, p. 338; Wark y Warner, 2002, p. 234).

Intercepción directa

Las partículas de 1,0 a 0,1 μm son recolectadas por intercepción directa, estas pueden hacer contacto con la gota en el punto de mayor acercamiento, ya que las líneas de flujo laminar tienden a converger como se observa en la Figura 1.8 caso b. Las partículas en la corriente de flujo chocan con el interceptor, si la distancia entre la línea de flujo y la superficie de la gota es menor a la mitad del diámetro de la partícula (Mussatti, 2002, p. 5; Wark y Warner, 2002, p. 234).

Difusión

En general las partículas menores a 1 μm no suelen seguir las líneas de flujo, ya que están influenciadas por un movimiento variable de las partículas causado por colisiones aleatorias con moléculas de gas (movimiento browniano), como se observa en la Figura 1.8 caso c. Las gotas de agua (interceptor) capturan a las partículas a medida que se difunden a través del gas residual (Wark y Warner, 2002, p. 234).

1.3.2. EQUIPOS DE CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO

Para el control de la polución emitida por los procesos industriales a la atmósfera, se puede actuar directamente en el proceso. Los contaminantes pueden ser controlados mediante equipos mecánicos, esta opción es la más eficiente ya que se trata los contaminantes en la fuente primaria, evitando la contaminación de agua, suelo y aire (Mendoza, Montañés y Palomares, 1998, p.83).

Las cinco clases básicas de equipos de colección de partículas son (Wark y Warner, 2002, p. 235):

- Colectores húmedos
- Cámaras de sedimentación por gravedad
- Separadores ciclónicos
- Precipitadores electrostáticos
- Filtros de tela

A continuación se presentan los colectores húmedos con sus características principales:

1.3.2.1. Colectores húmedos

Estos equipos se utilizan para separar los sólidos de una corriente gaseosa mediante un líquido que generalmente es agua. Esta acción permite la transferencia de los contaminantes desde la fase gaseosa a la líquida donde se obtiene un conjunto de partículas facilitando la remoción. Los colectores húmedos pueden remover partículas, tanto líquidas como sólidas, en un rango de 0,1 a 20,0 μm (Cheremisinoff y Young, 2002, p.125).

Los colectores húmedos ofrecen ciertas ventajas, son pequeños y compactos a comparación de otros equipos de tratamiento; las partículas son fácilmente removidas de la corriente de gas, debido a que su velocidad terminal aumenta por

el incremento de masa; y el material puede chocar contra la superficie interior del equipo, separándose de la corriente de gas (EPA, 2002, p. 4).

Su principal desventaja a comparación de los equipos secos, es el manejo y la disposición de los lodos húmedos, sin embargo en algunos casos es más útil tener lodos que polvo seco, ya que en ciertos procesos este material puede ser usado en las siguientes etapas (Wark y Warner, 2002, p. 252).

Para una selección adecuada se presentan algunos tipos de colectores húmedos:

Torre de aspersión ciclónica

El gas contaminado entra al lavador en forma tangencial por la parte inferior y el líquido se introduce a través de una boquilla múltiple axial. Debido a la entrada tangencial del gas, se forma un vórtice ascendente dentro del cual se atomiza el líquido. Las partículas de polvo se adhieren sobre las gotas de líquido como resultado del impacto e intercepción. La fuerza centrífuga acelera tanto a partículas como a gotas de líquido hacia las paredes del recipiente donde se produce la separación de las partículas. La solución cargada de polvo fluye hacia el fondo, donde es retirada (Durand et al., 2001, p. 119; Wark y Warner, 2002, p. 259).

Generalmente, cuando la torre de aspersión ciclónica trabaja con gotas mayores a 100 μm tienen una eficiencia de 100 %, con gotas entre 50 y 100 μm alrededor del 99 %, y para gotas entre 5 y 50 μm de 90 a 98 %. El lavador tipo ciclónico se muestra en la Figura 1.9. (Wark y Warner, 2002, p. 260).

Torre de aspersión

Las torres de aspersión controlan el material particulado proveniente de fuentes fijas, además de controlar gases ácidos. Pueden tener algunas configuraciones

como flujo concurrente, en contra-corriente y flujo cruzado. El principio de recolección es por interceptación y colisión de partículas de polvo con gotas de líquido, debido a su diferencia en las velocidades (Durand, Morales y Texta, 2001, p. 118).

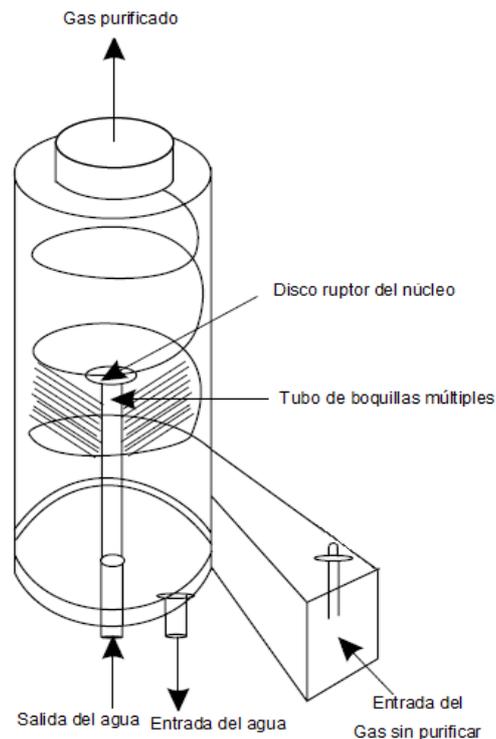


Figura 1. 9. Torre de aspersión ciclónica
(Wark y Warner, 2002, p. 259)

El gas contaminado ingresa por la parte inferior de la torre, fluye hacia arriba y se impacta con las gotas de líquido que se producen por aspersores o atomizadores. La velocidad con que las gotas impactan a las partículas debe ser mayor a la del gas para evitar arrastre del líquido. En general, se coloca un eliminador de neblina en la parte superior para evitar que las gotas muy finas salgan con el gas purificado (Durand et al., 2001, p. 118; Wark y Warner, 2002, p. 256).

En la Figura 1.10 se muestra una torre de aspersión en contra-corriente.

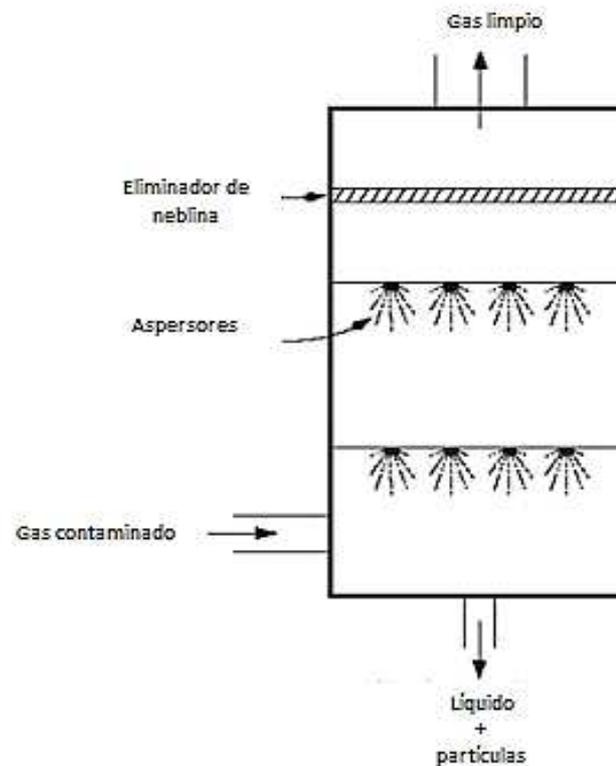


Figura 1. 10. Torre de aspersión en contracorriente
(Wark y Warner, 2002, p. 257)

Lavador de placas de choque húmedas

Este equipo es un diseño alternativo, comparándolo con la torre de aspersión, ya que trabaja con flujo cruzado, es decir que el gas fluye perpendicularmente a comparación del líquido como se muestra en la Figura 1.11.

El agua es atomizada y cae en forma de finas gotas desde la parte superior, el gasto se encuentra dentro del intervalo de 0,45 a 2,20 m³/h. Las gotas capturan a las partículas de polvo que finalmente se depositan como lodo en un tanque de sedimentación o tolva que se ubica bajo el lavador de placas de choque húmedas (Wark y Warner, 2002, p. 256).

La corriente de gas sucio se hace más lenta a la entrada, y se abre camino en medio de las placas y de la turbulencia producida por los aspersores, pasa por un

eliminador de neblina y luego se acelera a la salida del ducto (Wark y Warner, 2002, p. 257).

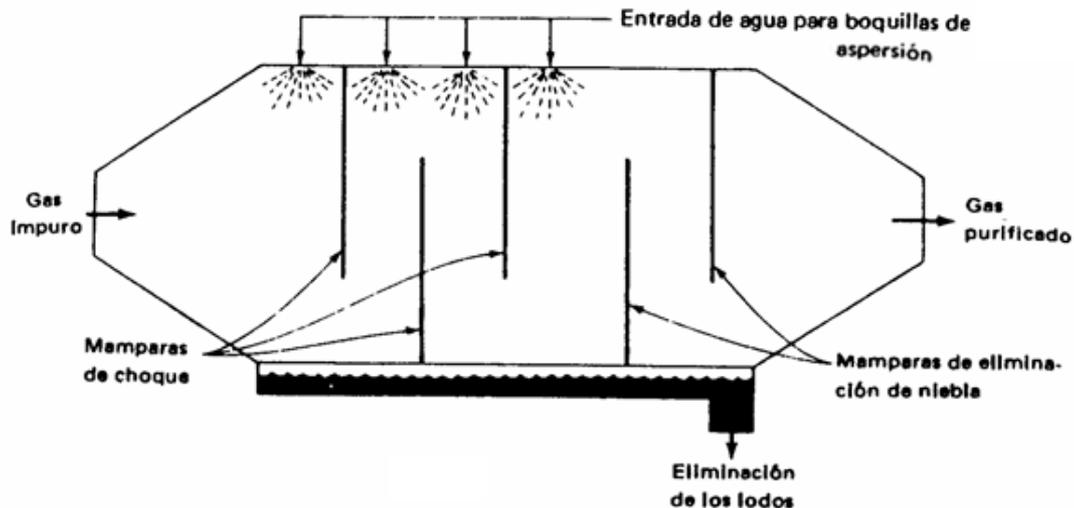


Figura 1. 11. Lavador de placas de choque húmedas
(Wark y Warner, 2002, p. 258)

El uso de deflectores (placas) mejora la eficiencia de este colector húmedo, ya que capturan las partículas de polvo que chocan contra ellos, el polvo es arrastrado por la película líquida en movimiento y se deposita en los tanques de sedimentación. (Wark y Warner, 2002, p. 258).

Los deflectores producen una eficiencia de 97 % para partículas de 5 μm o casi de 100 % para partículas de 10 μm o mayores. La eficiencia se puede incrementar aumentando la fuerza centrífuga y de inercia por medio de la aplicación de una energía mayor que resulta en el incremento de la velocidad del gas (Wark y Warner, 2002, p. 258).

Como en todos los colectores, las partículas muy finas son más difíciles de capturar que las gruesas. La probabilidad de capturar estas partículas depende de la cantidad de energía que hace que se mezclen el polvo, el gas y las gotas, es decir, esto depende principalmente de la presión de los aspersores. La eficiencia de recolección aumenta con gotas más finas, en mayor número y con mayor turbulencia, esto se obtiene con presiones altas (Karl,

Schnelle y Brown, 2002, p. 351).

1.3.2.2. Mecanismo de colección húmeda

A pesar de que uno o más mecanismos colectores se pueden emplear en la mayoría de colectores húmedos, el más importante es la impactación por inercia entre la partícula sólida y una gota de líquido, esto se puede apreciar en la Figura 1.8 donde se observa este mecanismo al acercarse una partícula a la gota (Wark y Warner, 2002, p. 253).

Cuando la partícula abandona la corriente de gas y se dirige a la gota está bajo dos fuerzas principales: su propia fuerza de inercia y la fuerza de arrastre proveniente del gas. Debido a estas dos fuerzas la partícula se detendrá con respecto a la gota.

El efecto de impactación está dado por número de Stokes mediante la Ecuación [1.1]:

$$Stk = \frac{(u_p - u_D) * d_p^2 * \rho_p * K_c}{18 * \mu_g * d_D} \quad [1.1]$$

Donde:

- u_D : velocidad de la gota (m/s)
- d_D : tamaño de la gota (m)
- K_c : factor de corrección de Cunningham
- d_p : tamaño de la partícula (m)
- u_p : velocidad de la partícula en la dirección del flujo (m/s)
- ρ_p : densidad de la partícula (kg/m^3)
- μ_g : viscosidad del gas (kg/ms)

Además se ha añadido el factor de corrección de Cunningham para partículas menores a un diámetro de 5 μm , ya que las partículas tienden a moverse junto a las moléculas de gas y el número de impactación se hace mayor que con la ley de Stokes (Wark y Warner, 2002, p. 254).

El factor de corrección de Cunningham, K_c , está dado por la Ecuación [1.2]:

$$K_c = 1 + \frac{2 * \lambda}{d_p} \left[1,257 + 0,4 * \exp\left(\frac{-0,55 * d_p}{\lambda}\right) \right] \quad [1.2]$$

Donde:

λ : recorrido medio de las moléculas en la fase gaseosa

d_p : tamaño de la partícula (m)

El recorrido medio de las moléculas (λ) está dado por la Ecuación [1.3]:

$$\lambda = \frac{\mu_g}{0,499 * \rho * u_m} \quad [1.3]$$

Donde:

u_m : velocidad molecular media

μ_g : viscosidad del gas (kg/ms)

ρ : densidad del gas (kg/m^3)

Según la teoría cinética de los gases, u_m está dada por la Ecuación [1.4]:

$$u_m = \frac{8 * R * T}{\pi * M} \quad [1.4]$$

Donde:

R: constante universal de los gases en $\text{J}/(\text{mol K})$

M: peso molecular del gas
T: temperatura del gas (K)

1.3.3. EQUIPOS AUXILIARES

1.3.3.1. Tipos de Extractores

Son equipos rotatorios capaces de mover un flujo de aire o gas de manera continua, transmiten cierta presión al aire para que venza las pérdidas de carga a lo largo del ducto. Generalmente los extractores se clasifican en axiales y centrífugos (Soler & Palau, 2012, p. 2).

Extractores Axiales

En los extractores axiales el gas se mueve en paralelo al eje de rotación. Se usan en aplicaciones con baja resistencia porque pueden mover grandes cantidades de gas a baja presión. Se compone principalmente de una hélice, soporte y motor. El más común es el de hélice usado en ventilación en ventanas, muros o techos (Green, 1992, p. 261).

Extractores Centrífugos

En los extractores centrífugos el gas se mueve perpendicularmente al eje de rotación. Se los usa cuando existe alta resistencia de fricción en el transporte de gas. Esto implica que trabaja a presiones altas con caudales bajos. El rodete del extractor centrífugo está compuesto de álabes que pueden ser hacia adelante, radiales o atrás (Green, 1992, p. 244).

El extractor centrífugo de aspas radiales es el más común para manejar volúmenes bajos a medianos a altas presiones, además de manejar aire con alto

contenido de partículas. Este diseño es adecuado para el manejo de polvo ya que disminuye la acumulación del mismo porque las aspas tienden a ser de auto limpieza. Además estos extractores son de alta resistencia estructural y son fabricados con aleaciones resistentes a la abrasión. (Green, 1992, p. 262).

En la Tabla 1.2 se observa las diferentes aplicaciones de los extractores axiales y centrífugos:

Tabla 1. 2. Aplicaciones de extractores axiales y centrífugos

| Aplicación | Tipo de extractor | | | | |
|--|-------------------|---------------|------------|-----------------|---------------------------|
| | Axial | | Centrífugo | | |
| | Tuboaxial | Aleta de Guía | Radial | Puntas radiales | Con curvatura hacia atrás |
| Colectores de polvo y precipitadores electrostáticos | | | X | X | |
| Secado en procesos | X | X | X | | X |
| Gases de descarga de reactores o humo en chimeneas | | | X | X | |

(Green, 1992, p. 248)

1.3.3.2. Sistema de aspersión

Los sistemas de aspersión son muy importantes en procesos industriales que producen gases con alto contenido de material particulado, ya que estas partículas pueden ser atrapadas mediante pequeñas gotas de agua producidas por los aspersores.

Para tratar el material particulado se pueden usar distintos tipos de aspersores en diferentes aplicaciones como se muestra en la Tabla 1.3.

Tabla 1. 3. Aplicaciones de los aspersores

| Aplicación | Boquilla de atomización con aire | Boquilla de pulverización hidráulica | Boquillas de cono hueco |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Trituradora de mandíbula | x | x | x |
| Terminales de carga | x | x | |
| Tolva de descarga primaria | x | x | |
| Puntos de transferencia | x | x | |

(Spraying Systems Co., 2008, p. 11)

Los dos tipos de aspersores más usados son:

- El aspersor de boquilla de atomización con aire, es de simple instalación y de bajo costo de operación ya que no requiere aire comprimido, el funcionamiento a altas presiones incrementa el consumo de electricidad y el trabajo de la bomba.
- El aspersor de boquilla de pulverización hidráulica, utiliza una corriente de alta velocidad de aire para producir la atomización. Su costo se incrementa por el uso de aire comprimido.

1.3.3.3. Sedimentadores

Los sedimentadores son tanques decantadores que eliminan la materia suspendida del agua residual. Para el diseño de este equipo se determina la velocidad vertical final para partículas esféricas a partir de la Ecuación [1.5] (Metcalf & Eddy Inc, 1995, p.254)

$$V_c = \frac{4}{3} * \frac{(\rho_p - \rho) * D_p}{C_D * \rho} \quad [1.5]$$

Donde:

V_c : velocidad final de la partícula (m/s)

C_D : coeficiente de arrastre

D_p : tamaño de partícula (m)

ρ_p : densidad partícula (kg/m³)

ρ : densidad del agua (kg/m³)

El coeficiente de arrastre (C_D) se calculó con la Ecuación [1.6]:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34 \quad [1.6]$$

Donde:

Re: tamaño de partícula (m)

La velocidad crítica de arrastre se calculó a partir de la Ecuación [1.7]:

$$V_{CR} = \frac{g * D_p^2 (\rho_p - \rho)}{18 * \mu} \quad [1.7]$$

Donde:

D_p : tamaño de partícula (m)

μ : viscosidad del agua (kg/ms)

ρ_p : densidad partícula (kg/m³)

ρ : densidad del agua (kg/m³)

Para finalizar con el diseño del sedimentador se determinó el área de la superficie del tanque de sedimentación mediante la Ecuación [1.8]

$$A = \frac{Q}{V_s} \quad [1.8]$$

Donde:

Q: Caudal de agua

V_s : Velocidad de sedimentación

1.4. NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

En el Ecuador, la Ley de Gestión Ambiental establece que la Autoridad Ambiental Nacional la ejerce el Ministerio del Ambiente, institución rectora, coordinadora y reguladora del Sistema Nacional Descentralizado de Gestión Ambiental, basándose en las ordenanzas municipales y Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundario (TULMAS).

La Normativa Ambiental vigente para material particulado en el Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundario se encuentra en el Anexo 3 y 4 del Libro VI dedicado a la calidad ambiental y que se aplica a nivel nacional.

Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión (Anexo 3 Libro VI del TULMAS)

Los parámetros, valores referenciales y límites máximos permisibles de emisiones al aire se establecen en la norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión (Anexo 3) del TULMAS, como se muestra en la Tabla 1.4.

Se observa en la Tabla 1.4 que el límite máximo permisibles para el enfriador de clínker es 100 mg/Nm^3 , este valor será tomado como referencia para comparar con la concentración de material particulado proveniente del molino de martillos de la Empresa Terraforte, debido a que ambos equipos funcionan eléctricamente por tanto no producen combustión.

Tabla 1. 4. Límites máximos permisibles de emisiones al aire para la producción de cemento

| CONTAMINANTE EMITIDO | OBSERVACIONES | FUENTES EXISTENTES | FUENTES NUEVAS | UNIDADES |
|----------------------|----------------------|--------------------|----------------|--------------------|
| Partículas Totales | Horno de clínker | 150 | 50 | mg/Nm ³ |
| | Enfriador de clínker | 100 | 50 | mg/Nm ³ |
| Óxidos de Nitrógeno | ----- | 1800 | 1300 | mg/Nm ³ |
| Dióxido de Azufre | ----- | 800 | 600 | mg/Nm ³ |

(Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundaria, 2003, p. 396)

Donde:

mg/Nm³: miligramos por metro cúbico de gas de combustión en condiciones normales (1013 milibares de presión y temperatura de 0 °C), en base seca y corregido a 10 % de oxígeno.

Norma de la calidad del aire ambiente (Anexo 4 del Libro VI del TULMAS)

La norma de calidad del aire ambiente, presenta límites máximos permisibles de los contaminantes criterio, definidos como cualquier contaminante del aire para los cuales, en esta norma se especifica un valor máximo de concentración, permitida a nivel de suelo en el aire ambiente, además de señalar los métodos y procedimientos destinados para la determinación de los contaminantes antes mencionados.

En la norma en referencia, se establecen algunos contaminantes comunes del aire ambiente, los relacionados con el material particulado, son los siguientes (Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundaria, 2011, p. 9):

- Partículas Sedimentables.
- Material Particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 µm.
- Material Particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 µm.

En esta norma, se establecen normas generales para concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente. Para las partículas sedimentables se establece que la concentración máxima de una muestra colectada durante 30 días de forma continua, debe ser un miligramo por centímetro cuadrado ($1 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$).

En este caso, no existe ninguna norma de calidad del aire ambiente con mayor exigencia que la que está establecida en el TULMAS, por lo que $1 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ es el límite máximo permisible a nivel nacional.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO GENERADO EN EL MOLINO DE MARTILLOS

2.1.1. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PROCEDENTE DEL MOLINO DE MARTILLOS

La concentración de material particulado generado en el molino de martillos se determinó para comparar el valor obtenido con la Norma del Anexo 3 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundario, y así determinar si la concentración se encontraba bajo norma.

Este ensayo se realizó en el ducto, primero se adecuó el mismo, es decir que se determinó el puerto de muestreo a una distancia de 2 diámetros equivalentes desde el final. Como el ducto es rectangular y su diámetro equivalente menor a 0,61m se definió 9 puntos de muestreo al interior del puerto, criterio definido en el método de localización de puntos de muestreo en fuentes fijas, el puerto y los puntos de muestreo se indican en la Figura 2.1

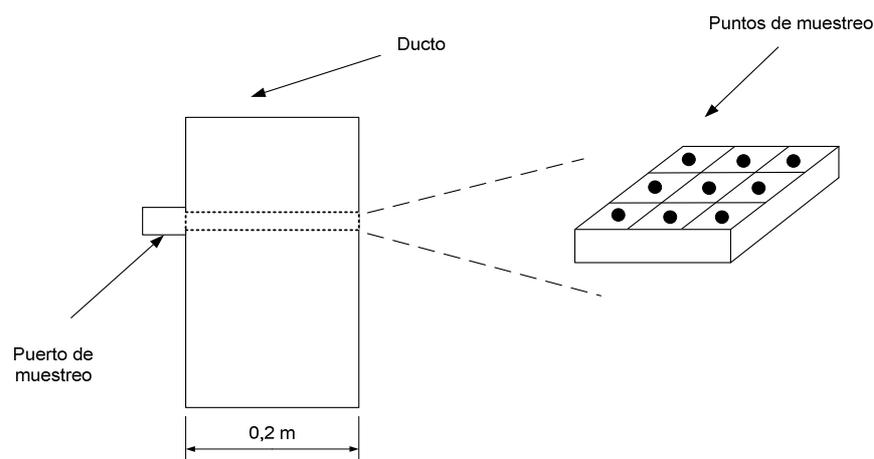


Figura 2. 1. Puerto de muestreo y puntos de muestreo

El ensayo se inició al efectuar una prueba de detección de fugas cuando el equipo estuvo armado en el sitio de muestreo. Las muestras de las partículas fueron

colectadas durante cinco minutos en cada uno de los puntos de muestreo previamente establecidos, mediante el tren isocinético, que consta de una sonda de captación de partículas.

Las partículas se depositaron en un filtro de fibra de vidrio y posteriormente fueron analizadas. La cuantificación del material particulado generado por el molino se realizó en el laboratorio mediante la diferencia de pesos del filtro al inicio y al final cuando contenía las partículas.

2.1.2. RECOLECCIÓN Y MEDICIÓN DE PARTÍCULAS DE POLVO SEDIMENTABLES

El material sedimentable en el aire ambiente se determinó para comparar los valores obtenidos en cada punto de muestreo con la Norma del Anexo 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundario, con el rango permitido de $1 \text{ mg/cm}^2 \times 30\text{d}$.

El procedimiento que se siguió para la recolección de las partículas solubles e insolubles se encuentra en el Anexo I.

2.1.3. DETERMINACIÓN DE LAS PARTÍCULAS SOLUBLES E INSOLUBLES

El material sedimentable en el aire ambiente que fue recogido anteriormente, se procesó en el laboratorio para determinar el material insoluble y soluble.

2.1.3.1. Determinación del material insoluble de partículas de polvo sedimentables

Para determinar el material insoluble se realizó el siguiente procedimiento:

- Se colocó un papel filtro en una luna de reloj en la mufla.
- Se tararon ambos elementos a una temperatura de $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por una hora y se colocaron en el desecador para pesarlos posteriormente.

- Se añadieron 200 mL de agua destilada al colector de partículas.
- Toda la muestra húmeda fue trasvasada a un matraz Erlenmeyer.
- La muestra fue filtrada mediante un embudo Buchner con el papel filtro previamente tarado y pesado.
- El filtrado se almacenó hasta para determinar de material soluble.
- El papel filtro que captó todas las partículas se colocó en la luna de reloj previamente tarada para secarlo a una temperatura de 105 °C por 90 minutos.
- Posteriormente, se enfrió el papel filtro en el desecador por una hora y se pesó.

Con la diferencia de pesos entre el papel filtro al inicio y al final cuando contenía las partículas de polvo, se obtuvo la cantidad de material insoluble recogido en ese punto de muestreo.

2.1.3.2. Determinación del material soluble de partículas de polvo sedimentables

Para determinar el material soluble se realizó el siguiente procedimiento:

- Se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 ml el filtrado del ensayo anterior.
- Se concentró el filtrado mediante evaporación en una plancha de calentamiento hasta obtener un volumen pequeño.
- Se trasvasó el sobrante del filtrado a una cápsula de porcelana previamente tarada hasta evaporarlo totalmente.
- Se secó la muestra en la mufla a una temperatura de 105 °C durante 2 horas.
- Se enfrió en el desecador por una hora y se pesó en una balanza analítica.

El peso del material soluble se obtuvo mediante la diferencia entre la cápsula de porcelana al inicio y al final cuando contenía las partículas de polvo. El mismo procedimiento se realizó para las cuatro muestras simultáneamente, con los pesos tanto del material soluble e insoluble se calculó la tasa de deposición, D a partir de Ecuación [2.1]:

$$D = \frac{W}{A} \frac{mg}{30 * cm^2} \quad [2.1]$$

Donde:

A: área de recolección, área transversal del diámetro interno de la parte superior del recipiente (cm²)

W: pesos determinados del material insoluble y soluble en cada punto de muestreo (mg)

La tasa de deposición de las partículas (T) se determinó con la Ecuación [2.2]:

$$T = \frac{D}{A_1 * t_1} \quad [2.2]$$

Donde:

A₁: área de los puntos de muestreo en la Empresa Terraforte (m²)

t₁ : tiempo de trabajo del molino (h)

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO DE LAS EMISIONES DEL MOLINO DE MARTILLOS Y DEL AIRE AMBIENTE INTERNO Y EXTERNO A LA PLANTA DE TERRAFORTE

2.2.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

2.2.1.1. Análisis granulométrico en húmedo

Con el fin de determinar el tamaño de partícula se siguió un método con base en la norma ASTM C325-56. Debido a que la muestra contenía material fino se procedió a realizar un tamizado en húmedo. (ASTM, 1997, p. 2).

Para determinar el tamaño de partícula se realizó dos repeticiones, el procedimiento que se encuentra en el Anexo II.

2.2.1.2. Determinación del tamaño de partícula por dispersión dinámica de luz (DLS)

La determinación del tamaño de partícula se realizó mediante el análisis de dispersión dinámica de luz.

- Se colocó 20 mg de muestra en la celda y se agregó agua destilada hasta las tres cuartas partes.
- Se colocó la celda en el equipo de ultrasonido por 2 minutos para dispersar los grumos.
- Posteriormente, fue analizada en el equipo de dispersión de luz láser donde se utilizó un software para determinar el tamaño de partícula, se realizaron cinco repeticiones.

2.2.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL MATERIAL PARTICULADO

El método a seguir fue llevado a cabo sobre la base de la norma ASTM C329-56 y se aplicó a tres muestras del material fino que salía del ducto, la muestra inicial fue de 300 g aproximadamente. Este análisis fue necesario para el diseño del colector húmedo específicamente para la determinación del número Stokes que se obtiene de la Ecuación [2.12] (ASTM, 2011, p. 2).

Para determinar la densidad del material fino se realizó el siguiente procedimiento que se encuentra en el Anexo III.

Se determinó la densidad con todos los pesos tomados mediante la Ecuación [2.3]:

$$\rho = \frac{1}{1 + \frac{(W_{pic} + W_a) - (W_{pic} + W_a + W_m)}{(W_{pic} + W_m) - (W_{picv})}} \quad [2.3]$$

Donde:

W_{pic} : peso picnómetro (g)

W_m : peso muestra (g)

W_a : peso agua (g)

W_{picv} : peso picnómetro vacío (g)

2.2.3. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA ARCILLA

La técnica que se siguió para determinar el contenido de humedad de la arcilla estuvo basada en el método ASTM C324-82 y se encuentra resumida en el Anexo IV. Este análisis se realizó a dos muestras, a la entrada y salida del molino, cada una con 10 repeticiones (ASTM, 1999, p. 88).

El objetivo de cuantificar la humedad en la arcilla fue determinar la cantidad de agua que contenía la muestra antes y después de ingresar al molino para determinar la dosificación de lodos mediante el balance de masa.

Se determinó el contenido de humedad por diferencia de pesos a partir de la Ecuación [2.4]:

$$w = \left(\frac{W_o - W_1}{W_o} \right) * 100 \quad [2.4]$$

Donde:

w : contenido de humedad expresado en porcentaje

W_o : peso de la arcilla al tiempo cero (g)

W_1 : peso de la arcilla al tiempo uno (g)

2.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO

2.3.1. SELECCIÓN DEL EXTRACTOR

Para la selección del extractor se consideraron los siguientes criterios:

2.3.1.1. Tipo de extractor

El factor más importante para la selección del tipo de extractor es la composición de la corriente de aire, si está cargada de partículas de polvo la selección se reduce a los extractores centrífugos de aspas radiales o de puntas radiales con aspas más resistentes (Green, 1992, p. 262).

El uso principal del extractor centrífugo de aspas radiales es manejar corrientes de aire con alto contenido de partículas, ya que sus aspas al ser planas reducen la acumulación de material, además de que son fabricadas con materiales resistentes a la abrasión (Green, 1992, p. 262).

2.3.1.2. Pérdidas de carga

Para realizar una selección adecuada del extractor es importante determinar la caída de presión total que el aire debe vencer a través del ducto. Esto se logró mediante la determinación de las pérdidas de carga en la campana, codos y en el ducto mediante las Ecuaciones [2.5], [2.6] y [2.7] respectivamente.

Pérdidas en la campana

Las pérdidas de carga en la campana se calcularon a partir del caudal y la presión estática mediante la Ecuación [2.5] (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo del Gobierno de España, 2003, p.4).

$$Q = 4,04 * S * \left(\frac{0,1021 * \Delta P_{campana}}{(1 + Fc)} \right)^{1/2} \quad [2.5]$$

Donde:

$\Delta P_{campana}$: presión estática en la campana (Pa)

Fc : factor de pérdidas de la campana

S: área del ducto (m²)

Pérdidas en los codos

Las pérdidas en los codos dependen del tipo de codos, de la densidad del fluido y de la velocidad, todas estas variables están relacionadas mediante la Ecuación [2.6] (Jacquard y Rapin, 1997, p.524).

$$\Delta P_{codos} = K_T \left(\frac{\rho_{aire} * v^2}{2 * gc} \right) \quad [2.6]$$

Donde:

ΔP_{codos} : presión estática en los codos (Pa)

K_T : sumatoria de las pérdidas de los distintos codos

ρ_{aire} : densidad del aire (kg/m³)

v: velocidad en el ducto (m/s)

Pérdidas en el ducto

Las pérdidas en el ducto se calcularon mediante la Ecuación [2.7] que contempla longitud y diámetro del ducto, velocidad en el ducto y el factor de fricción:

$$\Delta P_{ducto} = f * \frac{L}{D_H} * \left(\frac{\rho_{aire} * v^2}{2 * gc} \right) \quad [2.7]$$

Donde:

- ΔP_{ducto} : presión estática en el ducto (Pa)
 f : factor de fricción
 L : longitud del ducto (m)
 D_H : diámetro hidráulico (m)

Las pérdidas totales en el sistema se calcularon sumando las pérdidas en la campana, en los codos y en el ducto.

2.3.1.3. Cálculo de la potencia mínima requerida del extractor

Para terminar el dimensionamiento del extractor se calculó la potencia mínima a partir de la Ecuación [2.8] (Salvador Escoda S.A, 2009, p. 7)

$$Pot = \frac{Q * \Delta P_{\text{totales}}}{n} \quad [2.8]$$

Donde:

- $\Delta P_{\text{totales}}$: pérdidas totales en el ducto (Pa)
 n : eficiencia del extractor
 Q: caudal del aire (m^3/h)

La selección del extractor centrífugo se basó en el caudal de aire, pérdidas de carga a través del ducto y de la potencia mínima requerida.

2.3.2. DISEÑO DEL LAVADOR DE PLACAS DE CHOQUE HÚMEDAS

El lavador de placas de choque húmedas, posee varios aspersores en la parte superior, que dispersan el agua entrante de manera uniforme sobre la superficie horizontal, para atrapar las partículas de polvo.

El gas impuro dentro del lavador de placas de choque húmedas realiza su

recorrido mediante un área cuadrada que se determina con la Ecuación [2.9]:

$$Q = V * S \quad [2.9]$$

Donde:

Q: caudal del gas impuro (m³/s)

S: área cuadrada del lavador de placas de choque húmedas (m²)

V: velocidad de entrada al lavador de placas húmedas (m/s)

Para determinar el largo del lavador de placas de choque húmedas se utilizaron las Ecuaciones [2.10] a la [2.12].

El volumen específico de limpieza de la gota se determinó a partir de la Ecuación [2.10] (Gemci, Chigier y Organiscak, 2003, p.3).

$$m = n_d * \frac{3}{2 * D_d} * L \quad [2.10]$$

Donde:

m: volumen específico de limpieza de la gota

n_d: eficiencia de colección de una gota

D_d: diámetro de una gota (m)

L: longitud del lavador de placas húmedas (m)

La eficiencia de colección de una gota se determinó con la Ecuación [2.11] (Gemci et al., 2003, p.2).

$$n_d = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,35)^2} \quad [2.11]$$

El número de Stokes (Stk) se determinó con la Ecuación [1.1]:

$$Stk = \frac{(u_p - u_D) * d_p^2 * \rho_p * K_c}{18 * \mu_g * d_D}$$

La longitud del lavador de placas de choque húmedas se determinó a partir de la Ecuación [2.12] (Gemci et al., 2003, p.3).

$$n_{global} = 1 - \exp\left(-n_d * \frac{3}{2 * D_d} * L * \frac{Q_d}{Q_g}\right) \quad [2.12]$$

Donde:

n_{global} : eficiencia global

Q_d : caudal de agua (m³/h)

Q_g : caudal de gas (m³/h)

D_d : diámetro de una gota (m)

L : longitud del lavador de placas de choque húmedas (m)

Para determinar el valor del caudal de agua (Qd) se escogió los aspersores de pulverización hidráulica ya que estos son usados para capturar partículas de polvo en áreas cerradas. (Sparying Sytems Co., 2013, p. E6)

2.3.3. SISTEMA DE BOMBEO

El sistema de bombeo está formado por el tanque de almacenamiento de agua, una bomba centrífuga, la tubería, accesorios y los aspersores del lavador de placas de choque húmedas. Para determinar la altura requerida en el sistema se utilizó la expresión de Bernoulli Ecuación [2.13] entre el tanque de almacenamiento de agua y el lavador de placas de choque húmedas, específicamente a la salida de los aspersores, como se observa en la Figura 2.3.

En la Figura 2.2. se analizaron los puntos 1 y 2 mediante la Ecuación de Bernoulli, debido a que son el punto inicial y final del sistema de bombeo, respectivamente.

El punto 1 se encuentra en el nivel superior de agua en el tanque de almacenamiento y el punto 2 está ubicado a la entrada del colector de placas de choque húmedas (Mott, 2006, p. 170).

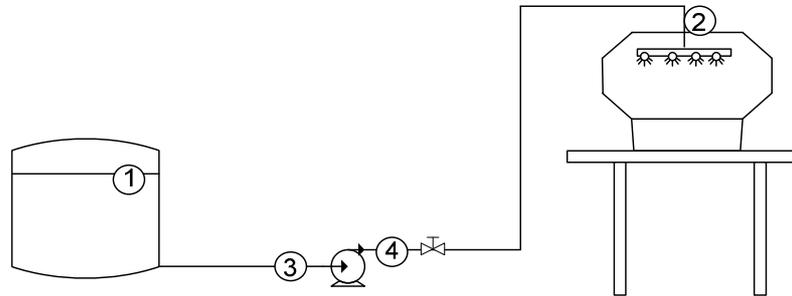


Figura 2. 2. Puntos analizados en el sistema del tanque de almacenamiento de agua y aspersores

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf_t \quad [2.13]$$

Donde:

P_1 : presión en el tanque de almacenamiento de agua (Pa)

z_1 : nivel de referencia (m)

v_1 : velocidad a la salida del tanque de almacenamiento de agua (m/s)

H_B : altura de la bomba (m)

P_2 : presión a la entrada de los aspersores (Pa)

v_2 : velocidad a la entrada de los aspersores (m/s)

z_2 : altura respecto al nivel de referencia (m)

hf_t : pérdidas de carga totales (m)

γ : peso específico del agua (N/m^3)

g : valor de la gravedad (m/s^2)

En la Figura 2.3., el punto 3 y 4 a la entrada y salida de la bomba, se analizaron mediante la ecuación de continuidad Ecuación [2.14] (Mott, 2006, p. 156).

$$Q_3 = Q_4 \quad [2.14]$$

La pérdida de carga por los accesorios se determinó a partir de la Ecuación [2.15]:

$$hf_{\text{accesorios}} = K_T * \frac{v^2}{2 * g} \quad [2.15]$$

Donde:

K_T : suma de coeficientes de los accesorios (Tabla 3.17)

La pérdida de carga tanto en la tubería de succión como en la descarga calculó con la fórmula de Darcy Ecuación [2.16] que contempla longitud y diámetro de la tubería, velocidad en la tubería y el factor de fricción (Mott, 2006, p. 233).

$$hf = f_D * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad [2.16]$$

Mediante la ecuación de Bernoulli, se determinaron diferentes alturas de bomba para distintos caudales, con lo que se obtuvo la curva del sistema. Para seleccionar la bomba se usó el programa WINCAPS, software que posee información de bombas tanto industriales como domésticas, creado por la compañía GRUNDFOS. Para este caso se seleccionó la opción de aplicaciones industriales, donde se escogió las bombas centrífugas de código CM, ya que manejan caudales pequeños a partir de 0,5 m³/h con alturas de bombas altas a partir de 70 m, se introdujo el caudal y la altura de bomba necesarios para el sistema y el programa emitió la curva del fabricante, que más se adaptó a las condiciones de trabajo (GRUNDFOS, 2011).

Se determinó la potencia hidráulica mínima de la bomba a partir de la Ecuación [2.17] (Mott, 2006, p.207):

$$Pot = H_B * \rho * g * Q_T \quad [2.17]$$

Donde:

ρ : densidad del agua (kg/m³)

Q_T : caudal de operación (m^3/s)

2.4. DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE LODOS EN EL PROCESO PRODUCTIVO

Para la determinación de la dosificación de los lodos en el proceso productivo se realizó un balance de masa en el molino, considerando la arcilla que sale del molino, el agua que se agrega para obtener la pasta para el siguiente proceso y los lodos provenientes del colector húmedo, como se muestra en la Figura 2.3:

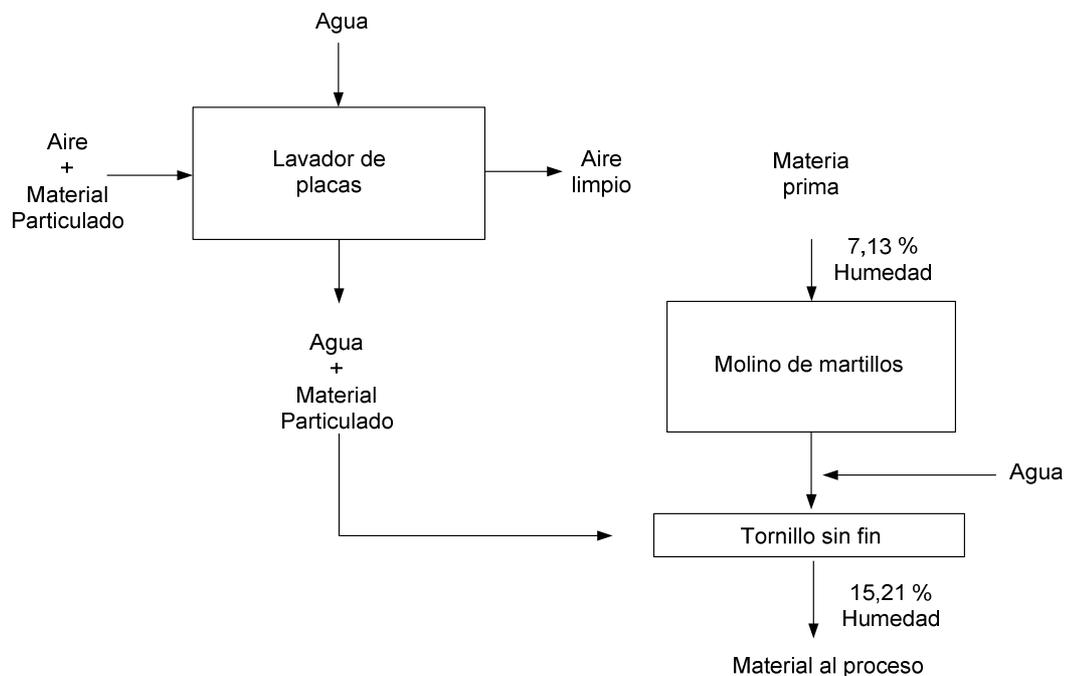


Figura 2. 3. Diagrama para el balance de masa

2.5. ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DEL SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO

Al finalizar el diseño del sistema de control para material particulado, se estableció la inversión mediante los costos de equipos, materiales para su construcción,

servicios básicos y mano de obra.

La inversión total del sistema de control para material particulado se determinó mediante la Ecuación [2.18]:

$$I_T = C_E + C_{SB} + C_{MO} \quad [2.18]$$

Donde:

I_T : inversión total

C_E : inversión de equipos (\$)

C_{SB} : inversión de servicios básicos (\$)

C_{MO} : costo mano de obra (\$)

Se determinó el beneficio de implementar el sistema de control para material particulado mediante la Ecuación [2.19]

$$B = I_{MR} + C_M \quad [2.19]$$

Donde:

B : Beneficio (\$)

I_{MR} : Ingreso material recuperado (\$)

C_M : Costo multas (\$)

El beneficio/costo de implementar el sistema de control para material particulado se determinó con la Ecuación [2.20].

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = \frac{B}{I_T} \quad [2.20]$$

Mediante la relación beneficio/costo se pudo determinar si el proyecto es económicamente rentable.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO GENERADO EN EL MOLINO DE MARTILLOS

3.1.1. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO PROCEDENTE DEL MOLINO DE MARTILLOS

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados de la concentración de material particulado.

Tabla 3. 1. Resultados de la concentración de material particulado en el ducto

| Parámetro | Valor a Condiciones Normales | Unidades |
|----------------------|------------------------------|-------------------|
| Flujo | 0,55 | m ³ /s |
| Material Particulado | 648,20 | mg/m ³ |
| Temperatura | 22,90 | ° C |

La concentración de material particulado supera en 6 veces el límite máximo permisible de 100 mg/m³ que se encuentra establecido en el Anexo 3 del Libro VI del TULMAS. El principal objetivo de este proyecto es disminuir la emisión de material particulado proveniente del molino de martillos para que la empresa logre cumplir con la norma, lo cual es factible con el diseño del lavador de placas de choque húmedas.

3.1.2. RECOLECCIÓN Y MEDICIÓN DE PARTÍCULAS DE POLVO SEDIMENTABLES

Se escogieron cuatro sitios de muestreo considerando las áreas más representativas de la planta en las cuales el material particulado constituye un

problema, para así determinar la concentración de partículas solubles e insolubles. En la Figura 3.1 se observa la distribución de las zonas y puntos de muestreo, ubicados tanto al interior como al exterior de la planta de producción.

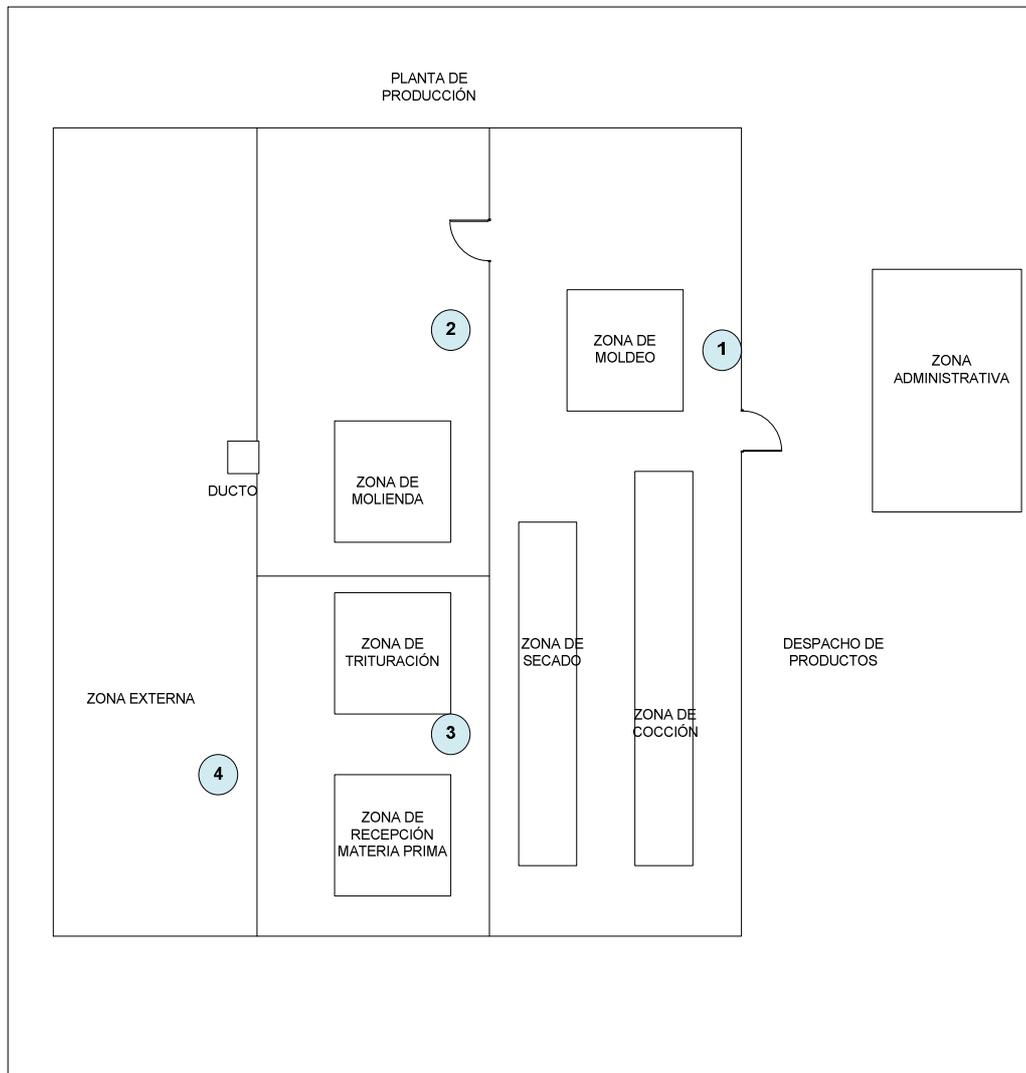


Figura 3. 1. Puntos de muestreo en la Empresa Terraforte para la medición de partículas de polvo sedimentables

Las zonas de: moldeo, molienda, trituración y zona externa corresponden a los puntos de muestreo uno, dos, tres y cuatro respectivamente.

Los resultados del ensayo para determinar la cantidad de material soluble e insoluble se presentan en la Tabla 3.2. La concentración total en cada punto se obtuvo al sumar la concentración de materia soluble e insoluble.

Tabla 3. 2. Resultados de la concentración de partículas sedimentables

| Punto de muestreo | Material insoluble (g) | Material soluble (g) | Concentración total mg/(cm² x 30d) | Valor norma mg/(cm² x 30d) |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|--|
| 1 | 0,4134 | 0,0197 | 0,574 | 1,000 |
| 2 | 2,2285 | 0,0547 | 3,025 | 1,000 |
| 3 | 0,6533 | 0,0166 | 0,888 | 1,000 |
| 4 | 4,6602 | 0,1157 | 6,328 | 1,000 |

Los resultados de los puntos 2 y 4 presentados en la Tabla 3.2 son elevados respecto al valor norma de 1 mg/cm² x 30 d establecido en el Anexo 4 del Libro VI del TULMAS. En el punto 4 se obtuvo la mayor concentración debido a que estuvo localizado afuera de la planta de producción en la misma área donde se encuentra el ducto, razón por la cual está concentración es la máxima entre los cuatro puntos. El punto 2, estuvo ubicado en el área de molienda, donde se encuentra la fuente de emisión del material particulado, por lo que este valor también es elevado. En los punto 1 y 3, se obtuvieron concentraciones bajas debido a que fueron ubicados en áreas donde existía menor cantidad de material en movimiento, área de moldeo y trituración respectivamente.

Como se observa en la Tabla 3.3 el área más grande de la Empresa Terraforte corresponde a la externa donde está ubicado el ducto (Figura 3.1). En esta zona la concentración de material particulado alcanza un valor de 245,20 g/h, que es la tasa de deposición más alta en comparación con los demás sitios de muestreo, debido a que como ya se indicó en esta área se encuentra el ducto de evacuación de material particulado.

La concentración de partículas sedimentables en las áreas correspondientes a los puntos de muestreo de la planta de producción se indican en la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Resultados de la concentración de partículas sedimentables en base al área de los puntos de muestreo de la Empresa Terraforte

| Sitio de muestreo | Punto de muestreo | Material particulado total g/(cm ² x 30d) | Área (m ²) | Concentración total (g/h) |
|---------------------|-------------------|--|------------------------|---------------------------|
| Área de moldeo | 1 | 0,4331 | 650 | 7,770 |
| Área de molienda | 2 | 2,2832 | 760 | 47,896 |
| Área de trituración | 3 | 0,6699 | 1 720 | 31,804 |
| Área externa | 4 | 4,7759 | 1 860 | 245,195 |

La concentración de material particulado proveniente del molino en el ducto es 1 282,14 g/h y la concentración de partículas sedimentables en la planta de Terraforte es 245,20 g/h, lo que indica que la principal fuente de material particulado es el molino de martillos.

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO

3.2.1. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

Debido a que la muestra contenía material fino, el primer método usado para determinar el tamaño de partícula fue el tamizado en húmedo, se realizaron dos pruebas de la muestra a la salida del ducto, los resultados del primer y segundo ensayo granulométrico se indican en la Tablas 3.4 y 3.5 respectivamente.

El tamizado en húmedo se realizó con 300 gramos de muestra con distintas mallas, la más pequeña fue la #400 con un tamaño de 38 micras.

Como se puede apreciar en las Tabla 3.4 y 3.5 en el peso retenido, alrededor del 85 por ciento de la muestra pasó el tamiz #400, es decir que la mayor parte es material fino en ambas muestras.

Tabla 3. 4. Resultados del primer ensayo del análisis granulométrico de la muestra a la salida del ducto proveniente del molino de martillos

| Malla # | Abertura (µm) | Peso retenido (g) | Porcentaje retenido (%) | Porcentaje retenido acumulado (%) | Porcentaje pasado acumulado (%) |
|---------|---------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 841 | 0,55 | 0,18 | 0,18 | 99,82 |
| 30 | 595 | 0,78 | 0,26 | 0,44 | 99,56 |
| 40 | 400 | 0,56 | 0,19 | 0,63 | 99,37 |
| 50 | 297 | 3,63 | 1,21 | 1,84 | 98,16 |
| 60 | 250 | 0,95 | 0,32 | 2,16 | 97,84 |
| 70 | 208 | 1,16 | 0,39 | 2,54 | 97,46 |
| 80 | 177 | 0,56 | 0,19 | 2,73 | 97,27 |
| 100 | 147 | 1,14 | 0,38 | 3,11 | 96,89 |
| 150 | 104 | 1,69 | 0,56 | 3,67 | 96,33 |
| 200 | 75 | 0,07 | 0,02 | 3,70 | 96,30 |
| 270 | 53 | 13,77 | 4,59 | 8,29 | 91,71 |
| 325 | 45 | 12,58 | 4,19 | 12,48 | 87,52 |
| 400 | 38 | 2,75 | 0,92 | 13,40 | 86,60 |
| < 400 | 0 | 259,81 | 86,60 | 100,00 | 0,00 |

La Figura 3.2 muestra las curvas de retenido y pasado acumulado en la primera muestra, las cuales no se cruzan debido a que como ya se dijo la mayor parte de la muestra era de tamaño inferior a 38 µm.

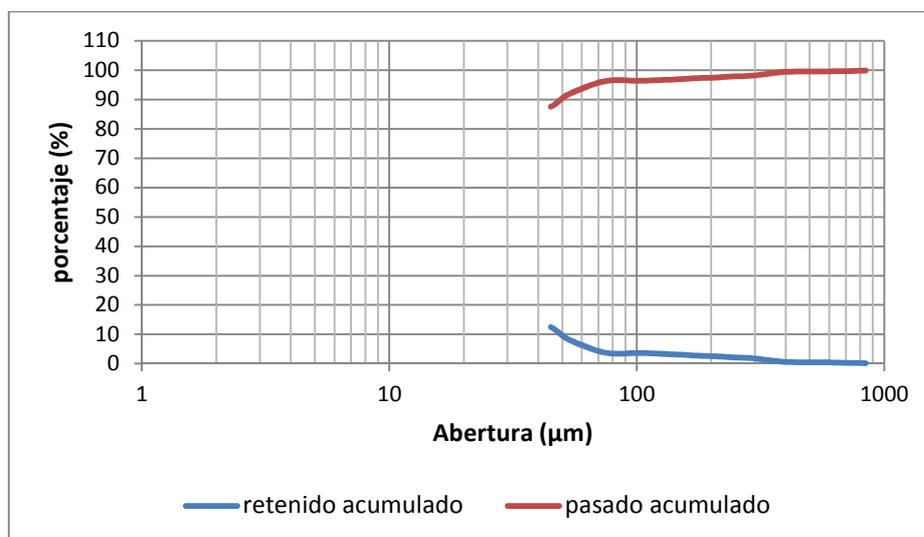


Figura 3. 2. Análisis granulométrico del primer ensayo de la muestra a la salida del ducto

Tabla 3. 5. Resultados del segundo ensayo del análisis granulométrico de la muestra a la salida del ducto

| Malla # | Abertura (μm) | Peso retenido (g) | Porcentaje Retenido (%) | Porcentaje retenido acumulado (%) | Pasado acumulado (%) |
|---------|----------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 20 | 841 | 0,99 | 0,33 | 0,33 | 99,67 |
| 30 | 595 | 1,29 | 0,43 | 0,76 | 99,24 |
| 40 | 400 | 0,85 | 0,28 | 1,04 | 98,96 |
| 50 | 297 | 3,90 | 1,30 | 2,34 | 97,66 |
| 60 | 250 | 0,97 | 0,32 | 2,67 | 97,33 |
| 70 | 208 | 1,16 | 0,39 | 3,05 | 96,95 |
| 80 | 177 | 0,74 | 0,25 | 3,30 | 96,70 |
| 100 | 147 | 1,40 | 0,47 | 3,77 | 96,23 |
| 150 | 104 | 1,81 | 0,60 | 4,37 | 95,63 |
| 200 | 75 | 3,63 | 1,21 | 5,58 | 94,42 |
| 270 | 53 | 12,76 | 4,25 | 9,83 | 90,17 |
| 325 | 45 | 13,49 | 4,50 | 14,33 | 85,67 |
| 400 | 38 | 2,30 | 0,77 | 15,10 | 84,90 |
| -400 | 0 | 254,71 | 84,90 | 100,00 | 0,00 |

La Figura 3.3 muestra las curvas de retenido y pasado acumulado en la segunda muestra, las cuales no se cruzan debido a que la mayor parte de la muestra era de tamaño inferior a $38 \mu\text{m}$.

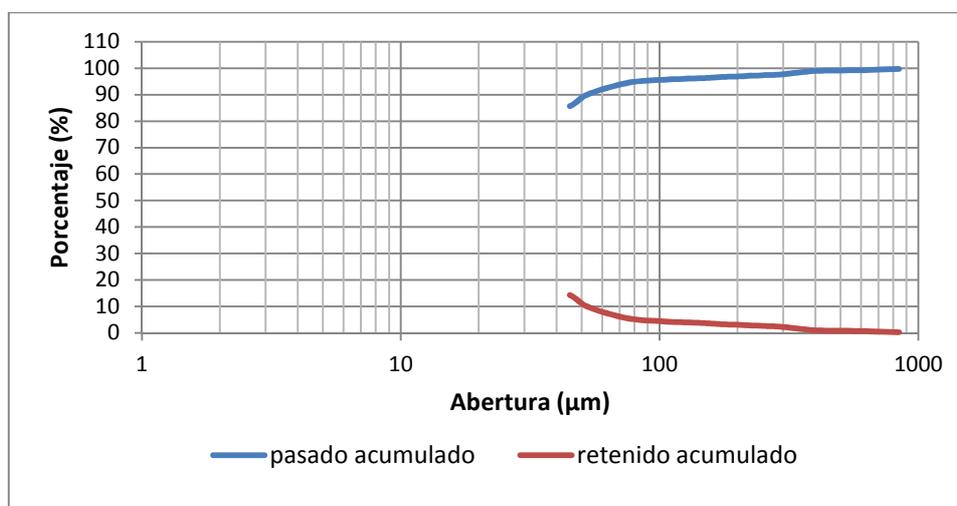


Figura 3. 3. Análisis granulométrico del segundo ensayo de la muestra a la salida del ducto

Como se puede observar en los dos ensayos de tamizado en húmedo no se pudo determinar el tamaño de partícula de la muestra, razón por la cual se determinó el tamaño de partícula por dispersión dinámica de luz cuyo resultado se muestra en el Anexo V. En la Tabla 3.6 se indica el tamaño de partícula determinado.

Tabla 3. 6. Tamaño de partícula por dispersión de luz láser

| Parámetro | Valor | Unidades |
|-----------|-------|----------|
| dp | 1,06 | μm |

El tamaño de partícula determinado fue de 1,06 micras, valor que se encuentra dentro del rango de 0,1 a 20, es decir el material se puede tratar en un colector húmedo. Este valor se utilizará para determinar el número de Stokes en la Ecuación [1.1]. (Cheremisinoff y Young, 2002, p.125).

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Los resultados de la densidad se indican en la Tabla 3.7.

Tabla 3. 7. Resultados obtenidos del análisis de la densidad de la muestra a la salida del ducto

| N° Muestra | Picnómetro vacío | Picnómetro + muestra | Picnómetro + agua+ muestra | Picnómetro + agua | Densidad muestra (g/cm ³) |
|---------------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| 1 | 23,4422 | 24,4465 | 49,0131 | 48,3917 | 2,6229 |
| 2 | 23,422 | 24,5354 | 49,0734 | 48,3844 | 2,6235 |
| 3 | 23,213 | 24,3487 | 49,0989 | 48,399 | 2,6060 |
| Promedio (Desviación Estándar) | | | | | 2,6174±0,008 |
| Coefficiente de variación (%) | | | | | 0,31 |

Como se puede apreciar los valores de densidad no varían mucho, esto se puede observar mediante el valor del coeficiente de variación (cv) que expresa la relación en porcentaje de la desviación estándar con el promedio, obteniéndose un valor del 0,31 %, lo que indica que todas las muestras presentan densidades

cercanas a la media.

El valor promedio de densidad fue usado en las ecuaciones de diseño del lavador de placas de choque húmedas, específicamente para determinar el número de Stokes con la Ecuación [1.1]

3.2.3. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

3.2.3.1. Humedad de la muestra a la salida del molino

El porcentaje de humedad de la muestra a la entrada del molino se presenta en la Tabla 3.8.

Tabla 3. 8. Resultados del ensayo de humedad de la muestra a la entrada del molino

| N° Muestra | Peso t=0 | Peso t=1 | Peso t=2 | Peso t=3 | Peso t=4 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| C1 | 10,00 | 9,28 | 9,27 | 9,27 | - |
| C2 | 10,03 | 9,31 | 9,29 | 9,29 | 9,29 |
| C3 | 10,00 | 9,32 | 9,30 | 9,29 | 9,29 |
| C4 | 10,02 | 9,30 | 9,28 | 9,28 | - |
| C5 | 10,00 | 9,30 | 9,28 | 9,28 | 9,27 |
| C6 | 10,02 | 9,27 | 9,26 | 9,26 | 9,26 |
| C7 | 10,01 | 9,32 | 9,30 | - | 9,29 |
| C8 | 10,01 | 9,30 | 9,28 | - | 9,27 |
| W promedio (g) | 10,01 | 9,30 | 9,28 | 9,28 | 9,28 |
| %Humedad promedio | - | 7,13 | 0,18 | 0,06 | 0,00 |

t: tiempo en horas

Se puede apreciar en la Tabla 3.8 que la muestra analizada fue homogénea ya que la variación del peso en cada hora es similar en todas las muestras. La humedad inicial de la muestra a la salida del molino, se determinó mediante el promedio del peso de la arcilla al tiempo cero (10,01 g) y al tiempo uno (9,30 g) mediante la Ecuación [2.4], obteniéndose una humedad de 7,13 %, dato que usará posteriormente en el balance de masa del molino.

Se determinó el contenido de humedad por diferencia de pesos a partir de la Ecuación [2.4]:

$$w = \left(\frac{10,01 - 9,30}{10,01} \right) * 100 \rightarrow w = 7,13 \%$$

3.2.3.2. Humedad de la pasta

El porcentaje de humedad de la pasta se presenta en la Tabla 3.9.

Tabla 3. 9. Resultados del ensayo de humedad de la pasta

| N° Muestra | Peso t=0 | Peso t=1 | Peso t=2 | Peso t=3 |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| C1 | 10,00 | 8,50 | 8,47 | 8,47 |
| C2 | 10,03 | 8,51 | 8,48 | 8,48 |
| C3 | 10,00 | 8,57 | 8,51 | 8,49 |
| C4 | 10,02 | 8,54 | 8,49 | 8,48 |
| C5 | 10,03 | 8,53 | 8,51 | 8,51 |
| C6 | 10,01 | 8,18 | 8,14 | 8,13 |
| C8 | 10,02 | 8,54 | 8,53 | 8,53 |
| C9 | 10,01 | 8,53 | 8,48 | 8,48 |
| C10 | 10,01 | 8,53 | 8,49 | 8,48 |
| W promedio (g) | 10,02 | 8,49 | 8,45 | 8,45 |
| % Humedad promedio | - | 15,21 | 0,43 | 0,045 |

t: tiempo en horas

La humedad promedio que posee la arcilla al salir del molino se determinó mediante el promedio del peso de la arcilla al tiempo cero (10,02 g) y al tiempo uno (8,49 g) mediante la Ecuación [2.4]. El valor es de 15,21 % ya que al agregar agua se forma la pasta que sirve de base para fabricar los productos. Este valor es próximo al rango de 16-18 % que maneja la empresa, este dato se utilizará en el balance de masa para la dosificación de material particulado al proceso.

3.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO

3.3.1. SELECCIÓN DEL EXTRACTOR

La selección del extractor centrífugo se basó en el caudal de aire, pérdidas de carga a través del ducto y de la potencia requerida. El ducto de evacuación de material particulado que actualmente tiene la Empresa Terraforte se indica en la Figura 3.4.

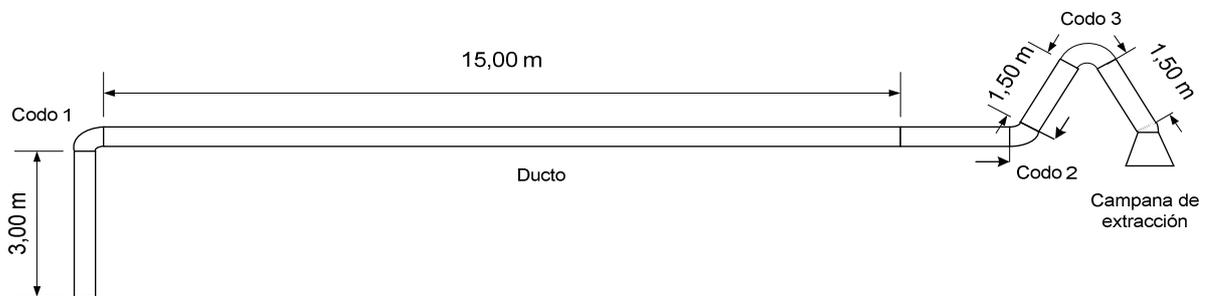


Figura 3. 4. Ducto de evacuación de material particulado

3.3.1.1. Tipo de extractor

El extractor seleccionado se ubicará en el ducto donde se transporta aire con partículas de arcilla provenientes del molino de martillos. Como se puede observar en la Tabla 1.2, en la aplicación de colectores de polvo se puede usar tanto el extractor centrífugo de aspas radiales como el de puntas radiales.

El extractor más adecuado para este proceso es el centrífugo de aspas radiales, ya que el diseño de sus aspas disminuye la acumulación de material particulado en el manejo de aire con alto contenido de polvo, lo que disminuye su mantenimiento. El extractor de aspas radiales fue descartado ya que necesitaría aspas de un material resistente para evitar la abrasión de las mismas, lo cual incrementaría su costo (Green, 1992, p. 262).

3.3.1.2. Pérdidas de carga

Pérdidas en la campana

Al desarrollar la Ecuación [2.5] se obtuvo la relación [3.1] para determinar las pérdidas de carga en la campana.

$$\Delta P_{campana} = \frac{\left(\frac{Q}{4,04 \times S}\right)^2 \times (1 + Fc)}{0,1021} \quad [3.1]$$

El factor de pérdida de carga en la campana (F_c) se determinó en la Figura 3.5 con un ángulo de abertura de la campana medido a la entrada del ducto de 84° .

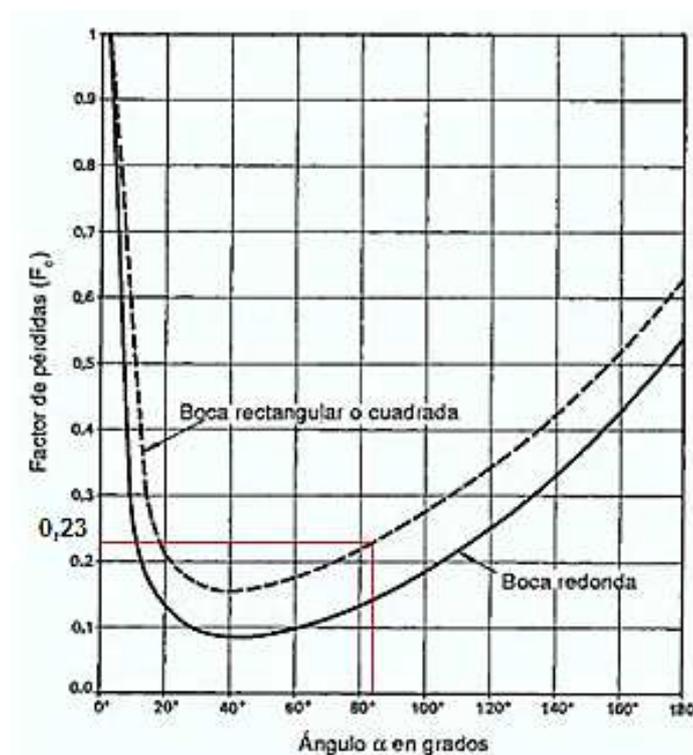


Figura 3.5. Pérdida de carga en la campana

(Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo del Gobierno de España, 2003, p. 4)

El factor de pérdida de carga en la campana (F_c) determinado fue de 0,23.

Mediante la Ecuación [3.1] se calcularon las pérdidas de carga en la campana con

un valor de 40,65 Pa.

Caída de presión en los codos

Las pérdidas en los codos se determinaron mediante la Ecuación [3.2]

$$\Delta P = K_T \left(\frac{\rho_{aire} * v^2}{2 * gc} \right) \quad [3.2]$$

La velocidad a través del ducto es 7,42 m/s, valor calculado en el Anexo VII. El sistema cuenta con 3 codos de distintos ángulos de abertura como se observa en la Figura 3.4. Las pérdidas en los codos (K_T) resulta de la suma de las pérdidas de cada codo mostrados en la Tabla 3.10.

Tabla 3. 10. Pérdidas de los codos en el ducto

| Tipo de codo | Cantidad | Pérdida (K) |
|--------------------------|----------|-------------|
| Radio Largo 90 con brida | 1 | 0,2 |
| Radio Largo 45 con brida | 1 | 0,2 |
| Curvas a 180 con brida | 1 | 0,2 |

(Munson, 1990, p. 329)

Mediante la Ecuación [3.2] se determinó la caída de presión en los codos con un valor de 19,73 Pa.

Pérdidas en el ducto

Las pérdidas en el ducto se calcularon mediante la Ecuación [3.3], ecuación de Darcy:

$$\Delta P = f * \frac{L}{D_H} * \left(\frac{\rho_{aire} * v^2}{2 * gc} \right) \quad [3.3]$$

Inicialmente se calculó el diámetro hidráulico del ducto mediante la Ecuación [3.4]:

$$D_H = \frac{2xLxW}{L + W} = \frac{2x0,4x0,2}{0,4 + 0,2} = 0,267 \text{ m} \quad [3.4]$$

Donde:

L: alto del ducto en (m)

W: ancho de ducto en (m)

El número de Reynolds determinado fue de 129360,167, valor que se encuentra en la zona turbulenta y se puede aplicar el diagrama de Moody (Figura 3.6) para determinar el factor de fricción.

La rugosidad relativa se determinó mediante la Ecuación [3.5]

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D_H} = 0,0005625 \quad [3.5]$$

Se determinó el factor de fricción mediante el número de Reynolds y la rugosidad relativa en la Figura 3.6, obteniendo un valor de $f=0,0175$.

Mediante la Ecuación [3.3] se calcularon las pérdidas a través del ducto que tuvieron un valor de 53,96 Pa.

Las pérdidas totales en el sistema del ducto se determinaron sumando las pérdidas en la campana, en los codos y en el ducto, este resultado fue de:

$$\Delta P_{\text{totales}} = 112,48 \text{ Pa}$$

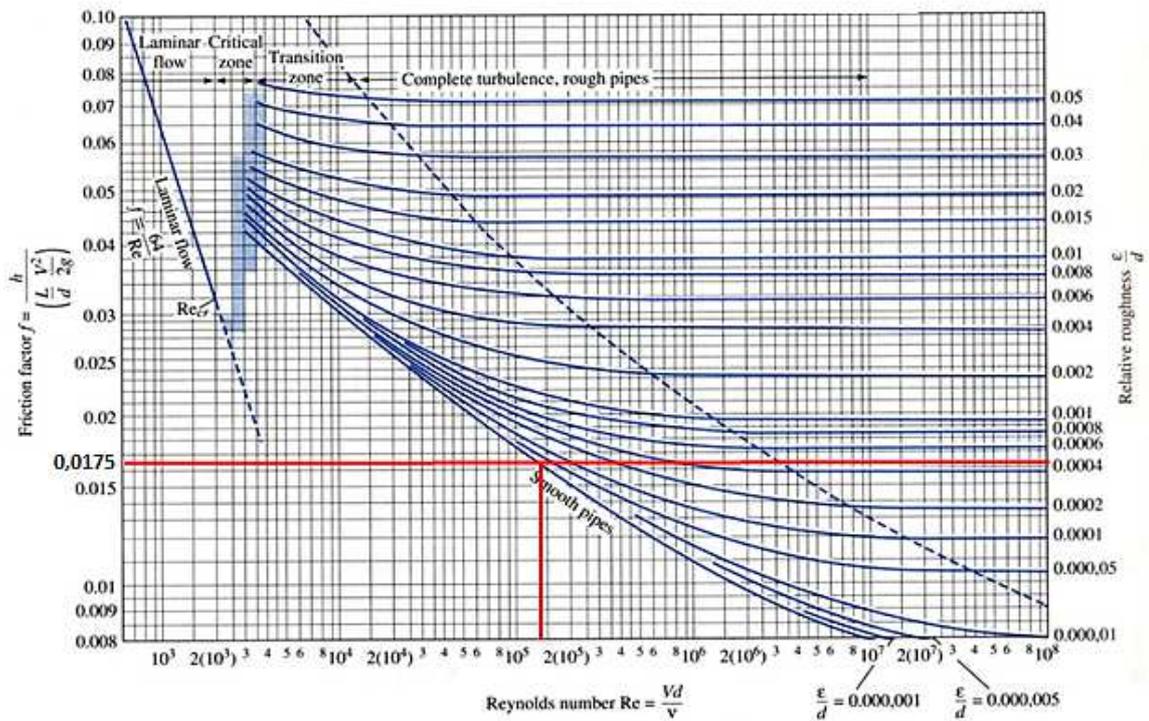


Figura 3. 6. Diagrama de Moody utilizado para determinar el factor de fricción en el ducto (Mott, 2006, p.237)

3.3.1.3. Cálculo de la potencia del extractor

La potencia del extractor queda definida principalmente por las pérdidas de carga totales en el ducto, caudal y una eficiencia del 62% (Green, 1992, p. 244).

La potencia mínima que necesita el extractor se determinó mediante la Ecuación [3.6]

$$Pot = \frac{Q * \Delta P_{totales}}{n} = \frac{0,54 \frac{m^3}{s} * 112,48 Pa}{62 \%} = 0,144 hp \quad [3.6]$$

La selección del extractor centrífugo de aspas radiales se realizó con los parámetros mostrados en la Tabla 3.11.

Tabla 3. 11. Parámetros del extractor centrífugo

| Parámetro | Valor | Unidad |
|------------------|----------|-------------------|
| Caudal | 2 137,40 | m ³ /h |
| Potencia Mínima | 0,144 | hp |
| Pérdidas totales | 112,48 | Pa |

La selección del extractor centrífugo se basó en el tamaño del ducto (20 x 40 cm), dato importante para la instalación, el caudal de 2 137, 40 m³/h y la pérdida de presión de 26 mmcda, que se muestra en la Figura AVIII.1 donde se puede apreciar el extractor centrífugo de entrada simple SA 10/6, que fue el más adecuado para estas condiciones ya que al intersecar el caudal y pérdidas de carga se determinó el menor gasto de energía, debido a que el caudal y las pérdidas de presión son pequeñas comparadas con los 7 000 m³/h y 200 mmcda que puede alcanzar dicho extractor. (Soler & Palau, 2011, p. 10)

3.3.2. DISEÑO DEL LAVADOR DE PLACAS DE CHOQUE HÚMEDAS

A continuación se presentan los resultados del diseño del lavador de placas de choque húmedas.

Cálculo del ancho del lavador de placas de choque húmedas

Se determinó el ancho del colector de placas húmedas mediante la Ecuación [3.7]

$$A = \frac{Q_2}{v} = \frac{2\,137,40 \text{ m}^3/h}{2 \frac{m}{s} * 3\,600 \frac{s}{h}} = 0,29 \text{ m}^2 \quad [3.7]$$

Se consideró un área cuadrada de lados iguales, el largo del lavador de placas luego de aplicar el factor de diseño del 10% fue:

$$L_{diseño} = 0,59 \text{ m} \approx 0,6 \text{ m}$$

Cálculo del largo del lavador de placas de choque húmedas

Para determinar el largo del lavador de placas choque húmedas se utilizaron las Ecuaciones [2.10] a la [2.12]

El tamaño de partícula y la densidad determinadas en los Literales 2.2.1 y 2.2.2 fueron de $1,06 \mu\text{m}$ y 2617 kg/m^3 respectivamente. El factor de corrección de Cunningham K_c , con un valor de 1,156 y el tamaño de gota (D_d) de $290 \mu\text{m}$ fueron determinados en el Anexo IX y Anexo X respectivamente. Todos estos datos se usaron en la Ecuación [1.1] para determinar el número de Stokes.

$$Stk = \frac{2617 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (1,059 * 10^{-6})^2 \text{ m}^2 (50 - 7,42) \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1,16}{18 * (18,14 * 10^{-6}) \text{ m} * 290 * 10^{-6} \text{ m}} = 1,56$$

Al ser el número de Stokes mayor a 1 las partículas viajan en línea recta junto al aire y estas impactarán con las gotas de agua. Este parámetro indica que la eficiencia de impactación será alta, ya que a mayor número de Stokes mayor eficiencia de impactación (Wark y Warner, 2002, p. 255).

La eficiencia de impactación se calculó con la Ecuación [2.11]

$$n_d = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,35)^2} = \frac{1,56^2}{(1,56 + 0,35)^2} = 0,67$$

El volumen de limpieza específico se determinó con la Ecuación [2.10]

$$\dot{m} = 0,67 * \frac{3}{2 * 290 * 10^{-6}} * L \rightarrow \dot{m} = 3448,92 * L$$

El volumen de limpieza específico se dejó en función del largo del lavador de placas de choque húmedas, el cual será reemplazado en la Ecuación [2.12] para determinar su longitud.

El caudal de agua (Q_d) proporcionado por los aspersores se basa en catálogos (ANEXO XI) para asegurar el caudal real, las especificaciones del aspersor usado se indican en la Tabla 3.12.

Tabla 3. 12. Especificaciones de los aspersores usados en el lavador de placas de choque húmedas

| Tamaño | Diámetro Nominal (in) | Capacidad de Flujo (gal/h) | | |
|--------|-----------------------|----------------------------|--------|---------|
| | | 30 psi | 40 psi | 100 psi |
| 26 | 0,086 | 26 | 23 | 41 |

(Spraying Systems, 2013, p. E 6)

Para determinar la longitud del lavador de placas de choque húmedas se utilizó de la Tabla 3.12 el caudal de los aspersores para las diferentes caídas de presión en la Ecuación [2.12]:

$$n_{global} = 1 - \exp\left(-n_d * \frac{3}{2 * D_d} * L * \frac{Q_d}{Q_g}\right)$$

Se tiene una eficiencia del 90 % para colectores de impactación inercial (Lipták, 1991, p. 216).

$$0,9 = 1 - \exp\left(-0,67 * \frac{3}{2 * 290 * 10^{-6}} * L * \frac{Q_d}{2 137,40 \frac{m^3}{h}}\right) \quad [3.8]$$

Como se puede observar en la Ecuación 3.8 la longitud del lavador de placas de choque húmedas queda en función del caudal de agua necesario para capturar las partículas de polvo, es así que se prueba los caudales de la Tabla 3.12 para determinar la longitud del lavador de placas de choque húmedas como se indica en la Tabla 3.13.

Tabla 3. 13. Determinación de la longitud del lavador de placas de choque húmedas mediante el caudal

| Aspersores | Presión (psi) | Qd ₁ (m ³ /h) | Qd ₆ (m ³ /h) | Longitud (m) | Longitud de diseño (m) | L/D |
|------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------|------------------------|------|
| A | 30 | 0,087 | 0,5216 | 2,74 | 3,01 | 5,02 |
| B | 40 | 0,099 | 0,5896 | 2,42 | 2,7 | 4,5 |
| C | 100 | 0,155 | 0,9312 | 1,53 | 1,7 | 2,83 |

Qd₁: Caudal de un aspersor; Qd₆: caudal de seis aspersores

El caudal necesario para determinar la longitud del lavador de placas de choque húmedas fue el correspondiente a seis aspersores, ya que con menor cantidad de aspersores la longitud aumentaba por lo que la relación L/D también aumentaba y se salía de rango.

La longitud de diseño del lavador de placas de choque húmedas se determinó con factor de diseño del 10% (Sinnott, R. 2005, p. 13).

La relación L/D se encuentra dentro del rango de 2,5 a 3,5 para equipos intermedios por lo que el aspersor seleccionado fue el C (Domingo, 2006, p.5).

El flujo de agua necesario se encuentra dentro de los rangos de 0,44 y 2,26 m³/h (Wark y Warner, 2002, p.258).

La relación longitud/ancho del lavador de placas de choque húmedas es 2,83 valor aceptable como se dijo anteriormente. La construcción de este equipo es factible ya que las dimensiones tanto de longitud y ancho abarcan el rango de las planchas de acero al carbono (1,20 m * 2,44 m) (Domingo, 2006, p.5).

Para la construcción del lavador de placas de choque húmedas son necesarias las dimensiones principales y el material, estas se encuentran resumidas en la Tabla 3.14.

Tabla 3. 14. Dimensiones del lavador de placas de choque húmedas

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------|------------------|--------|
| Longitud | 1,7 | m |
| Ancho | 0,6 | m |
| Altura | 0,6 | m |
| Material | Acero al carbono | - |
| Grosor | 3/16 | in |

Diseño de la tolva del lavador de placas de choque húmedas

La tolva se ubica en la parte inferior del lavador de placas de choque húmedas, el ancho y la longitud de la superficie superior están determinados por las dimensiones del lavador de placas. La tolva se dimensiona para 3/4 de hora con un volumen aproximado de 0,70 m³/h, se tomó como referencia este tiempo para que la tolva tenga simetría respecto al lavador de placas de choque húmedas.

Las dimensiones de la superficie inferior se determinan asumiendo una altura de 0,8 m y se determina la superficie inferior usando la ecuación de la pirámide truncada, Ecuación [3.9].

$$V = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 * A_2}) \quad [3.9]$$

Debido a que la longitud inferior de la tolva debe ser menor que la superior se asumió una medida de 1,5 m, el ancho se determina mediante la Ecuación [3.10]

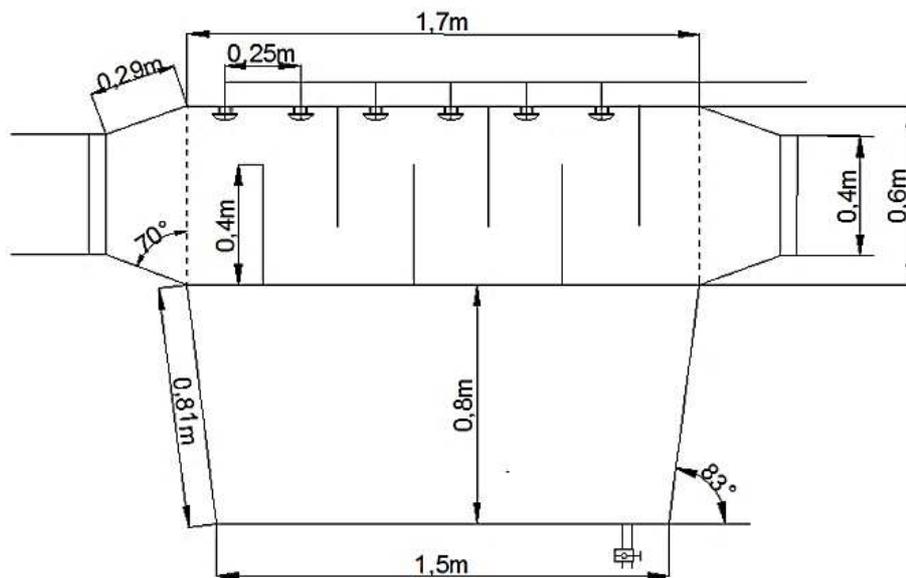
$$W = \frac{A_2}{L} = \frac{0,74 \text{ m}^2}{1,5 \text{ m}} = 0,5 \text{ m} \quad [3.10]$$

Las dimensiones de la tolva se encuentran resumidas en la Tabla 3.15.

Tabla 3. 15. Dimensiones de la tolva del lavador de placas de choque húmedas

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------------------|-------|--------|
| Longitud superior | 1,7 | m |
| Ancho superior | 0,6 | m |
| Altura | 0,8 | m |
| Longitud inferior | 1,5 | m |
| Ancho inferior | 0,50 | m |
| Ángulo de inclinación | 83 | ° |

Los esquemas tanto del lavador de placas de choque húmedas y de la tolva se muestran en la Figura. 3.7.

**Figura 3. 7.** Diseño lavador de placas de choque húmedas

3.3.3. SISTEMA DE BOMBEO

La selección de la bomba se realizó entre el tanque de almacenamiento del agua y el lavador de placas de choque húmedas, como se observa en la Figura 2.2. Para determinar la bomba adecuada para este sistema se diseñó el tanque de almacenamiento de agua.

3.3.3.1. Diseño tanque de almacenamiento de agua

Por lo general, los tanques de almacenamiento de agua, son de forma circular y con material de acero al carbono ya que no existe peligro de corrosión. El tanque debe almacenar agua por 16 horas ya que este es el tiempo de funcionamiento del molino de martillos. El volumen del tanque se determinó con la Ecuación [3.11]

$$V_{tk} = Q * t = 0,93 \frac{m^3}{h} * 16 h = 14,90 m^3 \quad [3.11]$$

Aplicando el factor de diseño del 10 %, el volumen del tanque es (Sinnott, R. 2005, p. 13):

$$V_{tk_{diseño}} = 16,39 m^3$$

La longitud del tanque se determinó con la Ecuación [3.12] y la relación longitud/ diámetro (L/D) igual a 3:1 (ICARUS Reference, 1998, p. 10.8).

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * L \rightarrow 16,38 m^3 = \frac{\pi * D^2}{4} * (3 * D) \rightarrow D = 1,9 m \quad [3.12]$$

La longitud del tanque de acuerdo a la relación (L/D) es:

$$L = 3 * D \rightarrow L = 5,7 m$$

Para el diseño del tanque de agua es importante determinar el espesor y superficie tanto de la planchas del cuerpo del tanque como de la tapa y fondo, para su construcción.

Debido a que el tanque de almacenamiento de agua es un recipiente sin presurizar, se usa la ecuación para recipientes de paredes delgadas, el espesor se determinó con la Ecuación [3.13] (Rase, 2000, p. 239).

$$e = \frac{P * D}{2(K * E) - P} + C \quad [3.13]$$

Donde:

e: espesor del recipiente (in)

P: presión de diseño (Psi)

D: diámetro interior del recipiente (in)

K: resistencia del acero al carbono (lbf/in²)

E: eficiencia de la junta o soldadura: 0,5 a 0,95

C: factor de tolerancia a la corrosión: 1/16`` a 1/8``

$$e = \frac{17,64 \text{ psi} * 74,80 \text{ in}}{2 * 19\,552,34 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} * 0,5 - 17,64 \text{ psi}} + \frac{3}{32} \text{ in} = 0,16 \text{ in}$$

El valor usado de la resistencia de acero al carbono se encuentra en la Tabla AXII.1, este dato está dado para un rango de temperatura de 0 a 50 °C con un valor de 135 N/mm² (19 552,34 lbf/in²) (Sinnott, 2005, p. 812).

El espesor del tanque se determinó para una eficiencia de soldadura (E) de 0,5 y 0,95 obteniéndose un espesor de 0,16 in y 0,13 in respectivamente.

Las planchas de acero al carbono tienen espesores estandarizados, ambos espesores se encuentra entre las planchas de 0,125 in (1/8 in) y 0,1875 in (3/16 in), se escogió la de mayor espesor (DIPAC MANTA S.A., 2013, p.1).

El espesor de la tapa plana se determinó con la Ecuación [3.14] (León, 2001, p.19).

$$t = d * \sqrt{\frac{C * P}{K * E}} \quad [3.14]$$

Donde:

C' : constante adimensional que depende de la formación de unión entre la tapa y el cilindro (Figura AXIII.1, caso A)

d : diámetro medido (Figura AXIII.1)

E : eficiencia de la junta para tapas (Figura AXIV.1, caso 1)

El espesor de la tapa plana del tanque de almacenamiento es:

$$t = 11,22 \text{ in} * \sqrt{\frac{0,13 * 17,64 \text{ psi}}{19 552,34 * 0,7}} = 0,145 \text{ in}$$

Superficie de la tapa

La superficie de la tapa se determinó con la Ecuación [3.15] (Rase, 2000, p. 250).

$$S_o = \frac{(\pi * D_B^2)}{4} \quad [3.15]$$

Donde:

D_B : diámetro equivalente en (m)

S_o : superficie de la tapa en (m²)

El diámetro equivalente se determinó mediante la Ecuación [3.16] que se usa cuando el espesor es menor a 1 in.

$$D_B = \left(\frac{25}{24}\right) * D_o + 2 * e \quad [3.16]$$

$$D_B = \left(\frac{25}{24}\right) * 1,9m + 2 * 0,0047m = 2 \text{ m}$$

Aplicando el factor de diseño del 10 %, la superficie de la tapa:

$$S_o = 1,1 * \frac{(\pi * 2^2)}{4} = 3,5 m^2$$

Las dimensiones del tanque de almacenamiento de agua se encuentran resumidas en la Tabla 3.16.

Tabla 3. 16. Dimensiones del tanque de almacenamiento de agua

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------------|-------|----------------|
| Altura | 5,7 | m |
| Diámetro | 1,9 | m |
| Espesor tapa | 3/16 | in |
| Espesor cuerpo | 3/16 | in |
| Superficie tapa | 3,5 | m ² |

El tanque de almacenamiento de agua es de 5,7 m de alto por 1,9 m de diámetro, debe entregar 0,93 m³/h durante 16 horas, ya que todo ese tiempo el lavador de placas de choque húmedas necesita agua hacia los aspersores, para controlar el material particulado generado en el molino.

3.3.3.2. Selección de la bomba

Se aplicó la ecuación de Bernoulli entre el tanque de almacenamiento de agua (punto 1) y el lavador de placas de choque húmedas más específicamente a la entrada de los aspersores (punto 2), el sistema se muestra en la Figura 2.3.

La altura de la bomba se determinó con la ecuación de Bernoulli Ecuación [3.17]

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{f_t} \quad [3.17]$$

La presión en los puntos 1 y 2 es la atmosférica, por lo que estos términos se eliminan en la Ecuación [3.17]. Si se toma como referencia el nivel del líquido del tanque de almacenamiento de agua, z_1 es igual a 0 y z_2 es 1,8 m. El término $v^2/2g$ se considera cero en ambos lados, ya que son valores menores a 0,5 que no influyen en el resultado.

Reemplazando en la Ecuación [3.17] se determinó la altura de la bomba en función de las pérdidas a lo largo de la tubería.

$$H_B = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + hf_t = 70,27 + 1,9 + hf_t \quad [3.18]$$

Donde:

$P_2 = 100$ psi , corresponde a la presión de los aspersores en catálogo.

La pérdida total a través del sistema (hf_t) mostrado en la Figura 2.2 se determinó con la suma de las pérdidas en la tubería de succión y descarga.

$$hf_t = hf_{succión} + hf_{descarga} \quad [3.19]$$

Para determinar las pérdidas tanto en la tubería de succión como en la de descarga se seleccionaron diámetros para las tuberías, para la de succión el diámetro nominal fue 3/4 in debido a que el caudal es menor de 3 m³/h, mientras que para la descarga corresponde al diámetro comercial inmediatamente superior en este caso 1/2 in. La tubería de succión y la de descarga son 3 m y 10 m respectivamente. Las pérdidas de carga por accesorios se deben a 4 codos y 1 válvula de globo. (INAA, 1999, p.31; Wekker, 2004, p.2).

Además, se aplicó la ecuación de continuidad Ecuación [3.20] a la entrada y salida de la bomba (punto 3 y 4) de la Figura 2.2

$$Q_3 = Q_4 \rightarrow v_3 * A_3 = v_4 * A_4 \quad [3.20]$$

Con lo que la velocidad en el punto 4 quedó en función de la velocidad en el punto 3 mediante la Ecuación [3.21].

$$v_4 = 2,25 * v_3 \quad [3.21]$$

Los coeficientes de los accesorios de la tubería del sistema tanque de almacenamiento y lavador de placas de choque húmedas se indican en la Tabla 3.17.

Tabla 3. 17. Pérdidas de carga en los accesorios a través de la tubería

| Accesorio | Pérdida | Coefficiente |
|-----------------------|---------|--------------|
| Expansión | 1,00 | K_1 |
| Codo 1 | 0,75 | K_2 |
| Codo 2 | 0,75 | K_3 |
| Codo 3 | 0,75 | K_4 |
| Codo 4 | 0,75 | K_5 |
| Válvula globo abierta | 6,00 | K_6 |

(García, 2006, p.91)

Las pérdidas de carga totales a través del ducto se determinaron mediante la Ecuación [3.22]

$$hf_t = K_1 * \frac{v_3^2}{2g} + \frac{f_{D3}}{D_3} * L_3 * \frac{v_3^2}{2g} + (K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6) * \frac{v_4^2}{2g} + \frac{f_{D4}}{D_4} * L_4 * \frac{v_4^2}{2g} \quad [3.22]$$

Reemplazando la Ecuación [3.21] y las pérdidas de carga en cada accesorio especificadas en la Tabla 3.17 se obtuvieron las pérdidas totales en función de una sola velocidad (v_3), tal como se muestra en la Ecuación [3.23]

$$hf_t = 2,38 * v_3^2 + 8,035 * v_3^2 * f_{D3} + 203,38 * v_3^2 * f_{D4} \quad [3.23]$$

En la Ecuación [3.24], se observa que la altura de bomba para el sistema tanque de almacenamiento de agua y lavador de placas de choque húmedas quedó en

función de la velocidad en el punto 3 y del factor de fricción tanto de la tubería de succión como la de descarga.

$$H_B = 70,74 + 2,38 * v_3^2 + 8,035v_3^2 * f_{D3} + 203,38 * v_3^2 * f_{D4} \quad [3.24]$$

El número de Reynolds para la tubería de succión con un diámetro de 3/4 in fue de 18 661,834 v_3 y para la tubería de descarga con un diámetro de 1/2 in fue de 27 992,75 v_3 , los cálculos se encuentran en el Anexo XV.

La rugosidad relativa se calculó para cada tubería a partir del diámetro de la tubería y del tipo de material (hierro galvanizado) mediante las Ecuaciones [3.25] y [3.26] (Mott, 2006, p.235)

Tubería de succión

$$\frac{\varepsilon}{D_1} = \frac{0,15 * 10^{-3} m}{\frac{3}{4} * 0,0254 m} = 0,00787 \quad [3.25]$$

Tubería de descarga

$$\frac{\varepsilon}{D_2} = \frac{0,15 * 10^{-3} m}{\frac{0,0254}{2} m} = 0,0118 \quad [3.26]$$

Para determinar la altura de bomba en el sistema tanque de almacenamiento y lavador de placas de choque húmedas, se elaboró la curva del sistema, mediante diferentes caudales de agua, que se encuentran en la Tabla AXVI.1, se calculó el número de Reynolds para cada tubería, con estos valores y la rugosidad relativa se determinó el factor de fricción en el Diagrama de Moody, este fue reemplazado junto a la velocidad en la Ecuación 3.24. Con los datos anteriores, se elaboró la Figura AXVI.1, donde la altura de bomba mínima determinada fue 80 m para un caudal necesario de 0,93 m³/h, resultados que se encuentran en la Tabla AXVI.1 y en la Figura AXVI.1

En la Figura 3.8 se muestra la gráfica del fabricante (color azul) que se obtuvo con el programa WINCAPS, la bomba CM 1-8 es la que más se adapta a las condiciones de trabajo ya que funciona a un caudal de $0,985 \text{ m}^3/\text{h}$ con una altura de bomba de $89,7 \text{ m}$, valores cercanos al experimental (punto 1), por lo que fue la seleccionada.

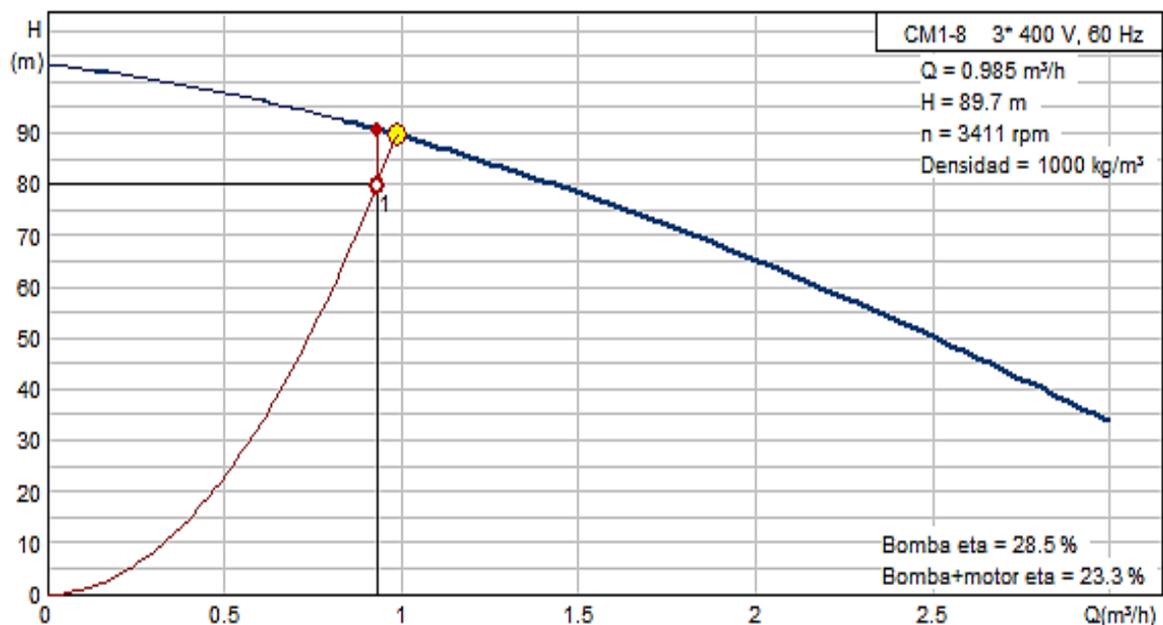


Figura 3. 8. Altura de bomba

Los aspersores son los elementos que generan mayor pérdida de carga en el sistema, ya que la trabajar a 100 psi generan una pérdida de carga de $70,74 \text{ m}$, mientras que los accesorios y el ducto generan alrededor del 10% de pérdidas totales.

Al intersecar la curva del fabricante con la del sistema en la Figura 3.8 se obtuvo el punto de operación de la bomba con un caudal óptimo de $0,985 \text{ m}^3/\text{h}$ a una altura de bomba de $89,7 \text{ m}$. Con estos datos se determinó la potencia hidráulica mínima mediante la Ecuación [2.17] (Mott, 2006, p.410):

$$Pot = 89,7m * 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,8 \frac{m}{s^2} * 0,27 \frac{l}{s} * \frac{m^3}{1000l} = 237,35 W$$

La potencia real de la bomba centrífuga se calculó con la Ecuación [3.27]

$$Pot_R = \frac{Pot_H}{\eta} = \frac{237,35 W}{0,7} = 339,07 W \quad [3.27]$$

Donde:

Pot_R : potencia real de la bomba (W)

η : rendimiento de la bomba centrífuga (Mott, 2006, p.208)

Con las características mostradas en la Tabla 3.18 se seleccionó la bomba centrífuga CM 1-8 mediante el programa WINCAPS, a partir del caudal y la altura de bomba. Sus especificaciones se encuentran en el Anexo XVII.

Tabla 3. 18. Características de la bomba centrífuga

| Parámetro | Valor | Unidad |
|--------------|-------|-------------------|
| Altura bomba | 80 | m |
| Caudal | 0,93 | m ³ /h |

3.3.4. DISEÑO DEL SEDIMENTADOR

El sedimentador donde se depositarán los lodos fue dimensionado usando las Ecuaciones [1.5] a la [1.8].

Primero se determinó la velocidad crítica de arrastre a partir de la Ecuación [1.7]

$$V_{CR} = \frac{9,8 \frac{m}{s} * (1,06 * 10^{-6})^2 (2\ 617,4 - 1\ 000) \frac{kg}{m^3}}{18 * 10,2 * 10^{-4} \frac{kg}{m^3}} = 9,67 * 10^{-7} \frac{m}{s}$$

El coeficiente de arrastre (C_D) se calculó mediante la Ecuación [1.6]:

$$C_D = \frac{24}{2,63 * 10^{-6}} + \frac{3}{\sqrt{2,63 * 10^{-6}}} + 0,34 = 9138\ 009$$

La velocidad final de la partícula se calculó con la Ecuación [1.5]

$$V_c = \frac{4}{3} * \frac{(2\ 617,4 - 1\ 000) \frac{kg}{m^3} * 1,06 * 10^{-6} m}{9138\ 009 * 1\ 000 \frac{kg}{m^3}} = 2,45 * 10^{-6} \frac{m}{s}$$

Romero (2001), recomienda que la velocidad se corrija con un factor de 15 % de acuerdo a la Ecuación [3.28] (p.641)

$$V_s = \frac{V_c}{15} = \frac{2,45 * 10^{-6} \frac{m}{s}}{15} = 1,63 * 10^{-7} \frac{m}{s} \quad [3.28]$$

La velocidad de sedimentación de la partícula tiene un valor pequeño comparado con el rango de 0,8 y 0,015 cm/s para partículas finas, esto indica que el tiempo de retención en el sedimentador será muy elevado. (Organización Mundial de la Salud, p. 11, p 2005).

El área del sedimentador se determinó mediante la Ecuación [3.29]

$$A = \frac{Q}{V_s} = \frac{0,93 \frac{m^3}{h} * \frac{1\ h}{3600\ s}}{1,63 * 10^{-7} \frac{m}{s}} = 1\ 584,20\ m^2 \quad [3.29]$$

El área para el sedimentador es 1 584,20 m² para 1,25 kg de lodos a tratar determinados en el Literal 3.4. Su construcción no es factible debido a que el tiempo de retención es un valor elevado como se observa en la Ecuación [3.30].

$$T_o = \frac{A * H}{Q} = \frac{1584,20\ m^2 * 1,5\ m}{0,93 \frac{m^3}{h}} = 2\ 555,16\ h \quad [3.30]$$

La altura (H) se encuentra en el rango de 1,5 a 2,5 m, el valor de 2,5 m resulta en un tiempo de retención mayor, por lo que en cualquiera de los dos casos el tiempo de retención es elevado. (Organización Mundial de la Salud, p. 18, p 2005)

Por lo expuesto, para el almacenamiento de lodos se optó por un tanque que se dimensionará en función de la cantidad de lodos que regresará al proceso productivo determinado en el Literal [3.4]

Tanque de almacenamiento para lodos

El tanque de almacenamiento para lodos se ubica después de la tolva y proporciona alrededor del 30 % de agua a la siguiente etapa del proceso por 16 horas, tiempo de operación del molino. El volumen del tanque se determinó mediante la Ecuación [3.31]:

$$V_{tk} = 0,28 \frac{m^3}{h} * 16h = 4,48 m^3 \quad [3.31]$$

Aplicando el factor de diseño del 10 %, el volumen del tanque es (Sinnott, 2005, p.13):

$$V_{tk_{diseño}} = 4,93 m^3$$

La longitud del tanque se determinó con la Ecuación [3.32] y la relación longitud/ diámetro (L/D) igual a 3:1 (ICARUS Reference, 1998, p. 10.8).

$$V = \frac{\pi * D^2}{4} * L \quad 4,93 m^3 = \frac{\pi * D^2}{4} * (3 * D) \rightarrow D = 1,3 m \quad [3.32]$$

La longitud del tanque de acuerdo a la relación (L/D) es:

$$L = 3 * D \rightarrow L = 3,8 m$$

Para el diseño del tanque de lodos es importante determinar el espesor y superficie tanto de la planchas del cuerpo del tanque como de la tapa y fondo, para su construcción.

Debido a que el tanque de almacenamiento de agua es un recipiente sin presurizar, se usa la ecuación para recipientes de paredes delgadas, el espesor se determinó con la Ecuación [3.33] (Rase, 2000, p. 239).

$$e = \frac{P * D}{2(K * E) - P} + C \quad [3.33]$$

Donde:

e: espesor del recipiente (in)

P: presión de diseño (Psi)

D: diámetro interior del recipiente (in)

K: resistencia del acero al carbono (lbf/in²)

E: eficiencia de la junta o soldadura: 0,5 a 0,95

C: factor de tolerancia a la corrosión: 1/16`` a 1/8``

$$e = \frac{17,64 \text{ psi} * 50,39 \text{ in}}{2 * 1 \text{ 9552,34} \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} * 0,5 - 17,64 \text{ psi}} + \frac{1}{8} \text{ in} = 0,16 \text{ in}$$

El espesor del tanque se determinó para una eficiencia de soldadura de 0,5 y 0,95 obteniéndose un espesor de 0,17 in y 0,15 in respectivamente.

Las planchas de acero al carbono tienen espesores estandarizados, ambos espesores se encuentra entre las planchas de 0,125 in (1/8 in) y 0,1875 IN (3/16 in), se escogió la de mayor espesor.

El espesor de la tapa plana se determinó con la Ecuación [3.34] (León, 2001, p.19).

$$t = d * \sqrt{\frac{C * P}{K * E}} \quad [3.34]$$

Donde:

C' : constante adimensional que depende de la formación de unión entre la tapa y el cilindro (Figura AXIII.1, caso A)

d : diámetro medido (Figura AXIII.1)

E : eficiencia de la junta para tapas (Figura AXIV.1, caso 1)

El espesor de la tapa plana del tanque de almacenamiento es:

$$t = 7,7 \text{ in} * \sqrt{\frac{0,13 * 17,64 \text{ psi}}{1\ 9552,34 * 0,7}} = 0,099 \text{ in}$$

El espesor para la tapa del tanque de almacenamiento de lodos es 1/8 in valor estandarizado de espesor en las planchas de acero.

Superficie de la tapa

La superficie de la tapa se determinó con la Ecuación [3.35] (Rase, 2000, p. 250).

$$S_o = \frac{(\pi * D_B^2)}{4} \quad [3.35]$$

Donde:

D_B : diámetro equivalente en (m)

S_o : superficie de la tapa en (m²)

El diámetro equivalente se determinó mediante la Ecuación [3.36] que se usa cuando el espesor es menor a 1 in.

$$D_B = \left(\frac{25}{24}\right) * D_o + 2 * e \quad [3.36]$$

$$D_B = \left(\frac{25}{24}\right) * 1,28m + 2 * 0,003175m = 1,34 m$$

Aplicando el factor de diseño del 10 %, la superficie de la tapa:

$$S_o = 1,1 * \frac{(\pi * 1,34^2)}{4} = 1,55 m^2$$

Las dimensiones del tanque de almacenamiento de lodos se encuentran resumidas en la Tabla 3.19.

Tabla 3. 19. Dimensiones del tanque de almacenamiento de lodos

| Parámetro | Valor | Unidad |
|-----------------|-------|----------------|
| Altura | 3,8 | m |
| Diámetro | 1,3 | m |
| Espesor tapa | 1/8 | in |
| Espesor cuerpo | 3/16 | in |
| Superficie tapa | 1,55 | m ² |

El tanque de almacenamiento de lodos es de 3,8 m de alto por 1,3 m de diámetro, debe entregar 0,28 m³/h de agua al próximo proceso que es el mezclado de la arcilla con agua.

El tanque debe ser elevado para que los lodos caigan por gravedad al proceso, el número de soportes que necesita el tanque es 4, ya que este criterio se utiliza para recipientes con un diámetro interno mayor a 914mm (Martínez, Cortéz y Pérez, 2009, p. 20).

El tanque de almacenamiento de agua y el tanque de almacenamiento de lodos se indican en la Figura 3.9

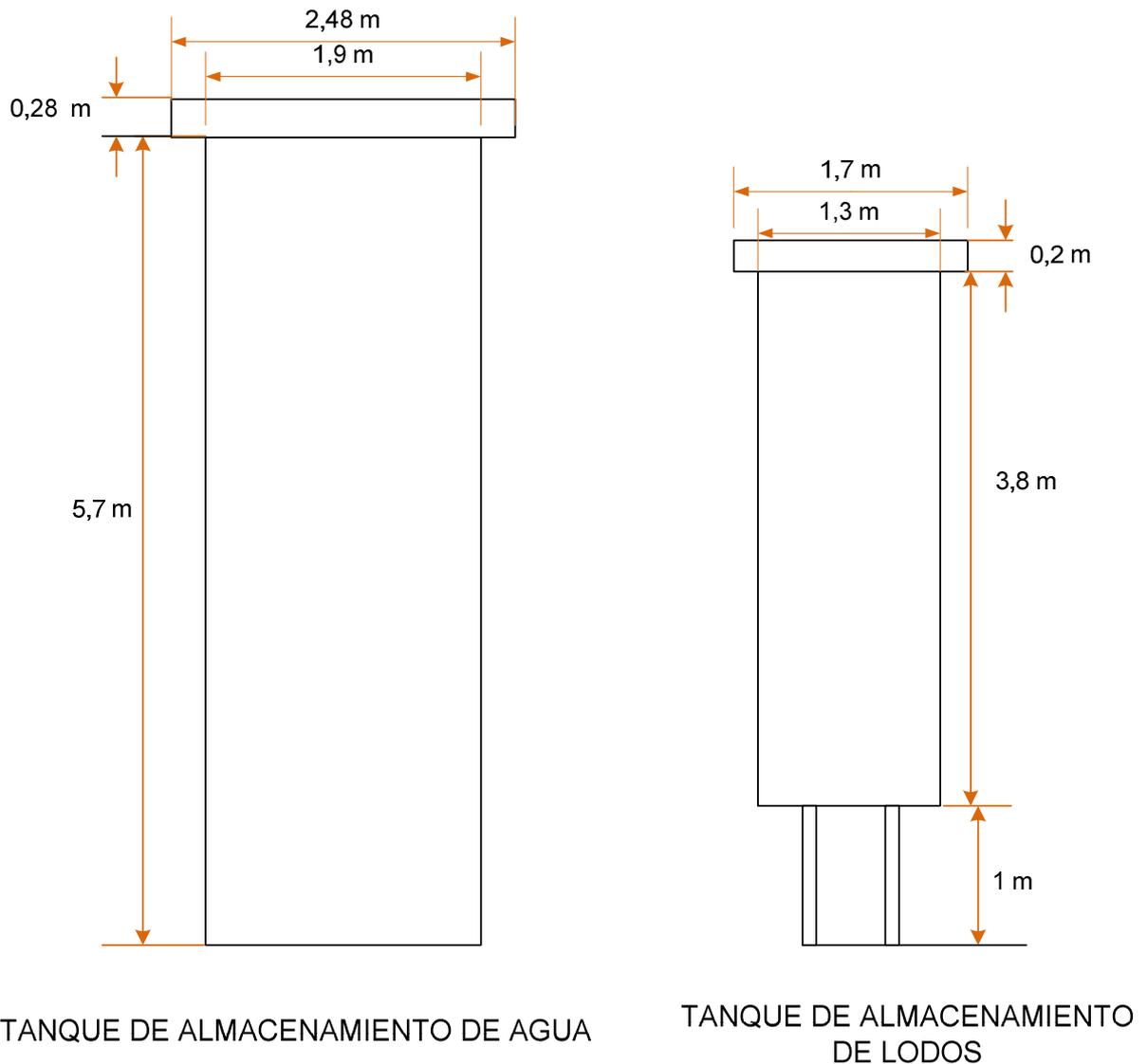


Figura 3. 9. Tanque de almacenamiento de agua y tanque de almacenamiento de lodos

Selección de la bomba entre la tolva y el tanque de lodos

Para la selección de la bomba entre la tolva (punto 1) y el tanque de almacenamiento de lodos (punto 2) se aplicó la Ecuación [3.37]. El sistema se puede observar en la Figura 3.10

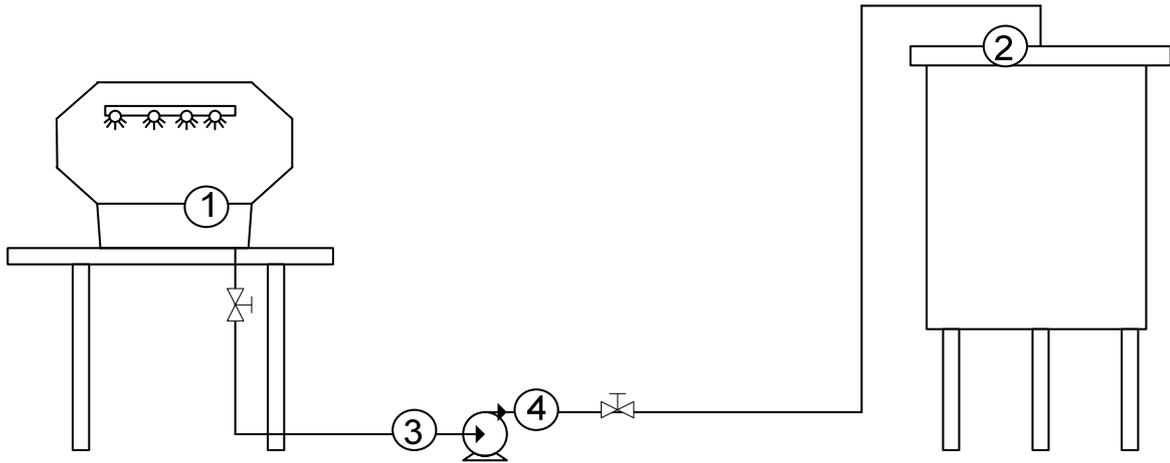


Figura 3. 10. Puntos analizados en el sistema del colector húmedo y tanque de almacenamiento de lodos

En la Figura 3.10 se analizan los puntos 1 y 2 mediante la Ecuación de Bernoulli. El punto 1 se encuentra en el nivel superior la tolva del lavador de placas de choque húmedas y el punto 2 está ubicado a la entrada del tanque de almacenamiento de lodos, mientras que el punto 3 y 4 se encuentran ubicados a la entrada y salida de la bomba (Mott, 2006, p. 170).

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf_t \quad [3.37]$$

El procedimiento para el cálculo de la altura de bomba en el sistema tolva-tanque de almacenamiento de lodos es similar al aplicado en el sistema tanque de almacenamiento para agua y lavador de placas de choque húmedas.

La presión en los puntos 1 y 2 es la atmosférica, por lo que estos términos se eliminan en la Ecuación [3.38]. Si se toma como referencia el nivel del líquido en la tolva, z_1 es igual a 0 y z_2 es 0,9 m. El término $v^2/2g$ se considera cero en ambos lados, ya que son valores menores a 0,5 que no influyen en el resultado.

Reemplazando en la Ecuación [3.38] se determinó la altura de la bomba en función de las pérdidas.

$$H_B = 0,9 + hf_t \quad [3.38]$$

Las pérdidas de carga por accesorios en la tubería de succión y descarga se debe a 4 codos y 2 válvulas de globo. Las pérdidas en la tubería de succión se basaron en una longitud y diámetro de 2,8 m y 3/4 in, para la tubería de succión y para la de descarga en una longitud y diámetro de 8,25 m y 1/2 in, ya que el caudal que se necesita bombear es de 0,93 m³/h y la tubería de succión debe ser más grande que la de descarga. (INAA, 1999, p.31; Wekker, 2004, p.2).

Mediante los cálculos que se encuentran en el Anexo XVIII, se llegó a una altura de bomba dada por la Ecuación [3.39]

$$H_B = 0,9 + 2,88 * v_3^2 + 7,499 * v_3^2 * f_{D3} + 137,28 * v_3^2 * f_{D4} \quad [3.39]$$

El número de Reynolds para la tubería de succión con un diámetro de 3/4 in fue de 18 661,834 v₃ y para la tubería de descarga con un diámetro de 1/2 in fue de 27 992,75 v₃, los cálculos se encuentran en el Anexo XV.

La rugosidad relativa para la tubería de succión fue de 0,00787 y para la de descarga fue de 0,0118, los cálculos se encuentran en el Anexo XVIII.

Para determinar la altura de bomba en el sistema tolva y tanque de almacenamiento de lodos, se elaboró la curva del sistema, mediante diferentes caudales de agua, que se encuentran en la Tabla AXVIII.2, se calculó el número de Reynolds para cada tubería, con estos valores y la rugosidad relativa se determinó el factor de fricción en el Diagrama de Moody, este fue reemplazado junto a la velocidad en la Ecuación 3.39 y se obtuvo la altura de bomba para cada caudal. Con los datos anteriores se elaboró la Figura 3.11 a partir de la cual se determinó para el sistema tolva y tanque de almacenamiento de lodos una altura mínima de 8,2 m para un caudal de 0,93 m³/h (0,25 l/s).

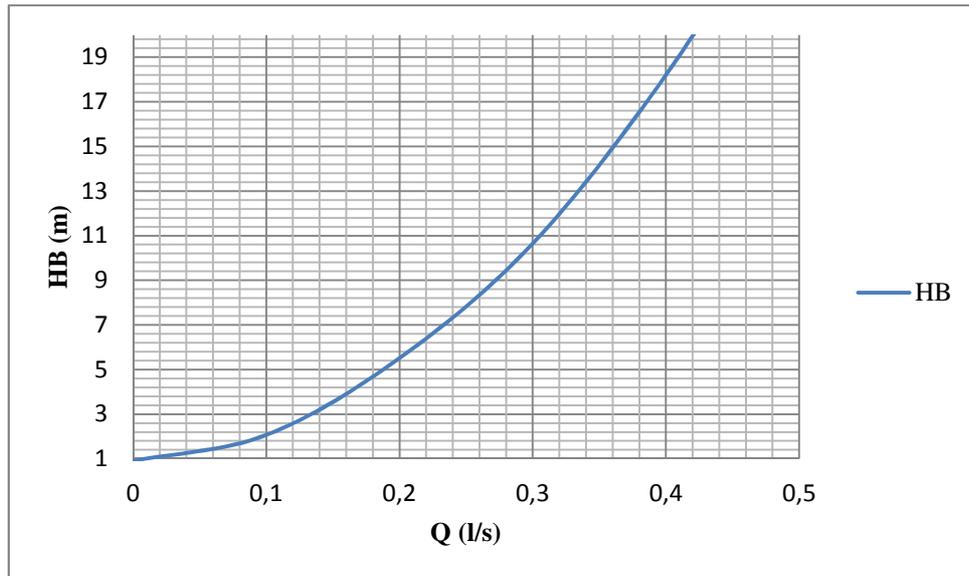
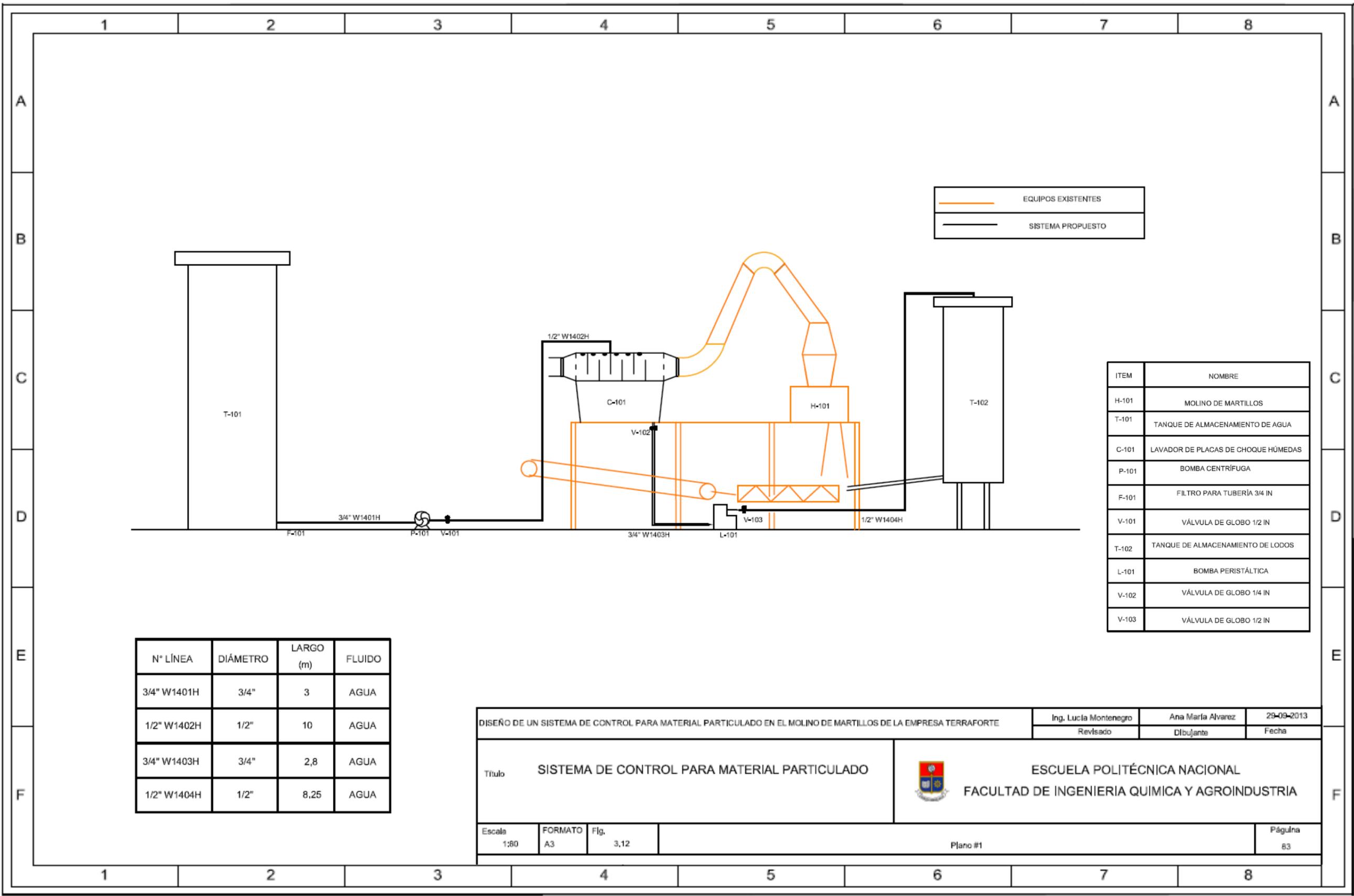


Figura 3. 11. Altura de bomba vs. caudal para el sistema tolva-tanque de almacenamiento de lodos

La bomba que se debe usar en este caso es de doble diafragma debido a que la bomba transporta agua con arcilla y este material es abrasivo. Esta bomba posee un elastómero en su interior que impide que se desgaste las partes internas de la bomba (Mott, 2006, p.390).

Para un caudal de $0,93 \text{ m}^3/\text{h}$ se necesita una altura de bomba de 8,2 m, valores proporcionados por la bomba seleccionada.

El sistema de control para material particulado se presenta en la Figura 3.12.



| | |
|--|--------------------|
| | EQUIPOS EXISTENTES |
| | SISTEMA PROPUESTO |

| ITEM | NOMBRE |
|-------|-------------------------------------|
| H-101 | MOLINO DE MARTILLOS |
| T-101 | TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA |
| C-101 | LAVADOR DE PLACAS DE CHOQUE HÚMEDAS |
| P-101 | BOMBA CENTRÍFUGA |
| F-101 | FILTRO PARA TUBERÍA 3/4 IN |
| V-101 | VÁLVULA DE GLOBO 1/2 IN |
| T-102 | TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LODOS |
| L-101 | BOMBA PERISTÁLTICA |
| V-102 | VÁLVULA DE GLOBO 1/4 IN |
| V-103 | VÁLVULA DE GLOBO 1/2 IN |

| N° LÍNEA | DIÁMETRO | LARGO (m) | FLUIDO |
|-------------|----------|-----------|--------|
| 3/4" W1401H | 3/4" | 3 | AGUA |
| 1/2" W1402H | 1/2" | 10 | AGUA |
| 3/4" W1403H | 3/4" | 2,8 | AGUA |
| 1/2" W1404H | 1/2" | 8,25 | AGUA |

| | | | | |
|--|------------|--|-------------------|------------|
| DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO EN EL MOLINO DE MARTILLOS DE LA EMPRESA TERRAFORTE | | Ing. Lucia Montenegro | Ana Maria Alvarez | 29-09-2013 |
| | | Revisado | Dibujante | Fecha |
| Titulo SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO | | ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y AGROINDUSTRIA | | |
| Escala 1:80 | FORMATO A3 | Fg. 3,12 | Página 83 | |
| Plano #1 | | | | |

3.4. DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE LODOS EN EL PROCESO PRODUCTIVO

Para determinar la cantidad de lodos que retornarán al proceso productivo se realizaron balances de masa (ANEXO XIX) en los subsistemas del sistema global que abarca el lavador de placas de choque húmedas, molino de martillos y tornillo sin fin mostrado en la Figura 2.3.

Se realizó un balance en el molino con base de una hora de operación, sin la corriente del colector húmedo, para determinar la cantidad de agua adicionada al proceso. La cantidad de arcilla que ingresa al molino es de 2,5 ton/hora con una humedad de 7,13 %, determinada en el Literal 3.2.3.1, y la humedad con la que sale la arcilla del molino es 15,2 %, determinada en el Literal 3.2.3.2. Las corrientes se muestran en la Figura 3. 13.

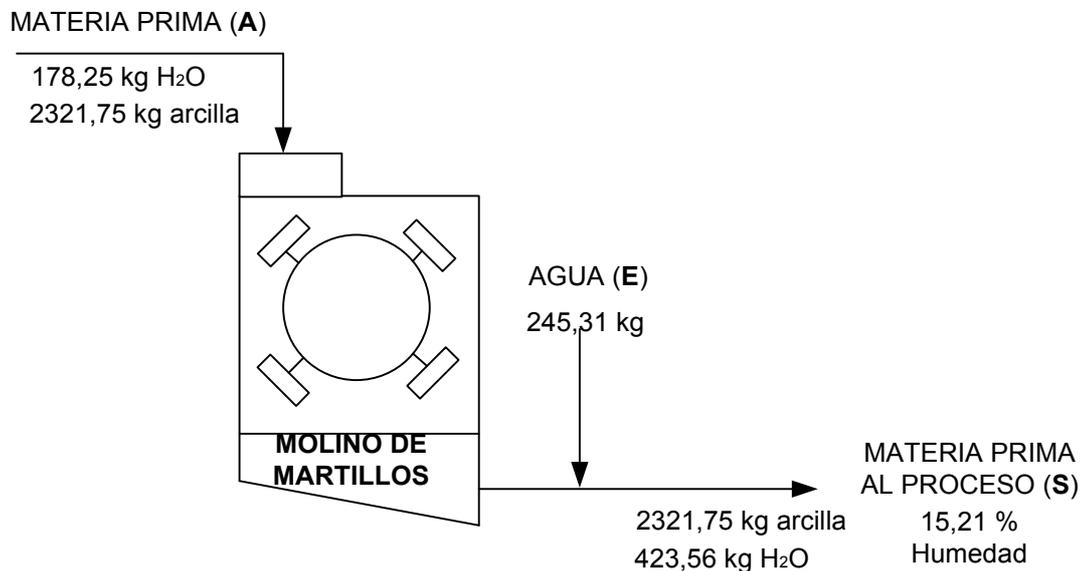


Figura 3. 13. Balance de masa en el molino

Una vez realizado el balance de masa en el molino de martillos se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.20.

Tabla 3. 20. Resultados del balance de masa en el molino

| Corriente | Agua (kg) | | Arcilla (kg) | | Porcentaje de Humedad (%) |
|-------------------|-----------|--------|--------------|----------|---------------------------|
| | Entrada | Salida | Entrada | Salida | |
| A | 178,25 | - | 2 321,75 | - | 7,13 |
| E | 245,31 | - | - | - | |
| S | - | 423,56 | - | 2 321,75 | 15,21 |
| Total (kg) | 423,56 | 423,56 | 2 321,75 | 2 321,75 | |

Se realizó el balance de masa en el lavador de placas de choque húmedas para determinar la cantidad que regresará al proceso productivo. Las corrientes se muestran en la Figura 3.14.

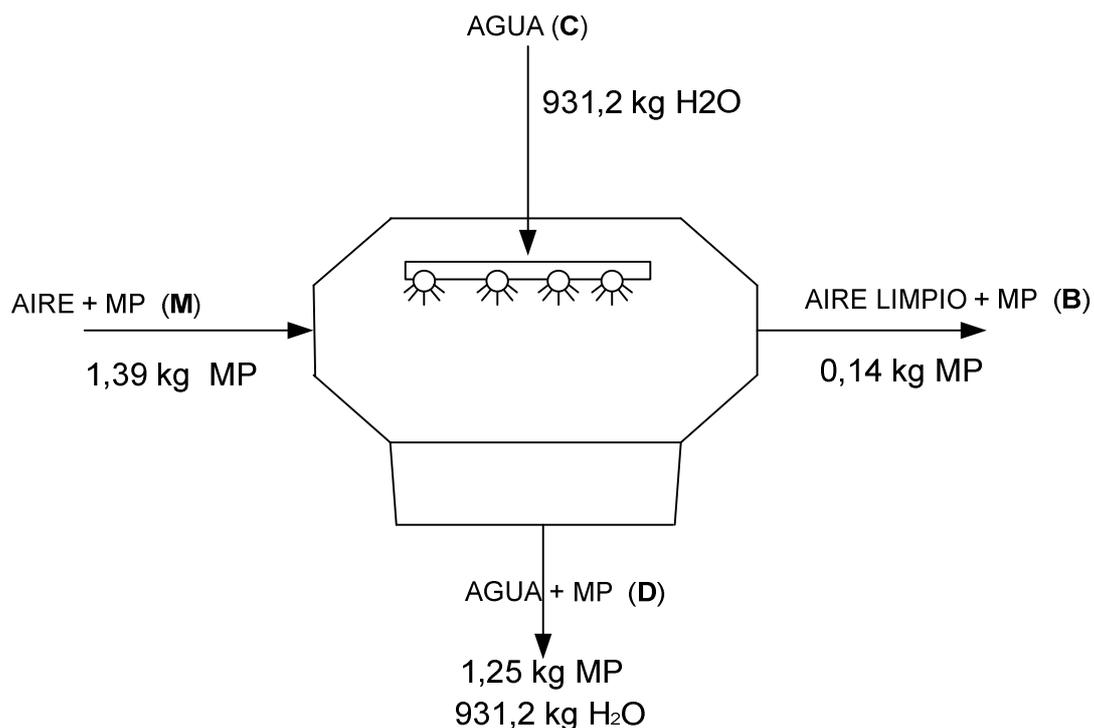


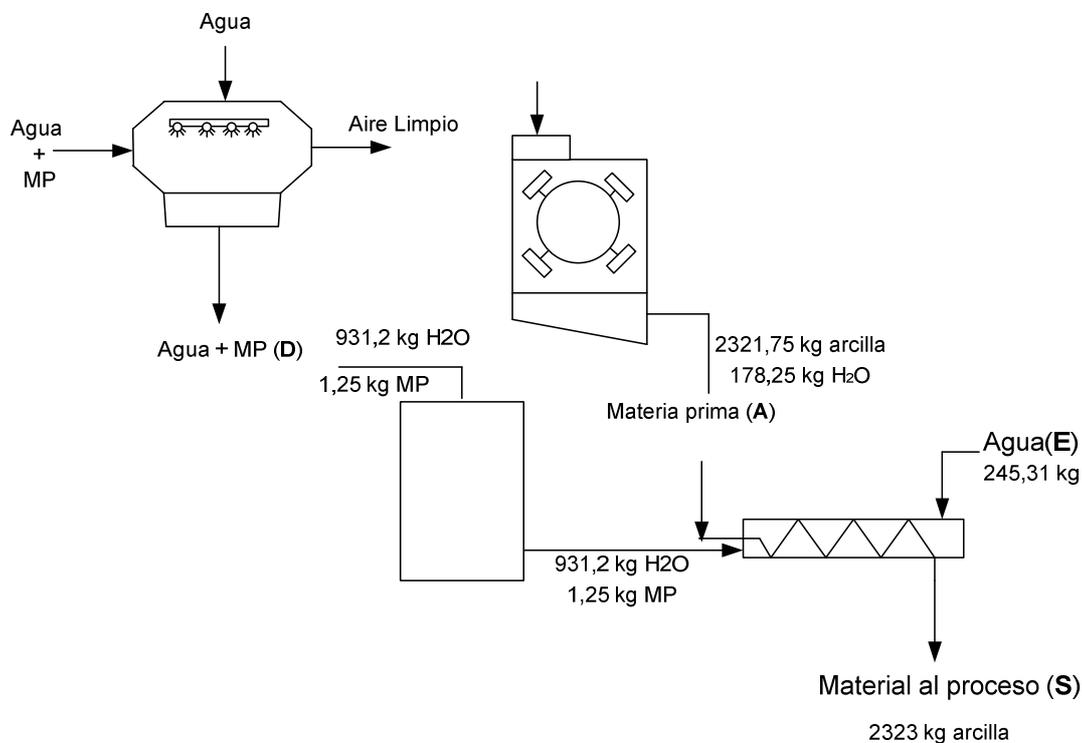
Figura 3. 14. Balance de masa en el lavador de placas de choque húmedas

Una vez realizado el balance de masa en el lavador de placas de choque húmedas se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.21.

Tabla 3. 21. Resultados del balance de masa en el lavador de placas de choque húmedas

| Corriente | Agua (kg) | | Material Particulado (kg) | |
|-------------------|-----------|--------|---------------------------|--------|
| | Entrada | Salida | Entrada | Salida |
| M | - | - | 1,39 | |
| B | - | - | - | 0,14 |
| C | 931,2 | - | - | |
| D | - | 931,2 | - | 1,25 |
| Total (kg) | 931,2 | 931,2 | 1,39 | 1,39 |

Según Lipták, se prevé una eficiencia del 90 % en el lavador de placas de choque húmedas (Lipták, 1991, p. 216), razón por la cual en la corriente de salida se tiene aire y material particulado, la cantidad que saldría al medio ambiente es 64,81 mg/Nm³, valor inferior a 100 mg/Nm³ límite máximo permisible de acuerdo al Anexo 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundaria.

**Figura 3. 15.** Diagrama de dosificación de lodos al proceso existente

Para finalizar con la dosificación de lodos, se realizó el balance de masa en el sistema completo para determinar la cantidad de lodos dosificados, las corrientes se muestran en la Figura 3.15.

Después de realizar el balance de masa en el sistema mostrado en la Figura 3.15 se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 3.22.

Tabla 3. 22. Resultados balance sistema global

| Corriente | Agua (kg) | | Material Particulado (kg) | | Humedad (%) |
|-------------------|-----------|----------|---------------------------|--------|-------------|
| | Entrada | Salida | Entrada | Salida | |
| A | 178,25 | - | 2 321,75 | - | - |
| E | 245,31 | - | - | - | - |
| S | - | 1 354,76 | - | 2 323 | 36,84 |
| D | 931,2 | - | 1,25 | | - |
| Total (kg) | 1 354,76 | 1 354,76 | 2 323 | 2 323 | - |

En el balance de masa en el sistema completo se observa que la adición de lodos representa una gran diferencia, ya que en el primer caso (Tabla 3.20) se tiene una humedad del 15,21 % mientras que en el segundo caso al adicionar los lodos (Tabla 3.22) la humedad sube a 36,84 %. Para cumplir con el porcentaje establecido por la Empresa Terraforte de 16-18 %, solo se deberá adicionar los 931,2 kg de agua proveniente del tanque de almacenamiento, lo cual disminuyó el porcentaje de agua a 32,32 %, sin embargo este valor sigue fuera del rango establecido, por lo que se debe disminuir la cantidad de agua que proviene del tanque de almacenamiento de lodos, para adicionar al proceso, al 30 % para obtener alrededor de 16 % de humedad. Esto se podrá lograr desviando el 70 % de agua a un lecho de secado de lodos y el resto se agregaría a la siguiente etapa del proceso para formar la pasta. El nuevo sistema se indica en la Figura 3.16.

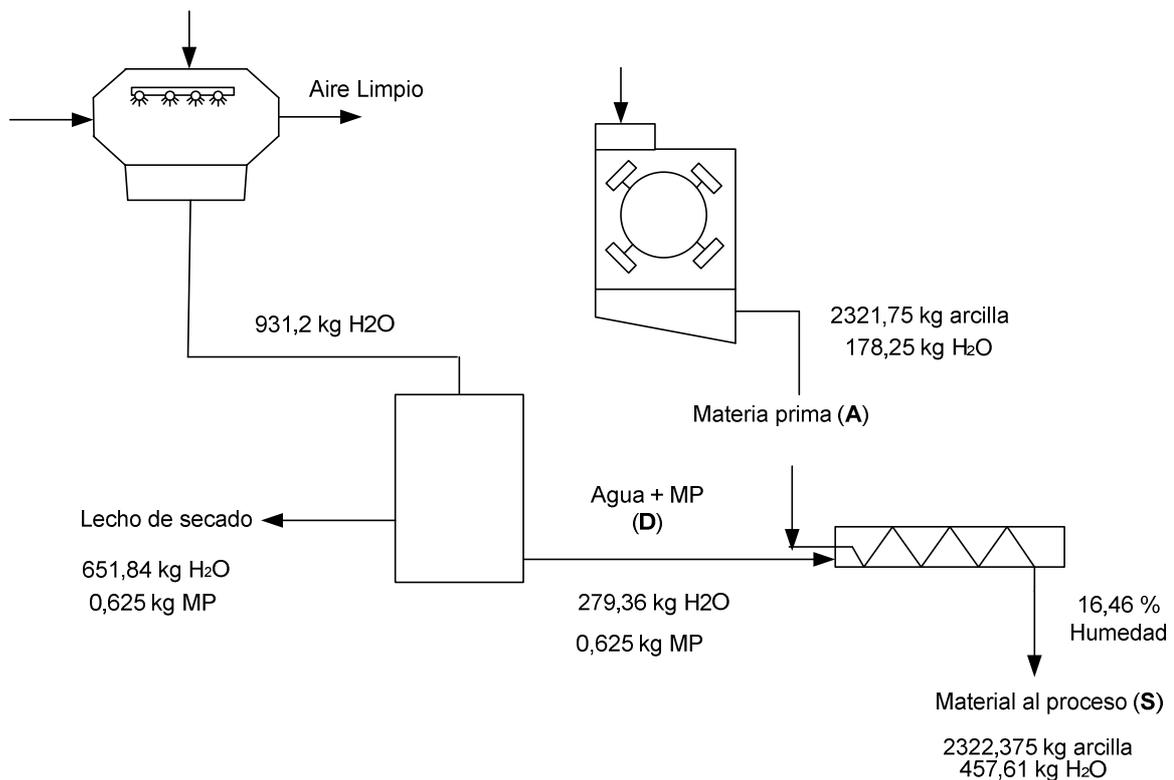


Figura 3. 16. Nuevo sistema de dosificación de lodos con la corriente del lecho de lodos

Lecho de secado

Para el diseño del lecho de secado de lodos, se determinó la cantidad de agua de 651,84 kg/h a partir del 70 % de agua proveniente del colector húmedo, además se asumió que el 50 % de material particulado sería llevado al lecho de secado.

El dimensionamiento del lecho de secado se basó en los siguientes criterios de diseño debido a que este proceso es usado para caudales menores a 100 L/s (Romero, 2001, pp. 831,833):

- Profundidad de aplicación: 0,2-0,4 m.
- Longitud <60 m.
- Capa de ladrillos de 15 cm de alto con separación de 2 a 3 cm de arena.
- Capa arena fina de 0,3 a 0,6 m con diámetro efectivo entre 0,3 – 1,3 mm.

- Estrato de grava gruesa de 0,2 y 0,46 m.

Se determinó la masa de sólidos que conforman los lodos, a partir del 50 % de material particulado que se recupera en el lavador de placas de choque húmedas.

$$\frac{0,63 \text{ kg MP}}{h} * \frac{16h}{\text{día}} = 10,08 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

El volumen diario de lodos (Vld) digeridos se calculó con la Ecuación [3.40] (Organización Panamericana de la Salud, 2005, p. 19).

$$Vld = \frac{Msd}{\rho_{\text{lodo}} * \% \text{ sólidos}} \quad [3.40]$$

Donde:

ρ_{lodo} : densidad de los lodos, igual a 1,04 kg/l

% sólidos: % sólidos contenidos en el lodo, varía entre 8 a 12 %

$$Vld = \frac{Msd}{\rho_{\text{lodo}} * \% \text{ sólidos}} = \frac{10,08 \frac{\text{kg}}{\text{día}}}{1,04 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 0,08} = 121,15 \frac{\text{l}}{\text{día}}$$

Se escogió el menor valor de porcentaje de sólidos en el lodo, debido a que la cantidad de material particulado es pequeña a comparación del agua, es decir 0,625 kg de material particulado por 651,84 kg de agua.

El volumen de lodos a extraerse (Vel) del tanque se calculó con la Ecuación [3.41] (Organización Panamericana de la Salud, 2005, p. 19).

$$Vel = \frac{Vld * Td}{1000} \quad [3.41]$$

Donde:

Td: tiempo de evaporación, 40 días (Tabla 3.23)

Tabla 3. 23. Tiempo requerido para la evaporación de los lodos

| Temperatura (°C) | Tiempo de evaporación(días) |
|-------------------|-----------------------------|
| 5 | 110 |
| 10 | 76 |
| 15 | 55 |
| 20 | 40 |
| >25 | 30 |

(Organización Panamericana de la Salud, 2005, p.19)

$$Vel = \frac{121,15 \frac{l}{día} * 40 \text{ días}}{1000} = 4,85 \text{ m}^3$$

Aplicando el factor de factor de seguridad de 30 % (Gómez y Martínez, 2013, p.151)

$$Vel = 4,85 \text{ m}^3 * 1,30 = 6,3 \text{ m}^3$$

El área de secado se calculó con la Ecuación [3.42] (Organización Panamericana de la Salud, 2005, p. 19).

$$Als = \frac{Vel}{Ha} \quad [3.42]$$

Donde:

Ha: Profundidad de aplicación, entre 0,2-0,4 m

$$Als = \frac{6,3 \text{ m}^3}{0,3 \text{ m}} = 21 \text{ m}^2$$

Se determinó el largo del lecho de lodos con la Ecuación [3.43] asumiendo un ancho de 3 m (Organización Panamericana de la Salud, 2005, p. 19).

$$L = \frac{Als}{W} = \frac{21 m^2}{3 m} = 7, m \quad [3.43]$$

En la Tabla 3.24 se indican las dimensiones del lecho de secado.

Tabla 3. 24. Dimensiones del lecho de secado

| Parámetro | Unidades (m) |
|------------------|---------------------|
| Longitud | 7,00 |
| Ancho | 3,00 |
| Alto | 0,30 |
| Altura ladrillos | 0,15 |
| Alto arena | 0,30 |
| Alto grava | 0,35 |
| Altura libre | 0,40 |

3.5. ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS DEL SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO

3.5.1. COSTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO

El costo de la implementación del sistema de control para material particulado se determinó mediante la suma de todos los costos de los equipos que conforman el sistema, servicios básicos y costos de mano de obra.

El precio del lavador de placas de choque húmedas, tolva y los tanques de almacenamiento se determinaron mediante el número de planchas de acero al carbono necesarias para cada equipo y un espesor de 3/16 in, los costos se detallan en las Tablas 3.25 y 3.26.

Tabla 3. 25. Costos del lavador de placas de choque húmedas y tolva

| Equipo | Superficie total (m ²) | Número de planchas | Costo por unidad(\$) | Costo planchas(\$) |
|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Lavador de placas de choque húmedas | 6,43 | 3 | 143,16 ¹ | 572,64 |
| Tolva | 3,06 | 1 | | |

¹(DIPAC MANTA S.A., 2013, p.1)

Las planchas son estandarizadas cada una es de 1,20 m * 2,44 m, el costo de cada una fue proporcionado por DIPAC MANTA S.A.

Tabla 3. 26. Costos del tanque de almacenamiento de agua y lodos

| Equipo | Superficie total (m ²) | Número de planchas | Costo por unidad(\$) | Costo total(\$) |
|---|------------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| Tanque de almacenamiento de agua (3/16 in) | 41,02 | 14 | 143,16 | 3 007,31 |
| Cuerpo tanque de almacenamiento de lodos (3/16 in) | 15,52 | 6 | | |
| Tapa y fondo tanque de almacenamiento de lodos (1/8 in) | 3,1 | 2 | 72,07 | |

Comparando los precios del lavador de placas de choque húmedas, tolva y tanques de almacenamiento se puede apreciar que los tanques son las unidades más costosas debido a su gran tamaño.

Los costos de los equipos auxiliares como bombas, extractor centrífugo y aspersores se determinaron mediante proformas de distintos almacenes especializados, las cuales se presentan en el Anexo XX, el valor total de los equipos auxiliares se indican en la Tabla 3.27.

Tabla 3. 27. Costos de los equipos auxiliares

| Equipo | Cantidad | Costo por unidad (\$) | Costo (\$) |
|--|-----------------|------------------------------|-------------------|
| Aspersores | 6 | 51,27 | 307,62 |
| Extractor centrífugo de aspas radiales | 1 | 843,36 | 843,36 |
| Bomba centrífuga | 1 | 1 428,55 ² | 1 428,55 |
| Bomba neumática de diafragma | 1 | 1 454,15 | 1 454,15 |
| Costo total | | | 4 033,68 |

² Precio en Argentina más los costos de importación

Se determinó el costo de la bomba centrífuga en \$ 1 428,55 incluido impuestos de importación y flete, los cálculos se encuentran en el Anexo XXI.

Los costos de los accesorios de las tuberías se indican en la Tabla 3.28.

Tabla 3. 28. Costo de los accesorios y tuberías

| Accesorio | Cantidad | Costo por unidad (\$) | Costo total (\$) |
|-------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------|
| Filtro tubería 3/4 | 1 | 36,22 | 36,22 |
| Tubería 1/2 in | 3 | 15,58 | 46,74 |
| Tubería 3/4 | 1 | 32,77 | 32,77 |
| Codos | 8 | 0,34 | 2,72 |
| Válvula de globo 1/2 in | 2 | 23,20 ³ | 46,4 |
| Válvula de globo 3/4 in | 1 | 33,13 ³ | 33,13 |
| Costo total | | | 197,98 |

³ ACERO COMERCIAL S.A.

Los costos de la construcción del lecho de lodos se indican en la Tabla 3.29.

Tabla 3. 29. Costos construcción lecho de lodos

| Lecho de lodos | Unidad | Cantidad | Precio unitario (\$) | Costo total(\$) |
|---|----------------|----------|----------------------|-----------------|
| Nivelación superficial | m ² | 21,30 | 1,71 | 36,42 |
| Limpieza y desbroce | m ² | 21,30 | 0,81 | 17,25 |
| Excavación zanja a mano | m ³ | 23,43 | 9,89 | 231,72 |
| Enconfrado-desenconfrado muro | m ³ | 31,95 | 16,66 | 532,29 |
| Tubería perfilada PVC alcantarillado D=200 mm | m | 3,00 | 21,45 | 64,35 |
| Acero de Refuerzo fy=4200 kg/cm ² | kg | 18,00 | 2,50 | 45,00 |
| Hormigón ciclópeo | m ³ | 1,76 | 138,87 | 244,41 |
| Capa de arena | m ³ | 7,97 | 10,00 | 79,70 |
| Capa de grava | m ³ | 7,46 | 10,00 | 74,55 |
| Total (\$) | | | | 1 325,70 |

El costo total del sistema de control para material particulado se detalla en la Tabla 3.30.

Tabla 3. 30. Costo total de los equipos, accesorios y tuberías del sistema de control para material particulado

| Equipo | Costo (\$) |
|-------------------------------------|------------|
| Lavador de placas de choque húmedas | 572,64 |
| Equipos auxiliares | 4 033,68 |
| Tanques de almacenamiento | 3 579,95 |
| Accesorios tuberías | 197,98 |
| Lecho de lodos | 1325,7 |
| Costo total | 9 709,95 |

Como se observa en la Tabla 3.29, la mayor inversión en lo referente a equipos es la construcción de los tanques almacenamiento, esto debido a la cantidad de agua que se necesita para el sistema de control de material particulado.

El costo de los servicios básicos se determinó con el costo de agua y energía eléctrica para el sistema de control para material particulado (Anexo XXII), los

resultados se indican en la Tabla 3.31

Tabla 3. 31. Costos de los servicios básicos empleados en el sistema de control para material particulado

| Servicios básicos | Costo año (\$) |
|-------------------|----------------|
| Agua | 1 564,42 |
| Energía eléctrica | 686,17 |
| Total | 2 250,59 |

Como se observa en la Tabla 3.31 el rubro más alto por servicios básicos es el generado por el agua, esto se debe principalmente a que la cantidad de agua necesaria para tratar el material particulado es 0,93 m³/h.

En la Tabla 3.32 se especifican los costos por mano de obra para la construcción del lavador de placas de choque húmedas, de los tanques y lecho de lodos.

Tabla 3. 32. Costos mano de obra para la construcción del sistema de control para material particulado

| Parámetro | Cantidad |
|-----------------------------------|----------------|
| Operadores | 3 |
| Salario mensual ⁴ (\$) | 351,40 |
| Tiempo de construcción (mes) | 2 |
| Total (\$) | 2 108,4 |

⁴ Ministerio de relaciones laborales, 2014, p.1

A pesar de que la Empresa Terraforte posee un departamento de metalmecánica que puede construir el sistema, también se debe tomar como gastos ya que los trabajadores estarían invirtiendo su tiempo en otras actividades distintas a las asignadas usualmente.

La Inversión total con un valor de \$ 14 068,94 se calculó mediante la Ecuación [2.18]. Los servicios básicos representan alrededor del 20 % de la inversión total debido a que se necesitan insumos como agua y luz.

3.5.2. BENEFICIOS

Para calcular el beneficio de la implementación del sistema de control para material particulado se tomaron las siguientes consideraciones:

- **Multas por incumplimiento de los límites máximos permisibles:** Las multas que puede recibir la empresa se encuentran especificadas en la Ordenanza 404 Sección II Art. II.308.107 literal j, que indica una multa de 20 remuneraciones básicas unificadas por la inobservancia de los límites permisibles. Actualmente la remuneración unificada es \$ 340,00.
- **Materia prima reingresada al proceso:** Esta cantidad se calculó mediante el 50% de material particulado recuperado, ya que la parte restante se trata en el lecho de secado. Debido a que la fachaleta es el producto principal de la Empresa se determinó 881 fachaletas al año con un valor de venta de \$ 0,127 cada una. La ganancia por el material recuperado fue de \$ 111,96.

El beneficio de implementar el sistema de control para material particulado se determinó mediante la Ecuación [2.19], los resultados se indican en la Tabla 3.33.

Tabla 3. 33. Beneficios de implementar el sistema de control para material particulado

| Beneficio | Valor (\$) |
|----------------------|-------------------|
| Material recuperado | 111,96 |
| Evitar multa Anexo 4 | 6 800 |
| Evitar multa Anexo 3 | 6 800 |
| Total | 13 711,96 |

Al recuperar el material particulado que actualmente sale al medio ambiente, se cumplirá con los límites máximos permisibles y la empresa no pagará las multas, razón por la cual el beneficio que se observa en la Tabla 3.33 es alto debido a las multas.

A partir de la Ecuación [2.20] se determinó la relación costo/beneficio:

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = \frac{13\,711,96}{14\,068,94} = 0,97$$

La relación costo/beneficio es 0,97, valor menor a 1 lo que indica que el proceso no es rentable, pero en el ámbito ambiental sí, ya que no se emitiría contaminantes al aire además de evitarse las multas.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La concentración de material particulado que sale al exterior de la planta desde el molino de martillos fue de $648,20 \text{ mg/m}^3$, incumpléndose con el límite máximo permisible de 100 mg/m^3 en el Anexo 3 del Libro VI del TULMAS, evidenciándose el problema de contaminación al aire en la Empresa Terraforte y sus sectores aledaños.
- La concentración de partículas sedimentables en el aire ambiente excede el valor norma en 2 puntos de muestreo, en el área externa y área de molienda con $6,32$ y $3,03 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ respectivamente debido a que se ubicaron en zonas donde se encontraba el ducto y molino, confirmando la contaminación de material particulado en la planta de producción de la Empresa Terraforte.
- Para evitar la emisión de material particulado al medio ambiente se diseñó un lavador de placas de choque húmedas de $1,7 \text{ m}$ de largo, $0,6 \text{ m}$ de ancho y $0,6 \text{ m}$ de alto, con el cual se prevé una disminución de la emisión de material particulado en un 90% cumpliendo con la Normativa Ambiental vigente en el Distrito Metropolitano de Quito.
- El extractor seleccionado fue el centrífugo de aspas radiales ya que el diseño de sus aspas reduce la acumulación de material particulado.
- Se diseñó un tanque de agua de $5,7 \text{ m}$ de alto y $1,9 \text{ m}$ de diámetro, el cual almacenará agua para controlar el material particulado mediante los aspersores.
- El tanque de lodos diseñado es de $3,8 \text{ m}$ de alto y $1,3 \text{ m}$ de diámetro el cual proporciona agua a la siguiente etapa del proceso por 16 horas, tiempo de funcionamiento del molino de martillos.

- El lecho de secado tiene dimensiones de 7,0 m de largo, 3,0 m de ancho y 1,5 m de profundidad, donde ingresarán alrededor del 70 % de agua y material particulado proveniente del lavador de placas de choque húmedas.
- El costo para la implementación del sistema de control para material particulado es \$ 14 068,94 aproximadamente, considerando los costos de la construcción de los equipos y servicios básicos.
- El proyecto no es financieramente rentable pero si lo es en el aspecto medio ambiental debido a que la relación costo beneficio es 0,97, ya que la cantidad de material particulado emitido al medio ambiente estará bajo el límite máximo permisible.

4.2. RECOMENDACIONES

- Implementar el sistema de control para material particulado en el molino de martillos para cumplir con los límites máximos permisibles en el Anexo 3 y 4 del Libro VI del TULMAS y así evitar las multas por incumplimiento, además de mejorar la calidad del aire en la empresa.
- Una vez instalado el sistema de control para material particulado, se recomienda realizar un mantenimiento cada dos semanas al filtro en la tubería de succión para evitar taponamiento de los aspersores.
- Realizar mantenimiento una vez al mes a todo el sistema de control de material particulado incluyendo los tanques para evitar la deposición de sedimentos en las paredes de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alois, D. y Wagner, G. (2005). *Aparato respiratorio*. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo1/10.pdf> (Marzo, 2013)
2. Alvarez, M. y CEPAL. (2009). *Manual de la micro, pequeña y mediana empresa*. Recuperado de http://www.giz-cepal.cl/files/Manual_Micro_Pequena_Mediana_Empresa_TIC_politicas_publicas.pdf (Abril, 2013)
3. América, L. y Palacios, A. (1997). *Introducción a la toxicología ambiental*. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsair/e/repindex/repindex92/cdeco/titulo.html> (Mayo, 2013)
4. ASTM. (1997). *Standard Guide for Wet Sieve Analysis of Ceramic White Clays*. Recuperado de http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/C325.htm (Febrero, 2013)
5. ASTM. (1999). *Standard Test Method for Free Moisture in Ceramic Whiteware Clays*. Recuperado de <http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?HISTORICAL/C324-82R99.htm>. (Febrero, 2013)
6. ASTM. (2011). *Standard Test Method for Specific Gravity of Fired Ceramic Whiteware Materials*. Recuperado de http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?+REDLINE_PAGES/C329.htm (Febrero, 2013)
7. Australian Government. (2004). *Health Impacts of Ultrafine Particles*. Recuperado de <http://www.environment.gov.au/atmosphere/airquality/publications/health-impacts/pubs/health-impacts.pdf> (Mayo, 2013)
8. Bholá, R., Molina, L. y Ojha, C. (2010). *Air Pollution: Health and*

Environmental Impacts. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=V7SHrJBI9Z4C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> (Abril, 2013)

9. Cheremisinoff, P. y Young, R. (2002). *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. (1era edición). Nueva York. Estados Unidos: Butterworth Heinemann.
10. Consejo de Bogotá. (2007). *Proyecto de Acuerdo 297*. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=2545> (Febrero, 2013)
11. De la Rosa, J. (2008). *Contaminación atmosférica de material particulado provocada por la extracción minera*. Recuperado de http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_85.pdf. (Agosto, 2012)
12. Devlin, T. (2000). *Bioquímica*. Recuperado de <http://books.google.com.ec> (Marzo, 2013)
13. DHL. (2013). Tarifas y estimación de horarios de entrega. Recuperado de http://www.dhl.com.ec/es/express/envios/encuentre_locales_dhl.html. (Noviembre, 2013)
14. DIPAC MANTA S.A. (2013). Planchas Laminadas. Recuperado de http://www.dipacmanta.com/acategoria.php?ca_codigo=21. (Septiembre, 2013)
15. Domingo, A. (2006). *Depósito y recipientes de proceso*. Recuperado de <http://web.usal.es/~tonidm/> (Mayo, 2013)
16. Durand, A., Morales, E. y Texta, J. (2001) Contaminantes en efluentes gaseosos. *Ingeniería Química*, 33 (385): 117-128. Recuperado de

<http://tophqbooks.com/books/37767> (Febrero, 2013)

17. EPA. (2002). *Particulate Matter Controls*. Recuperado de <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/cs6ch2.pdf> (Abril, 2013)

18. Falagán, M. Canga, A. Ferrer, P. Fernández, J. (2000). *Manual Básico de Prevención de Riesgos Laborales*. Recuperado de [http://www.samsst.es/pdf/Publicaciones/MANUAL%20B%20C1SICO%20DE%20PREVENCI%20DE%20RIESGOS%20LABORALES .pdf](http://www.samsst.es/pdf/Publicaciones/MANUAL%20B%20C1SICO%20DE%20PREVENCI%20DE%20RIESGOS%20LABORALES.pdf) (Junio, 2013)

19. Fenili, E. (2004). *Determinación de la plasticidad de las arcillas*. Recuperado de : <http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdf/0432100s.pdf> (Enero, 2013)

20. Fierro, M. (2000). *Particulate matter*. Recuperado de : http://www.airinfonow.org/pdf/Particulate_Matter.pdf (Enero, 2013)

21. Flores, J. (1997). *Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-02a9.pdf> (Marzo, 2013)

22. Gallardo, L., Garreaud, R., Gutiérrez, L., Jorquera, H., Leiva, M., Merino, M., Morales, L., Morales, R., Oyarzún, M., Wilfredo, P., Pérez, P., Rutllant, J. (2006). *Contaminación Atmosférica Urbana: Episodios Críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago de Chile*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=HdeX6SWHBW8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> (Mayo, 2013)

23. Gallegos, R.(2006). *Contaminación atmosférica por la fabricación de ladrillos y sus posibles efectos sobre la salud de los niños de zonas aledañas*. Recuperado de <http://www.ucbcba.edu.bo/Publicaciones>

/revistas/actanova/documentos/v3n2/v3.n2.gallegos.pdf. (Agosto, 2012)

24. Gallego, A., González, I., Sánchez, B., Fernández, P., Garcinuño, R., Bravo, J., Radana, J., García, A. y Durand, J. (2012). *Contaminación Atmosférica*. Recuperado de books.google.com.ec/books?isb24.n=8436265238 (Marzo, 2013)
25. García A., (2006). *Hidráulica Prácticas de Laboratorio*. Recuperado de books.google.com.pe/books?id=CnEPGohcQWsC&hl=es(Marzo, 2013)
26. García, H. (2006). *Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá*. Recuperado de books.google.com.ec/books?isbn=9587017560 (Enero, 2013)
27. Gemci,T. Chingier,N. y Organiscak, J. (2003) *Spray Characterization for coal mine dust removal*. Recuperado de <http://www.ilasseurope.org/ICLASS/iclass2003/fullpapers/1501.pdf> (Marzo,2013)
28. Glynn, J. y Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. (2da edición). México DF, México: Prentice Hall
29. Gómez, E. Martínez, V. (2013). *Estudio de optimización de variables de funcionamiento de un sistema de electrocoagulación para tratar aguas de la industria textil*. (Proyecto de titulación previo de la obtención del título de Ingeniero Ambiental no publicado) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
30. Green, R.(1992). *Compresores Selección, uso y mantenimiento*. (1era edición). México DF, México: McGraw-Hill.
31. Grundfos. (2011). *WinCAPS*. Recuperado de <http://www.grundfos.com/ser>

vice-support/caps-support-pages/wincaps-support.html(Abril, 2013)

32. ICARUS Reference. (1998). *Vessels*. Recuperado de <http://instruct.uwo.ca/engin-sc/cbe497/Doc/Icarus/ir10.pdf> (Abril, 2013)

33. INNA. (1999). *Normas de diseño de sistemas de abastecimientos y potabilización del agua*. Recuperado de www.inaa.gob.ni/documentos/Normativas/seccion-1/7.Abastec.../file (Agosto, 2013)

34. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo del gobierno de España. (2003). *Medición del caudal en el sistema de extracción localizada*. Recuperado de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_668.pdf (Abril, 2013)

35. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo del gobierno de España. (2003) *Medición de la presión estática para la comprobación rutinaria de sistemas de extracción localizada*. Recuperado de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Fichas Tecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_615.pdf. (Marzo, 2013)

36. Jacquard, P. y Rapin P.J. (1997). *Instalaciones Frigoríficas*. Recuperado de http://books.google.com.ec/books?id=LAc3sKX0B_MC&prints ec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage &q&f=false (Mayo, 2013)

37. Karl, B. Schnelle, Jr. Y Brown, C. (2002). *Air Pollution Control Technology Handbook*. Recuperado de <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9781420036435.ch22> (Mayo, 2013)

38. León, J. (2001). *Diseño y cálculo de recipientes sujetos a presión*. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/17247549/disenoy-calculo->

de-recipientes-a-presion (Julio, 2013)

39. Lipták, B. (1991). *Municipal Waste disposal in the 1900s*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=rUb52HQev-QC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> (Febrero, 2013)

40. Martínez, J., Cortéz, R., y Pérez, A. (2009). *Análisis comparativo de los soportes de un recipiente cilíndrico vertical*. Recuperado de http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2009/pdfs/A1/A1_22.pdf (Agosto, 2013)

41. McCabe, W., Smith, J. y Harriot, P. (1991). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. (4ta edición). Madrid, España: McGraw-Hill.

42. Megyesy, E. (1992). *Manual de recipientes a presión*. (1era reimpresión). México DF, México: Limusa

43. Mendoza, J., Montañés, M. y Palomares, A. (1998). *Ciencia y tecnología del medio ambiente*. Recuperado de books.google.com.ec/books?isbn=8477216894 (Marzo, 2013)

44. Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*. (3ra edición). Madrid, España: McGraw-Hill.

45. Ministerio de Relaciones Laborales. (2014). *Salarios Mínimos Construcción 2014*. Recuperado de <http://www.relacioneslaborales.gob.ec/biblioteca/> (Enero, 2014)

46. Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. Recuperado de books.google.com.ec/books?isbn=9702608058 (Mayo, 2013)

47. Munson, B. (1990). *Fluids Mechanics*. (2da edición). New York, EEUU:

John Wiley & Sons.

48. Mussatti, D. (2002). *Torres de limpieza húmedas para materia particulada*. Recuperado de <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch2-s.pdf>. (Marzo, 2013)
49. Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. Recuperado de http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/035_dise%C3%B1o%20de%20desarenadores%20y%20sedimentadores/Dise%C3%B1o%20de%20desarenadores%20y%20sedimentadores.pdf. (Mayo, 2013)
50. Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques imhoff y lagunas de estabilización*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/tecapro/documentos/sanea/163esp-diseno-ti.pdf>. (Septiembre, 2013)
51. Rase, H. (2000). *Ingeniería de proyectos para plantas de proceso*. (4ta edición). México: CECSA
52. Romero, J. (2001). *Tratamiento de aguas residuales*. (1era reimpresión). Bogotá, Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería
53. Salvador Escoda S.A. (2009). *Catálogo Técnico: Manual Práctico de Ventilación*. Recuperado de <http://www.salvadorescoda.com/tecnico/ve/Manual-Ventilacion.pdf>. (Marzo, 2013)
54. Secretaría de Ambiente. (2012). *Informe de Calidad del aire*. Recuperado de <http://190.152.144.74/paginas/articulos.html> (Marzo, 2013)
55. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2005). *Guía de*

- Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones.* Recuperado de http://www.ine.gob.mx/descargas/calair/manual1_vf.pdf (Enero, 2013)
56. Segarra, E. (2006). *Fisiología de los aparatos y sistemas.* Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=4wWXYal1ubAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false> (Enero, 2013)
57. Servicio Nacional de Aduana del Ecuador. (2013). *Tráfico postal internacional y mensajería acelerada o courier.* Recuperado de <http://www.aduana.gob.ec/pro/courier.action> (Noviembre, 2013)
58. Sinnott, R. (2005). *Chemical Engineering Design.* (4ta edición). San Francisco, EEUU: Editorial ELSEVIER
59. Siñadi, S. y Mancilla, B. (2011). *Problemática ambiental producida por las ladrilleras.* Recuperado de w3.cetem.gov.br/.../Artigo_Ladrilleras_ProblematicaAmbiental.doc (Agosto, 2012)
60. Spraying Systems Co., (2008). *A guide to srpay technology for dust control.* Recuperado de http://www.spray.com/Literature_PDFs/B652_Dust_Control.pdf (Abril, 2013)
61. Spraying Systems Co., (2013). *Industrial Hydraulic.* Recuperado de <http://www.spray.com/cat75/hydraulic/index.html> (Abril, 2013)
62. Soler & Palau. (2012). *Catálogo S&P.* Recuperado de <http://www.soler-palau.com.mx/manual-de-ventilacion.php> (Mayo, 2013)
63. Soler & Palau. (2011). *Ventiladores Centrífugos.* Recuperado de http://www.soler-palau.mx/ima/products/pdf/363_06282011_Cat-SADA-06-Abril-2011.pdf (Mayo, 2013)

64. Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundaria.(2011). *Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundaria: Norma de Calidad del Aire Ambiente*. Recuperado de [http://www.efficacitas.com/efficacitas_es/assets/AM%20050%20Norma%20calidad%20aire%20ambiente%20\(2\).pdf](http://www.efficacitas.com/efficacitas_es/assets/AM%20050%20Norma%20calidad%20aire%20ambiente%20(2).pdf) (Enero, 2013)
65. Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundaria.(2003). *Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental Secundaria: Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión*. Recuperado de <http://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112182.pdf> (Enero, 2013)
66. The World Bank Group. (1998). *Pollution prevention and abatement handbook*. Recuperado de <http://www1.ifc.org/wps/wcm/connect/0f8fe18048855d738f04df6a6515bb18/PPAH.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=0f8fe18048855d738f04df6a6515bb18> (Abril, 2013)
67. Wark, K. y Warner, C. F. (2002). *Contaminación del aire: Origen y Control*. (10ma edición). México DF, México: Limusa.
68. Wekker, V. (2004). *Sistemas de bombeo*. Recuperado de ducarte.weebly.com/uploads/5/1/2/7/5127290/sistema_hidroneumatico.pdf. (Agosto, 2013)
69. Zapata, S. (2013). Mejoramiento del proceso de secado de fachaletas en la Empresa Terraforte a través del estudio de las condiciones de velocidad y temperatura del aire. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO I

PROCEDIMIENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE LAS PARTÍCULAS SOLUBLES E INSOLUBLES

El procedimiento que se siguió para la determinación de las partículas solubles e insolubles estuvo basada en la Norma Técnica Colombiana NTC 3662.

- Se escogieron cuatro sitios para el muestreo ubicados tanto al interior como al exterior de la planta, criterio definido en la norma aplicada.
- En cada sitio se colocó un recipiente para la recolección de material particulado de 1,8 m de altura con una mampara ubicada en la parte superior.
- Dentro de la mampara se colocó un colector de partículas sedimentables de 15 cm de diámetro, como se observa en la Figura AI.1.



Figura AI. 1. Esquema para la recolección de partículas sedimentables

- Luego de colocar cada recipiente en el lugar de muestreo se registró la fecha, hora y número de identificación de cada colector.
- El período de muestreo fue de un mes calendario, con una tolerancia de ± 2 días permisibles, de acuerdo a la norma.
- Al terminar este tiempo, se recogió cada colector con el material sedimentable que se depositó en ese período y se tapó para su posterior análisis en el laboratorio.

ANEXO II

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN HÚMEDO DEL MATERIAL FINO

Para determinar el tamaño de partícula se realizó el siguiente procedimiento:

- Se armó el equipo, es decir se colocó la malla N° 100 y 400 en forma decreciente sobre el tamiz vibratorio.
- Se pesaron 300 g de muestra homogenizada y este material fue puesto progresivamente sobre la malla N° 100, al mismo tiempo que se agregaba agua sobre este tamiz con el fin de eliminar el material muy fino.
- La muestra que logró pasar los dos tamices fue evacuada mediante una manguera hacia un recipiente.
- Todo el material retenido en los tamices N° 100 y N° 400 fue colocado en una bandeja y secado en la estufa a una temperatura de 90 °C por 4 horas.
- Luego del tiempo establecido, se homogenizó la muestra mediante un rodillo y se procedió a realizar el tamizado en seco.

Posteriormente, se colocó el material en un juego de tamices en forma decreciente según el número de malla como se observa en la Tabla AII.1.

- Este juego de tamices se agitó durante 15 minutos y posteriormente se pesó el material que quedó retenido en cada tamiz.
- Con los datos de los pesos de cada una de las mallas se realizó una curva granulométrica.

Tabla AII. 1. Numeración y abertura de tamices utilizados para el análisis granulométrico

| Tamiz (ASTM) | Tamaño (μm) |
|---------------------|--|
| 20 | 841 |
| 30 | 595 |
| 40 | 400 |
| 50 | 297 |
| 60 | 250 |
| 70 | 208 |
| 80 | 177 |
| 100 | 147 |
| 150 | 104 |
| 200 | 75 |
| 270 | 53 |
| 325 | 43 |
| 400 | 38 |

ANEXO III

ENSAYO PARA DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DEL MATERIAL PARTICULADO

El proceso para determinar la densidad del material particulado estuvo basado en la norma ASTM C329-56 y se indica a continuación:

- Se limpió el picnómetro con agua y se secó en una estufa a una temperatura de 105 ° C por una hora.
- El picnómetro se enfrió en un desecador por dos horas y se pesó en una balanza analítica.
- La muestra inicial fue cuarteada para seleccionar una muestra representativa.
- Se pesó 1 g de muestra y se la colocó en el picnómetro previamente tarado.
- A continuación, se agregó agua al picnómetro hasta llenarlo totalmente y se pesó el sistema.
- Posteriormente, se pesó el picnómetro solamente con agua.

ANEXO IV

ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA ARCILLA

El proceso de determinación de la humedad fue el siguiente:

- Se taró diez crisoles a una temperatura de 950 °C durante 1 hora y se dejó enfriar en un desecador por un día.
- Se coloraron aproximadamente 10 g de muestra en cada crisol seco y tarado.
- Los crisoles con la muestra fueron llevados a una estufa a una temperatura de 100 °C.
- Se reportó el peso de cada crisol cada hora hasta que el promedio del peso entre dos horas casi no varió.

ANEXO V

RESULTADOS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA POR DISPERSIÓN DE LUZ LÁSER

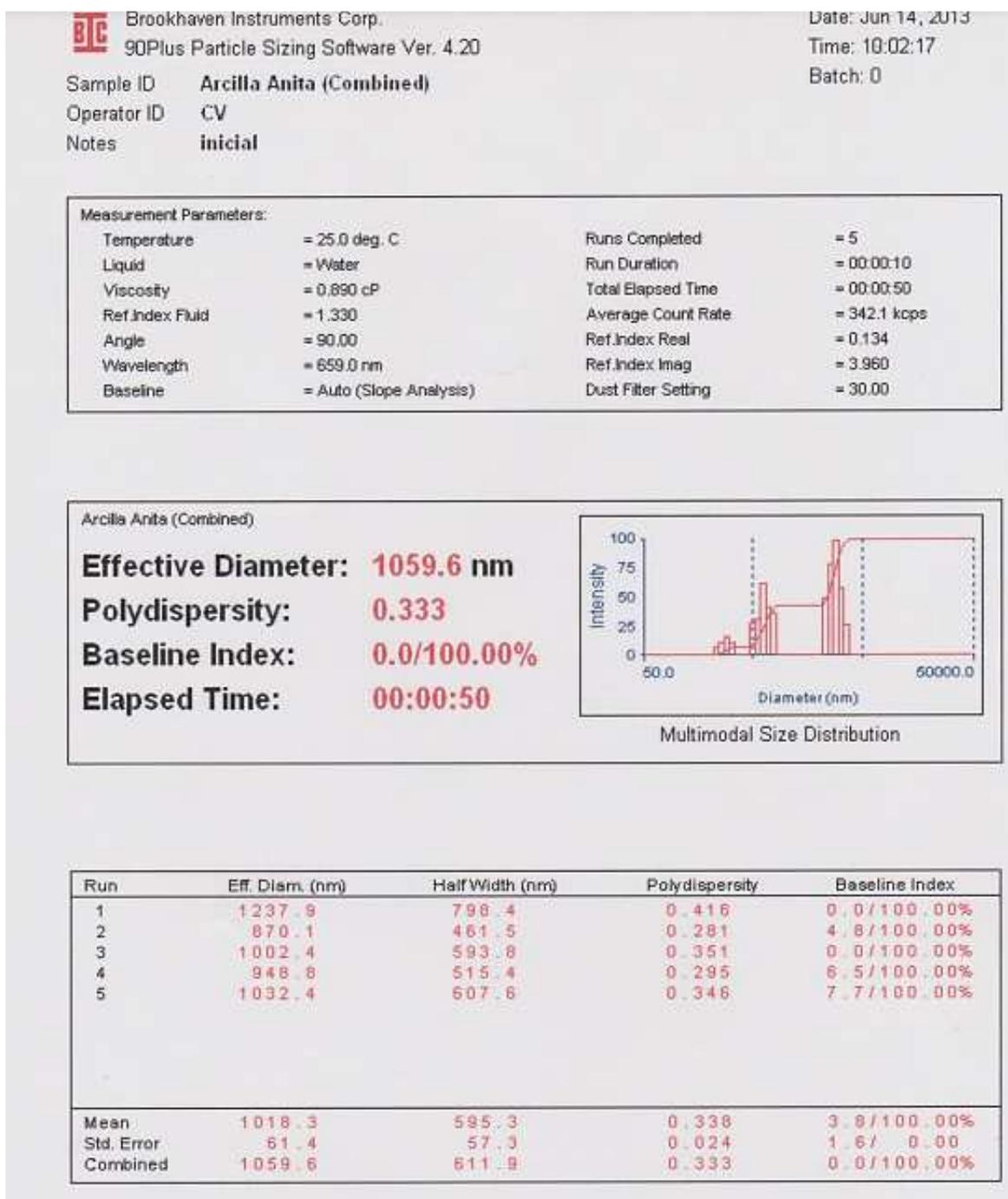


Figura AV. 1. Resultados del tamaño de partícula por dispersión de luz láser

ANEXO VI

RESULTADOS DEL MONITOREO DE EMISIONES DE COMBUSTIÓN

| FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN | | Informe No. Fecha: | 12-11-52-G-1 2012-12-12 |
|--|--|-----------------------|----------------------------|
| INFORME DE RESULTADOS GASES DE COMBUSTIÓN | | | |
| Referencia: | OT: 12-11-52-G | | |
| Atención: | Ing. Jorge Lema | | |
| Empresa: | TERRAFORTE | | |
| Dirección: | Calacalí Km 21 Vía La Independencia | | |
| Tipo de ensayo: | Mediciones de gases de combustión | | |
| Tipo de Fuente Fija: | Molino | | |
| Tipo de combustible: | Eléctrico | | |
| Potencia de la fuente: | No disponible | | |
| Código de la fuente: | OE: 12-11-52-G-1 | | |
| Fecha de monitoreo: | 30-11-2012 | | |
| Observaciones: | Sin novedad | | |

| PARÁMETRO DE MONITOREO | UNIDAD | MÉTODO | RESULTADO |
|---|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| Flujo ⁽¹⁾ | m ³ /h | EPA 2 | 1978,0 |
| Temperatura* | °C | Termopar | 22,9 |
| Oxígeno* | %V | EPA 3 A | 20,88 |
| Dióxido de Carbono* | %V | EPA 3 A | - |
| Monóxido de Carbono* | ppm | PNE/DPEC/G/MI01 Ref. EPA 10 | 1 |
| Dióxido de Azufre* | ppm | PNE/DPEC/G/MI02 EPA 6C | 0 |
| Oxido de Nitrógeno* | ppm | PNE/DPEC/G/MI03 Ref. EPA 7E | 0 |
| Dióxido de Nitrógeno* | ppm | PNE/DPEC/G/MI06 Ref. EPA 7E | 0 |
| Oxidos de Nitrógeno* | ppm | PNE/DPEC/G/MI06 Ref. EPA 7E | 0 |
| Material Particulado ^{(1) (2)} | g/m ³ | PNE/DPEC/G/MI04 Ref. EPA 5 | 0,6482 |
| Número de humo* | Escala de Humo BACHARACH | ASTM D2156 | 0 |
| Eficiencia de la combustión* | % | Calculado | - |

Nota.- Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 05-010

Nota.- Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE

Condiciones Ambientales.- Presión: 544,0 mmHg, Temperatura: 22,9 °C

(1) Parámetros calculados a 0°C y 1013mbar

(2) Incertidumbre asociada a la medida de Material Particulado, U = +/- 6,0000% (K=2)

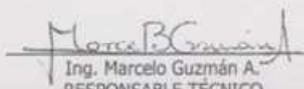
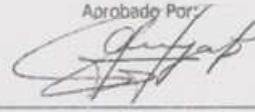
| | | |
|------------------------------------|---|---|
| AN: WRL-RHV Realizado por: CEGL | Revisado Por:  Ing. Marcelo Guzmán A. RESPONSABLE TÉCNICO | Aprobado Por:  Ing. Gilberto Moya D., Dpl. DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC |
|------------------------------------|---|---|

Figura AVI. 1. Resultados de los gases de combustión por el Método EPA 5

ANEXO VII

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD EN EL DUCTO

Para determinar la velocidad del flujo se utilizó el caudal de 1978 m³/h reportado en el análisis de material particulado, que consta en el Anexo VI, estos resultados fueron corregidos a las condiciones de trabajo a una temperatura de 22 °C a partir de la Ecuación [AVII.1].

$$\frac{P_1 * Q_1}{T_1} = \frac{P_2 * Q_2}{T_2} \quad \text{[AVII.1]}$$

El caudal corregido a las condiciones de trabajo fue:

$$Q_2 = 2\,137,40 \frac{m^3}{h}$$

Con el caudal corregido y el área del ducto se determinó la velocidad en el ducto mediante la Ecuación [AVII.2]:

$$velocidad = \frac{Q}{S} = \frac{2\,137,40 \frac{m^3}{h}}{(0,4 * 0,2) m^2} * \frac{1h}{3\,600 s} = 7,424 \frac{m}{s} \quad \text{[AVII.2]}$$

Debido a esta velocidad la cantidad de material particulado que sale al medio ambiente a través del ducto es 648,2 g/m³.

ANEXO VIII

ESPECIFICACIONES DEL EXTRACTOR CENTRÍFUGO

SA 10/6

CURVA CARACTERÍSTICA

in wg mmca

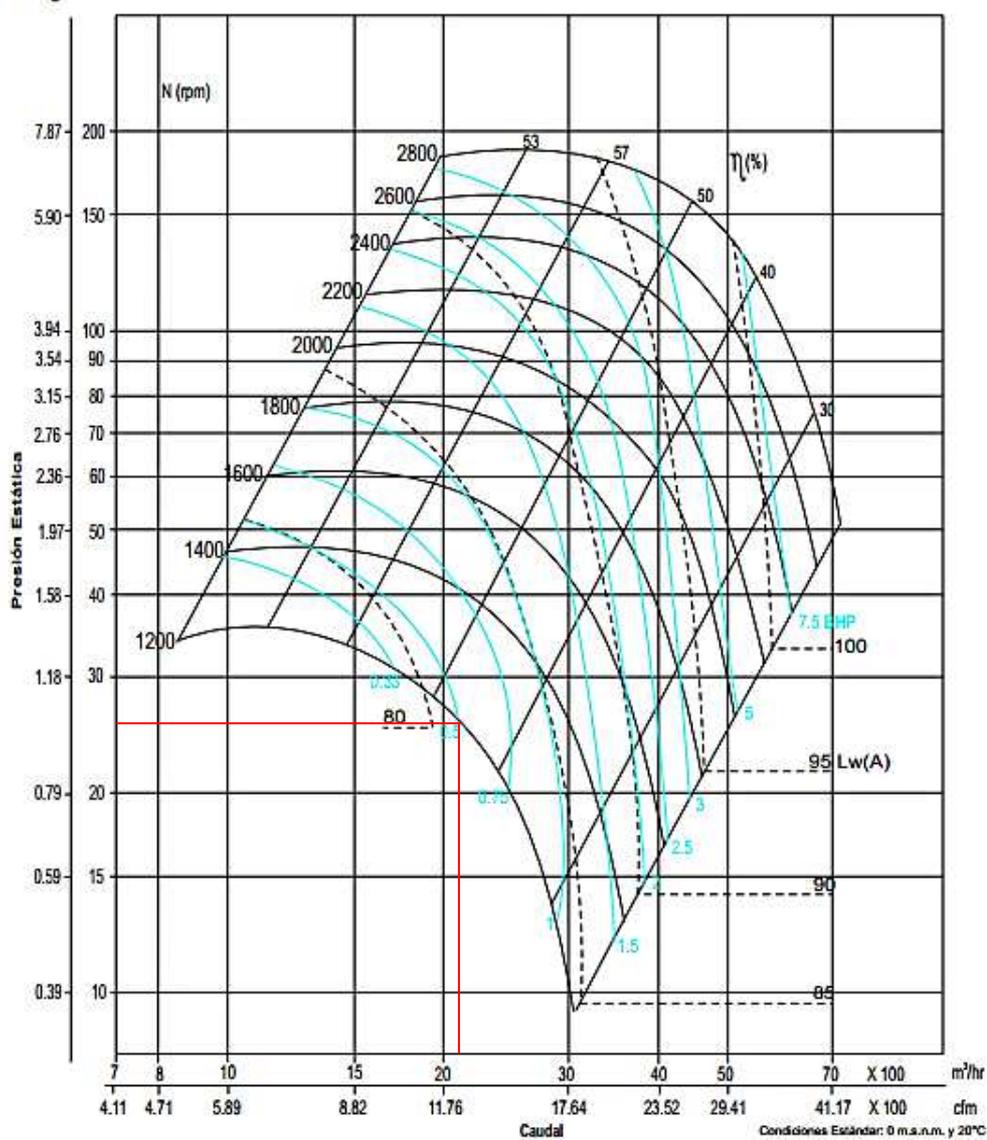
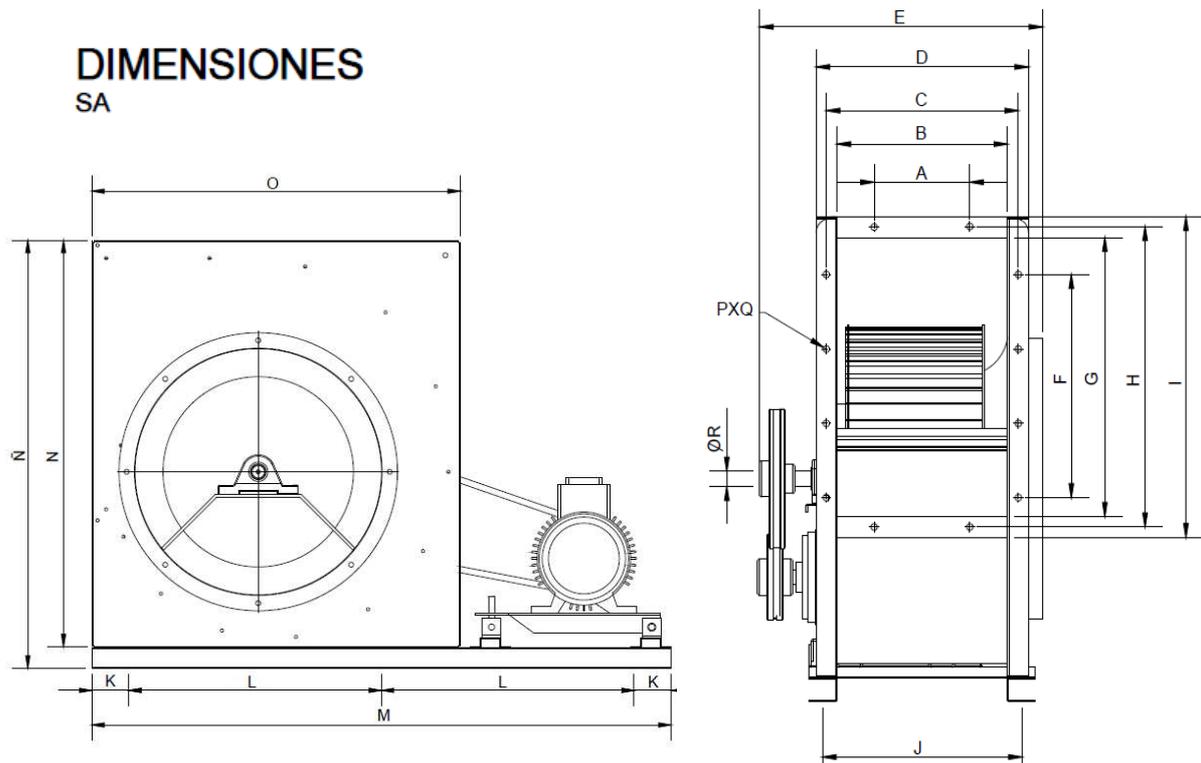


Figura AVIII. 1. Especificaciones del extractor centrífugo de aspas radiales (Soler & Palau, 2011, p. 10)



| Modelo | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | Ñ | O | P | Q | R |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|----|-----|------|------|------|------|----|------|-------|
| 9/4 | 100 | 150 | 170 | 192 | 280 | 198 | 258 | 278 | 298 | 180 | 75 | 705 | 855 | 427 | 457 | 399 | 10 | 7.93 | 19.05 |
| 10/6 | 150 | 207 | 230 | 248 | 365 | 248 | 286 | 307 | 327 | 357 | 75 | 765 | 915 | 458 | 488 | 445 | 10 | 7.93 | 19.05 |
| 12/6 | 150 | 206 | 230 | 248 | 382 | 300 | 340 | 360 | 380 | 236 | 75 | 838 | 988 | 558 | 588 | 509 | 10 | 7.93 | 22.22 |
| 15/8 | 143 | 254 | 287 | 315 | 432 | 320 | 460 | 430 | 460 | 294 | 50 | 493 | 1085 | 656 | 696 | 592 | 12 | 9.52 | 22.22 |
| 18/8 | 126 | 268 | 308 | 330 | 447 | 427 | 477 | 507 | 537 | 308 | 50 | 568 | 1235 | 790 | 830 | 703 | 12 | 9.52 | 22.22 |
| 20/10 | 230 | 332 | 362 | 394 | 545 | 480 | 623 | 654 | 683 | 372 | 50 | 651 | 1402 | 963 | 1003 | 842 | 14 | 9.52 | 34.91 |
| 22/11 | 292 | 368 | 404 | 431 | 632 | 617 | 697 | 735 | 765 | 418 | 50 | 693 | 1485 | 1050 | 1100 | 920 | 14 | 9.52 | 34.91 |
| 25/13 | 342 | 423 | 462 | 486 | 687 | 715 | 795 | 825 | 855 | 473 | 50 | 765 | 1630 | 1198 | 1248 | 1020 | 14 | 9.52 | 34.91 |
| 30/14 | 140 | 463 | 509 | 549 | 733 | 860 | 936 | 987 | 1037 | 513 | 50 | 878 | 1855 | 1427 | 1477 | 1219 | 18 | 9.52 | 34.91 |

Dimensiones en mm.

Figura AVIII. 2. Dimensiones del extractor centrífugo de aspas radiales

ANEXO IX

CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE CUNNINGHAM

El factor de corrección de Cunningham K_c se obtuvo a partir de la Ecuación [1.2] de la página 22

EL recorrido medio de las moléculas en la fase gaseosa (λ), se calculó con la Ecuación [AIX.1]:

$$\lambda = \frac{\mu}{0,499 * \rho * u_m} \quad \text{[AIX.1]}$$

Donde:

u_m : velocidad molecular media

μ : viscosidad del gas en (kg/ms)

ρ : densidad del gas en (kg/m³)

$$\lambda = \frac{1,8143 * 10^{-5} \frac{kg}{ms}}{0,499 * 1,177 \frac{kg}{m^3} * 467,72 \frac{m}{s}} = 6,60$$

La velocidad molecular media de las partículas (u_m) se calculó con la Ecuación [AIX.2]:

$$u_m = \left(\frac{8 R T}{\pi M} \right)^{1/2} \quad \text{[AIX.2]}$$

$$u_m = \left(\frac{8 * 8,314 \frac{J}{mol \cdot K} * 298 \text{ } ^\circ K}{3,1416 * 28,84 \frac{g}{mol}} \right)^{1/2} = 467,72 \frac{m}{s}$$

Por tanto, al reemplazar en la Ecuación [1.2], el factor corrección de

Cunningham, K_c es:

$$K_c = 1 + \frac{2 * 6,60}{1,06 * 10^{-6} m} \left[1,257 + 0,4 * \exp\left(\frac{-0,55 * 1,06 * 10^{-6} m}{6,60}\right) \right] = 1,156$$

ANEXO X

TAMAÑOS DE GOTAS PROPORCIONADAS POR LOS ASPERSORES

Tabla AX. 1. Tamaño de la gota de los aspersores según la presión

| Tipo de aspersor | 10 psi (0.7 bar) | | 40 psi (2.8 bar) | | 100 psi (7 bar) | |
|--------------------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| | Capacidad l/min | VMD (μm) | Capacidad l/min | VMD (μm) | Capacidad l/min | VMD (μm) |
| Boquilla de atomización con aire | 0.02 | 20 | 0.03 | 15 | 45 | 400 |
| | 0.08 | 100 | 30 | 200 | | |
| Boquilla de pulverización hidráulica | 0.83 | 375 | 0.1 | 110 | 2.6 | 110 |
| | | | 1.6 | 330 | | 290 |
| Boquilla de cono hueco | 0.19 | 360 | 0.38 | 300 | 0.61 | 200 |
| | 45 | 3400 | 91 | 1900 | | |
| Boquilla de tipo abanico | 0.19 | 260 | 0.38 | 220 | 0.61 | 190 |
| | 18.9 | 4300 | 38 | 2500 | | |
| Boquilla de cono lleno | 0.38 | 1140 | 0.72 | 850 | 1.1 | 500 |
| | 45 | 4300 | 87 | 2800 | | |

(Spraying Sytems, 2008, p. A-6)

El tamaño de la gota escogido para los aspersores que operan a 100 psi en la Tabla AX.1. fue de 290 μm

ANEXO XI

ESPECIFICACIONES DE LOS ASPERSORES

S PERFORMANCE DATA:
STANDARD ANGLE SPRAY



| Inlet Conn. (in.) | Nozzle Type | | | | | | | Capacity Size | Orificio Dia. Nom. (in.) | Core No. | Flow Rate Capacity (gallons per hour) | | | | | | | | | | Spray Angle (°) | | |
|-------------------|-------------|-----|-----|------|---|----|----|---------------|--------------------------|----------|---------------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|--------|-----------------|---------|--|
| | LN | LNN | LND | LNND | N | NN | M | | | | 30 psi | 40 psi | 60 psi | 100 psi | 200 psi | 300 psi | 500 psi | 700 psi | 1000 psi | 40 psi | 80 psi | 300 psi | |
| 1/4 | • | • | | | | | | .30 | .016 | 106 | – | – | – | – | – | .82 | 1.1 | 1.3 | 1.5 | – | – | 51 | |
| | • | • | | | | | | .40 | .016 | 108 | – | – | – | – | – | 1.1 | 1.4 | 1.7 | 2.0 | – | – | 58 | |
| | • | | | | | | | .50 | .016 | 109 | – | – | – | – | 1.1 | 1.4 | 1.8 | 2.1 | 2.5 | – | – | 63 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | .60 | .016 | 206 | – | – | – | .95 | 1.3 | 1.6 | 2.1 | 2.5 | 3.0 | – | 35 | 65 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 1 | .020 | 210 | – | 1.0 | 1.2 | 1.6 | 2.2 | 2.7 | 3.5 | 4.2 | 5.0 | 45 | 62 | 72 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 1.5 | .020 | 216 | 1.3 | 1.5 | 1.8 | 2.4 | 3.4 | 4.1 | 5.3 | 6.3 | 7.5 | 65 | 70 | 72 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 2 | .028 | 216 | 1.7 | 2.0 | 2.4 | 3.2 | 4.5 | 5.5 | 7.1 | 8.4 | 10.0 | 70 | 75 | 77 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 3 | .028 | 220 | 2.6 | 3.0 | 3.7 | 4.7 | 6.7 | 8.2 | 10.6 | 12.5 | 15.0 | 65 | 70 | 73 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 4 | .042 | 220 | 3.5 | 4.0 | 4.9 | 6.3 | 8.9 | 11.0 | 14.1 | 16.7 | 20 | 72 | 81 | 84 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 6 | .042 | 225 | 5.2 | 6.0 | 7.3 | 9.5 | 13.4 | 16.4 | 21 | 25 | 30 | 73 | 79 | 81 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 8 | .060 | 225 | 6.9 | 8.0 | 9.8 | 12.6 | 17.9 | 22 | 28 | 33 | 40 | 85 | 89 | 91 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 10 | .064 | 420 | 8.7 | 10.0 | 12.2 | 15.8 | 22 | 27 | 35 | 42 | 50 | 82 | 84 | 86 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 12 | .076 | 420 | 10.4 | 12.0 | 14.7 | 19.0 | 27 | 33 | 42 | 50 | 60 | 78 | 82 | 85 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 14 | .076 | 421 | 12.1 | 14.0 | 17.1 | 22 | 31 | 38 | 49 | 59 | 70 | 85 | 88 | 90 | |
| | | | | | • | • | | 16 | .086 | 421 | 13.9 | 16.0 | 19.6 | 25 | 36 | 44 | 57 | 67 | 80 | 83 | 86 | 88 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 18 | .076 | 422 | 15.6 | 18.0 | 22 | 28 | 40 | 49 | 64 | 75 | 90 | 81 | 84 | 86 | |
| | • | | | | | | • | 20 | .081 | 422 | 17.3 | 20 | 24 | 32 | 45 | 55 | 71 | 84 | 100 | 75 | 78 | 80 | |
| | • | • | • | • | • | • | • | 22 | .076 | 625 | 19.1 | 22 | 27 | 35 | 49 | 60 | 78 | 92 | 110 | 70 | 72 | 75 | |
| • | • | • | • | • | • | • | 26 | .086 | 625 | 23 | 26 | 32 | 41 | 58 | 71 | 92 | 109 | 130 | 73 | 74 | 77 | | |

Figura AXI. 1. Especificaciones de los aspersores
(Spaying Systems, 2008, p.E6)

El aspersor que da el caudal necesario para tratar el material particulado trabaja a 100 psi con un caudal de 41 gal/h.

ANEXO XII

RESISTENCIA AL ESTRÉS

Tabla AXII. 1. Resistencia al estrés de diferentes materiales

| Material | Tensile strength (N/mm ²) | Design stress at temperature °C (N/mm ²) | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 0 to 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Carbon steel (semi-killed or silicon killed) | 360 | 135 | 125 | 115 | 105 | 95 | 85 | 80 | 70 | | |
| Carbon-manganese steel (semi-killed or silicon killed) | 460 | 180 | 170 | 150 | 140 | 130 | 115 | 105 | 100 | | |
| Carbon-molybdenum steel, 0.5 per cent Mo | 450 | 180 | 170 | 145 | 140 | 130 | 120 | 110 | 110 | | |
| Low alloy steel (Ni, Cr, Mo, V) | 550 | 240 | 240 | 240 | 240 | 240 | 235 | 230 | 220 | 190 | 170 |
| Stainless steel 18Cr/8Ni unstabilised (304) | 510 | 165 | 145 | 130 | 115 | 110 | 105 | 100 | 100 | 95 | 90 |
| Stainless steel 18Cr/8Ni Ti stabilised (321) | 540 | 165 | 150 | 140 | 135 | 130 | 130 | 125 | 120 | 120 | 115 |
| Stainless steel 18Cr/8Ni Mo 2½ per cent (316) | 520 | 175 | 150 | 135 | 120 | 115 | 110 | 105 | 105 | 100 | 95 |

La resistencia del acero al carbono para una temperatura de entre 0-50 ° C es 135 N/332.

ANEXO XIII

DETALLE DE UNIONES PARA TAPAS PLANAS

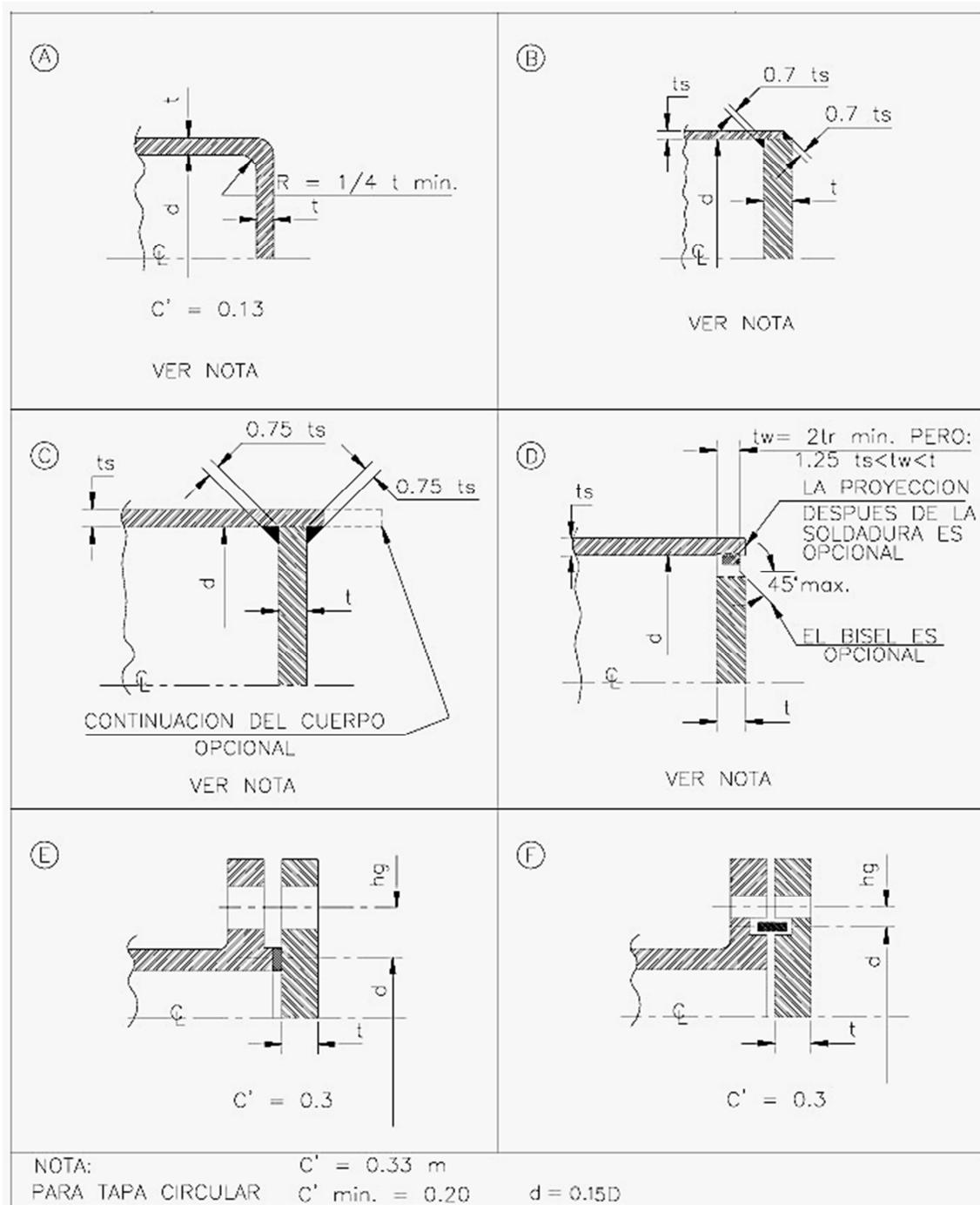


Figura AXIII. 1. Detalle de uniones para tapas planas
(León, 2001, p. 20)

ANEXO XIV

EFICIENCIA DE LA JUNTA

| TIPOS NORMA UW-12 | | EFICIENCIA DE LA JUNTA, E | | |
|----------------------|--|--|------------------------------|-----------------------|
| | | Cuando la junta es: | | |
| | | a. Radiogra- fiada total- mente | b. Examinada por zonas | c. No Examinada |
| 1 |  <p>Juntas a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.</p> | 1.00 | 0.85 | 0.70 |
| 2 |  <p>Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar</p> <p>En juntas circunferenciales únicamente</p> | 0.90 | 0.80 | 0.65 |
| 3 |  <p>Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo</p> | — | — | 0.60 |
| 4 |  <p>Junta a traslape de doble filete completo</p> | — | — | 0.55 |

Figura AXIV. 1. Tipos de juntas soldadas
(Megyesy, 1992, p.142)

La eficiencia usada para las tapas es 0,7 del caso 1, para juntas a tope hechas por doble cordón.

ANEXO XV

CÁLCULO DEL NÚMERO DE REYNOLDS PARA LA TUBERÍA DE SUCCIÓN Y DESCARGA

El número de Reynolds se determinó para cada tubería mediante las Ecuaciones [AXV.1] y [AXV.2]

Tubería de succión

$$Re_1 = \frac{v_3 * \delta * \phi_3}{\mu} = \frac{v_3 * 1\,000 \frac{kg}{m^3} * \left(\frac{3}{4} * 0,0254\right) m}{10,208 * 10^{-4} \frac{kg}{m * s}} = 18\,661,834 v_3 \quad [AXV.1]$$

Tubería de descarga

$$Re_2 = \frac{v_4 * \delta * \phi_4}{\mu} = \frac{9 * v_3 * 1\,000 \frac{kg}{m^3} * \left(\frac{0,0254}{2}\right) m}{4 * 10,208 * 10^{-4} \frac{kg}{m * s}} = 27\,992,75 v_3 \quad [AXV.2]$$

ANEXO XVI

ALTURA DE BOMBA ENTRE EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA Y ASPERSORES

En la Tabla AXVI.1. se resumen los valores que fueron usados para determinar la altura de bomba a diferentes caudales para el sistema tanque de almacenamiento de agua y aspersores mediante la Ecuación [3.24]

Tabla AXVI. 1. Datos de las tuberías en el sistema del tanque de almacenamiento de agua y aspersores

| Q (l/s) | v_3 (m/s) | Re_3 | Re_4 | f_3 | f_4 | HB (m) |
|---------|-------------|------------|------------|-------|-------|---------|
| 0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 70,740 |
| 0,1 | 0,351 | 4 364,990 | 9 821,227 | 0,042 | 0,046 | 72,225 |
| 0,2 | 0,702 | 8 729,979 | 13 094,969 | 0,041 | 0,045 | 76,579 |
| 0,3 | 1,053 | 13 094,969 | 19 642,453 | 0,039 | 0,041 | 82,957 |
| 0,4 | 1,403 | 17 459,959 | 26 189,938 | 0,039 | 0,041 | 92,411 |
| 0,5 | 1,754 | 21 824,948 | 32 737,422 | 0,037 | 0,040 | 104,006 |

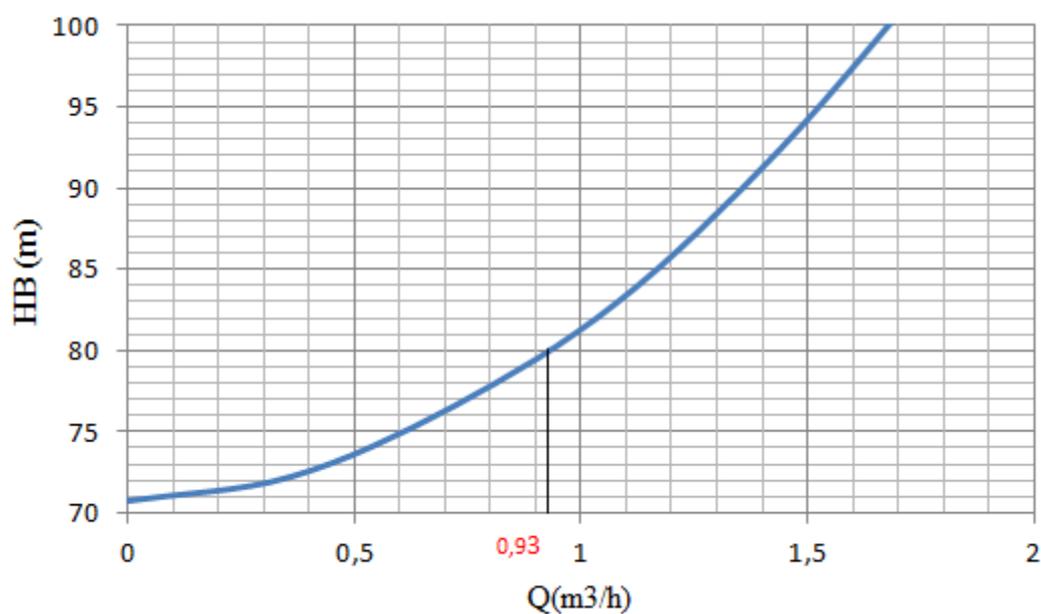


Figura AXVI. 1. Curva de la bomba del sistema tanque de almacenamiento de agua y aspersores

ANEXO XVII

ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

Tabla XVII. 1. Especificaciones bomba centrífuga

| | Descripción | Valor |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| | Producto: | CM1-8 A-R-G-E-AQQE |
| | Código: | Bajo pedido |
| | Número EAN: | Bajo pedido |
| Técnico: | Velocidad para datos de bomba | 3480 rpm |
| | Caudal real calculado: | 0.93 m ³ /h |
| | Altura resultante de la bomba: | 88.5 m |
| | Impulsores: | 8 |
| | Cierre: | AQQE |
| | Presión de trabajo máxima | 16 bar |
| | Homologaciones en placa: | CE,WRAS,ACS,UL |
| | Versión de la bomba: | A |
| | Modelo: | A |
| Materiales: | Cuerpo hidráulico: | Acero inoxidable |
| | | DIN W.-Nr. 1.4401 AISI 316 |
| | Impulsor: | Acero inoxidable |
| | | DIN W.-Nr. 1.4401 AISI 316 |
| | Código de material: | G |
| | Caucho: | EPDM |
| | Código para caucho: | E |
| Instalación: | Temperatura ambiental máxima: | 55 °C |
| | Presión de trabajo máxima | 16 bar |
| | Presión máxima a la temp. declarada | 16 bar / 90 °C |
| | Tipo de brida: | WHITWORTH THREAD RP |
| | Código de conexión: | R |
| | Aspiración: | Rp 1 |
| | Descarga: | Rp 1 |
| Líquido: | Rango de temperatura del líquido | -30 .. 90 °C |
| | Densidad: | 1000 kg/m ³ |
| Datos eléctric... | Potencia nominal - P2: | 1.04 kW |
| | Frecuencia de alimentación: | 60 Hz |
| | Tensión nominal: | 3 x 400 V |
| | Factor de trabajo: | 1 |
| | Corriente nominal: | 2.1 A |
| | Velocidad nominal: | 3340 rpm |
| | Grado de protección (IEC 34-5): | 55 |
| | Clase de aislamiento (IEC 85): | F |
| | Protección del motor: | NO |
| Otros: | Peso neto: | 15.7 kg |
| | Peso bruto: | 18.3 kg |

(GRUNDFOS, 2011)

ANEXO XVIII

ALTURA DE BOMBA ENTRE LA TOLVA Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LODOS

Se aplicó la ecuación de continuidad Ecuación [AXVIII.1] a la entrada y salida de la bomba (punto 3 y 4) de la Figura 3.10

$$Q_3 = Q_4 \rightarrow v_3 A_3 = v_4 A_4 \quad [\text{AXVIII.1}]$$

Con lo que la velocidad en el punto 4 quedó en función de la velocidad en el punto 3 mediante la Ecuación [AXVIII.2].

$$v_4 = 2,25 * v_3 \quad [\text{AXVIII.2}]$$

Los coeficientes de los accesorios de la tubería del sistema tolva y tanque de almacenamiento de lodos se indican en la Tabla AXVIII.1

Tabla AXVIII. 1. Pérdidas de carga en los accesorios a través de la tubería

| Accesorio | Pérdida | Coefficiente |
|-----------------------|---------|--------------|
| Codo 1 | 0,75 | K_1 |
| Codo 2 | 0,75 | K_2 |
| Codo 3 | 0,75 | K_3 |
| Codo 4 | 0,75 | K_4 |
| Válvula globo abierta | 6,00 | K_5 |
| Válvula globo abierta | 6,00 | K_6 |

(García, 2006, p.91)

Las pérdidas de carga totales a través del ducto se determinaron mediante la Ecuación [AXVIII.3]

$$hf_t = K_1 * \frac{v_3^2}{2g} + K_5 * \frac{v_3^2}{2g} + \frac{f_{D3}}{D_3} * L_3 * \frac{v_3^2}{2g} + (K_2 + K_3 + K_4 + K_6) * \frac{v_4^2}{2g} + \frac{f_{D4}}{D_4} * L_4 * \frac{v_4^2}{2g} \quad [\text{AXVIII.3}]$$

Reemplazando la Ecuación [AXVIII.2] y las pérdidas de carga en cada accesorio especificadas en la Tabla AXVIII.1 se obtuvieron las pérdidas totales en función de una sola velocidad (v_3), tal como se muestra en la Ecuación [AXVIII.4]

$$hf_t = 2,88 * v_3^2 + 7,499 * v_3^2 * f_{D3} + 137,28 * v_3^2 * f_{D4} \quad [\text{AXVIII.4}]$$

En la Ecuación [AXVIII.5], se observa que la altura de bomba para el sistema tolva y tanque de almacenamiento de lodos quedó en función de la velocidad en el punto 3 y del factor de fricción tanto de la tubería de succión como la de descarga.

$$H_B = 0,9 + 2,88v_3^2 + 7,499v_3^2 * f_{D3} + 137,28 * v_3^2 * f_{D4} \quad [\text{AXVIII.5}]$$

La rugosidad relativa se calculó para cada tubería a partir del diámetro de la tubería y del tipo de material (hierro galvanizado) mediante las Ecuaciones [AXVIII.6] y [AXVIII.7] (Mott, 2006, p.235)

Tubería de succión

$$\frac{\varepsilon}{D_1} = \frac{0,15 * 10^{-3} m}{\frac{3}{4} * 0,0254 m} = 0,00787 \quad [\text{AXVIII.6}]$$

Tubería de descarga

$$\frac{\varepsilon}{D_2} = \frac{0,15 * 10^{-3} m}{\frac{0,0254}{2} m} = 0,0118 \quad [\text{AXVIII.7}]$$

En la Tabla AXVIII.2. se resumen los valores que fueron usados para determinar la altura de bomba a diferentes caudales entre la tolva y el tanque de lodos mediante la Ecuación [3.39].

Tabla AXVIII. 2. Datos de las tuberías en el sistema de la tolva y tanque de lodos

| Q (l/s) | V₃ (m/s) | Re₃ | V₄ (m/s) | Re₄ | f₃ | f₄ | HB (m) |
|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------|
| 0 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,900 |
| 0,1 | 0,351 | 4 364,990 | 0,789 | 9 821,227 | 0,042 | 0,046 | 2,070 |
| 0,2 | 0,702 | 8 729,979 | 1,579 | 13 094,969 | 0,041 | 0,045 | 5,512 |
| 0,3 | 1,053 | 13 094,969 | 2,368 | 19 642,453 | 0,039 | 0,041 | 10,650 |
| 0,4 | 1,403 | 17 459,959 | 3,158 | 26 189,938 | 0,039 | 0,041 | 18,199 |
| 0,5 | 1,754 | 21 824,948 | 3,947 | 32 737,422 | 0,037 | 0,040 | 27,521 |

ANEXO XIX

BALANCE DE MASA PARA LA DOSIFICACIÓN DE LODOS

BALANCE DE MASA EN EL MOLINO

Base: 1 hora

Para el balance de masa en el molino, se utilizó las corrientes mostradas en la Figura AXIX.1.

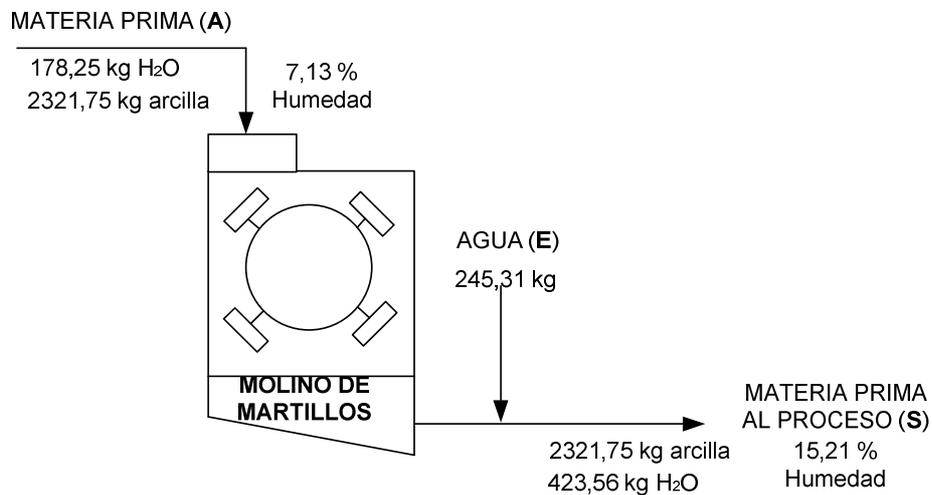


Figura AXIX. 1. Corrientes para el balance de masa en el molino

Corriente A

$$2\,500\text{ kg} * 0,0713 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg totales}} = 178,25\text{ kg agua}$$

$$2\,500\text{ kg} * 0,9287 \frac{\text{kg arcilla}}{\text{kg totales}} = 2\,321,75\text{ kg arcilla}$$

Corriente S

La corriente S tiene un porcentaje de sólidos de 84,79 y 15,21 % de agua. La

cantidad de agua que se debe agregar al proceso se calculó con la Ecuación [AXIX.1]

$$\frac{\text{masa sólidos}}{\text{masa de sólidos} + \text{masa de agua}} = \% \text{ sólidos} \quad [\text{AXIX.1}]$$

$$\frac{2321,75 \text{ kg}}{2321,75 \text{ kg} + 178,25 \text{ kg} + x} = 0.8479$$

$$x = 245,31 \text{ kg agua}$$

Los 245,31 kg agua de la corriente S corresponde a la cantidad de agua que se adiciona en la corriente E.

BALANCE DE MASA EN EL LAVADOR DE PLACAS DE CHOQUE HÚMEDAS

Corriente M

Base: 1 hora

Para el balance de masa en el colector de placas de choque húmedas, se utilizó las corrientes mostradas en la Figura AXIX.2.

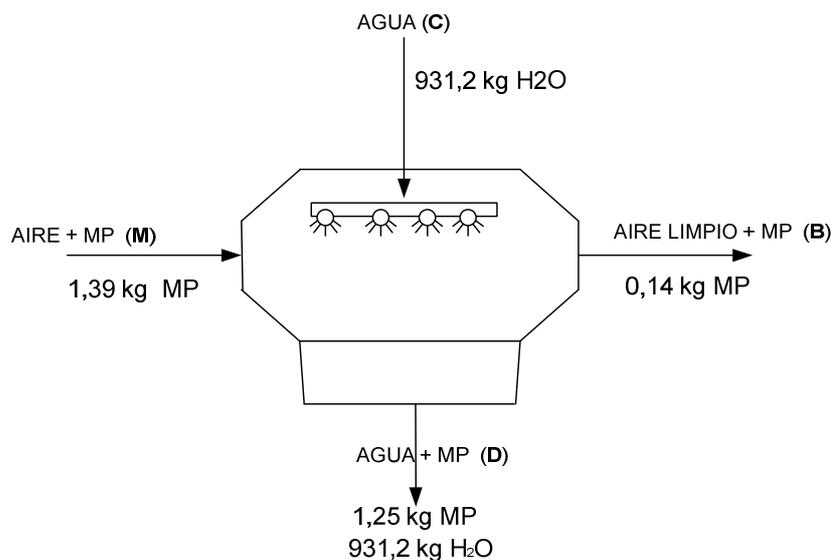


Figura AXIX. 2. Corrientes para el balance de masa en el molino

De los resultados del análisis para determinar el material particulado se obtuvo los siguientes datos:

Tabla AXIX. 1. Resultados de la concentración de material particulado

| Parámetro | Valor a C.N. | Unidades |
|----------------------|--------------|-------------------|
| Flujo | 1 978 | m ³ /h |
| Material Particulado | 0,6482 | g/m ³ |

C.N. Condiciones Normales

Luego de corregir los parámetros a las condiciones de trabajo.

Tabla AXIX. 2. Condiciones corregidas de la concentración de material particulado

| Parámetro | T 22°C | Unidades |
|-----------|---------|-------------------|
| Flujo | 2 137,4 | m ³ /h |

$$M = 2\,137,399\text{m}^3 * 0,6482 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 1\,385,46 \text{ g Material Particulado}$$

Corriente C

La cantidad de agua que ingresa en la corriente corresponde al agua que ingresa por los aspersores.

$$C = 0,9312 \text{ m}^3 * 1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 931,2 \text{ kg}$$

Corriente D

La eficiencia del lavador de placas de choque húmedas es del 90 %, la cantidad de material particulado recuperado es:

$$1\,385,46 \text{ g Material Particulado} * 0,9 = 1\,246,941 \text{ g Material Particulado}$$

La cantidad de agua es igual a la que ingresa por los aspersores

$$0,9312 \text{ m}^3 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 931,2 \text{ kg}$$

Corriente B

En la corriente B sale el material particulado que no se trató en el lavador de placas de choque húmedas.

$$B = 1\,385,46 - 1\,246,941 = 138,52 \text{ g Material Particulado}$$

BALANCE DE MASA PARA LA DOSIFICACIÓN DE LODOS AL PROCESO

Base: 1 hora

Para el balance de masa en el sistema completo para determinar la cantidad de lodos dosificados, se utilizó las corrientes mostradas en la Figura AXIX.3.

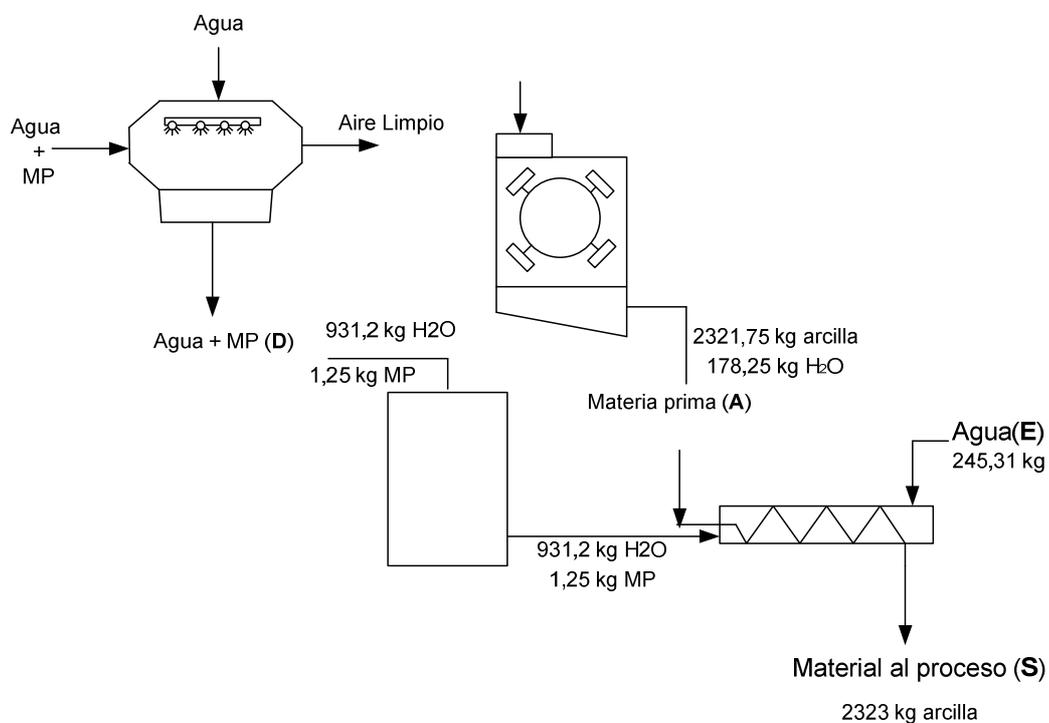


Figura AXIX. 3. Corrientes para la dosificación de lodos al proceso

Corriente A

La cantidad de arcilla que ingresa al molino es de 2,5 toneladas/hora con una humedad de 7,13 % determinada en el Literal [3.2.3.1]

$$2\,500\text{ kg} * 7,13\% = 178,25\text{ kg agua}$$

$$2\,500\text{ kg} * 92,87\% = 2\,321,75\text{ kg material particulado}$$

Corriente D

Los datos de la corriente D fueron obtenidos en el balance del lavador de placas húmedas.

$$\text{Material Particulado} = 1\,246,941\text{ g} = 1,25\text{ kg}$$

$$\text{Agua} = 0,9312\text{ kg}$$

Corriente E

La cantidad de agua que ingresa en la corriente D fue obtenida en el balance del molino.

$$E = 245,31\text{ kg agua}$$

Corriente S

$$\text{Material Particulado} = 2\,321,75\text{ kg} + 1,25\text{ kg} = 2\,323\text{ kg}$$

$$\text{Agua} = 178,25\text{ kg} + 0,93\text{ Kg} + 245,31\text{ kg} = 424,49\text{ kg}$$

ANEXO XX

COTIZACIONES DE LOS EQUIPOS AUXILIARES PARA EL SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO



MEGAFRIO

S.A.

www.megafriosa.com
megafrio@megafriosa.com

ventas 017,23

PROFORMA
RUC. 1791408381001
0020064

CLIENTE: [999999] CONSUMIDOR FINAL
CI ó RUC: 99999999 Atencion a
DIRECCION: QUITO
CIUDAD: QUITO
TELF: Faxi

FECHA DE EMISION: 19-SEPTIEMBRE-2013
 Validez: 0 Dias
 Forma Pago: *** Error ***
 002 - VENTAS MATRIZ

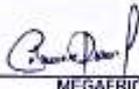
| CANT. | DESCRIPCION | V. UNITARIO | VALOR TOTAL |
|---|--|-------------|--|
| 1.00 | 06821002 VENTILADOR CENTRIFUGO SIMPLE ENTRADA 56-18/6 | 395.00 | 395.0000 I |
| 1.00 | 62018014 MOTOR ELECTRICO 3HP 380VRFM 1MEL 220V INCLUYE POLEAS DESALINHADO Y BANDA TIPO A | 360.00 | 360.0000 I |
| 1.00 | 92012008 WALIDEX DE LA OFERTA 30 05AG | | I |
|  | | | |
| 90%: OCHOCIENTOS CUARENTA Y TRES Con..36/100 Dolares | | | |
| _____ CLIENTE |  _____ MEGAFRIO | 0.0000 I | 755.0000 0.00 755.00 90.36 845.36 |

Figura AXX. 1. Proforma del extractor centrífugo de aspas radiales



Spraying Systems del Ecuador Cia. Ltda.

Cdla. Kennedy Norte, 1ra. Etp. Calle José Falconi, Mz. 103, Solar 12, Cond. Ana María, 1er. Piso - Telf.: (+593 4) 2294931 - (+593 4) 2693860

Código : 1657

Compañía : ANA MARIA ALVAREZ

Attn. :

Dirección :

Teléfono :

COTIZACION

Página : 01

Cotización #: 01549

Fecha Cotiz.: 03-10-2013

R.U.C.: 0991475095001

| Artículo | Descripción | Cant. | Precio | SubTotal |
|------------------|--------------------|-------|---------|----------|
| AA430ML-1-PP-200 | STRAINER, PP | 1 | \$32,34 | \$32,34 |
| 1/4LNN-26 | HYD.ATOM.NOZ,BRASS | 6 | \$45,78 | \$274,68 |

Forma de Pago Contado

Validez de la cotización: 15 días.

Tiempo de entrega: 0 días laborables.

| | |
|----------------|----------|
| Base Imponible | \$307,02 |
| Descuentos | |
| Importe IVA | \$36,84 |
| Total Pedido | \$343,86 |

Atentamente.

Leonardo Crespo

Spraying Systems del Ecuador

Figura AXX. 2. Proforma de los aspersores y filtro



Datos del Cliente

CONSUMIDOR FINAL - QUITO

R.U.C.: 99999994

Código: 99999994

Ciudad:

Telef: -

Condiciones Comerciales

ALMACEN QUITO - MIGUEL MARTINEZ B.
(02) 2468564 Ext. 161
mmartinez@la-llave.com

COTIZACIÓN No. 0029295

Datos de Venta

Página 1 de 1

Lugar y fecha emisión: QUITO, 27 de Septiembre de 2013 11:21:44

Orden de Compra:

No. de Pedido: Q0 - 29295

Transportista:

Bodega de Despacho: ADMINISTRACION QUITO

Vendedor: ALMACEN QUITO

Condición de Pago:

Oferta Válida Hasta: 27/09/13

| CÓDIGO | CANT. | DESCRIPCIÓN | T/L | U.M. | PRECIO UNITARIO | PRECIO NETO | SUBTOTAL |
|---------|-------|--|-----|------|-----------------|-------------|----------|
| 01-2653 | 1.00 | ALUM/BUNA/PP 1/2 15.5GPM BOMBA NEUMÁTICA WILDEN P1/AAPPP/BNS/BN/ABN Q=1gpm --- h=260ft --- h=80m AIRE: 3cfm@120psi | S | UN | 778.35 | 778.35 | 778.35 |
| 5000922 | 1.00 | FNI COMPR SKM10 2HP 50LT 110V COMPRESOR DE PISTÓN 5cfm @ 120psi ENTREGA 4 DÍAS ENSAMBLE GENERICO EQUIPOS IND | S | UN | 544.05 | 520.00 | 520.00 |

| | | | |
|--|------------------|--------------------|----------|
| | | Subtotal: | 1,322.40 |
| | | Descuento: | 24.05 |
| | | Valor Neto: | 1,298.35 |
| | | Base 0%: | |
| | | Base 12%: | 1,298.35 |
| | | IVA 12%: | 155.80 |
| | | Total: | 1,454.15 |
| | Recibi Conforme: | | |
| | Firma y Sello | | |
| | Nombre:..... | | |
| | Ci. | | |

Figura AXX. 3. Proforma de la bomba neumática

COMERCIAL KYWI S.A. AUTOIMPRESORES AUTORIZACION S.R.L. 1112210587 DEL 18/ENE/2013
 RUC 1790041220001 CONTRIBUYENTE ESPECIAL-RESOL. SRI 5368
 Matriz : AV. 10 DE AGOSTO N24-59 Y LUIS CORDERO
 QUITO Telf: 023987900 P R O F O R M A D O L A R E S
 AGENCIA 06 (LA PRENSA) Telf: 022592637 022592638 DOCUMENTO SIN VALOR COMERCIAL
 Sucursal : AV. LA PRENSA N55-186 Y LA PULIDA QUITO
 Señor(es):CONSUMIDOR FINAL
 Código: 888885-000000 RUC : 9999999999999
 Dirección: QUITO Vend: CONSULTAS
 Ciudad : QUITO Telf. : 222222222 Fecha de Emisión 17/SEP/2013 PAG. 1/1

| CODIGO | DESCRIPCION | CANT. | P.UNITARIO | TOTAL |
|--------|---------------------------------------|-------|-------------|---------|
| 159220 | TUBO H.G.ASTM 1/2"X6M FUJI CED.40 | 1 | \$15,580357 | \$15,58 |
| 159239 | TUBO H.G. ASTM 3/4"X6M FUJI CED.40 | 1 | \$32,767857 | \$32,77 |
| 167231 | CODO H.G. 3/4" X 90 | 4 | \$0,339286 | \$1,36 |
| 189871 | BOMBA PERIFERICA 1/2HP 110/220V PAOLO | 1 | \$34,357143 | \$34,36 |

SUBTOTAL \$84,07
 DESCUENTO Tarifa 12 \$0,00
 DESCUENTO Tarifa 0 \$0,00
 TOTAL \$84,07

| Vta.tarifa 12 | Vta.tarifa 0 | Total Vta.Neta | IVA Tar. 12 | IVA Tar. 0 | TOTAL A PAGAR |
|---------------|--------------|----------------|-------------|------------|---------------|
| \$84,07 | \$0,00 | \$84,07 | \$10,09 | \$0,00 | \$94,16 |

Esta proforma tiene validez solo con el nombre, firma del vendedor y sello de COMERCIAL KYWI S.A.
 En el caso de existir cambios de precios por nuestros proveedores y/o modificaciones cambiarias oficiales que afecten al costo de la mercadería, nos veremos obligados a actualizar precios en el momento de la facturación previo su conocimiento.

Los precios unitarios de esta proforma ** NO incluyen I.V.A. **

QUITO , 17 de SEP 2013

CONSUMIDOR FINAL

Ident: 8636

FIRMA : 
 ESTABLECIMIENTO

FIRMA : _____
 CLIENTE

Figura AXX. 4. Proforma de los accesorios del sistema de bombeo

ANEXO XXI

CÁLCULO DEL PRECIO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

El valor de la bomba en Argentina es 650,98 dólares. Para determinar en Ecuador el precio total incluido envío e impuestos, se usó el 20 % de Ad- Valorem (Derecho de aduana), 0,5 % de Fodinfra (Fondo de desarrollo para la infancia) y 12 % de IVA. (Servicio Nacional de Aduana del Ecuador, 2013, p.1)

El Ad- valorem se calculó con la Ecuación [AXXI.1]

$$\text{Advalorem} = 650,98 \$ * 20\% = 130,19 \$ \quad \text{[AXXI.1]}$$

El Fodinfra se calculó con la Ecuación [AXXI.2]

$$\text{Fodinfra} = 650,98 \$ * 0,5\% = 3,25 \$ \quad \text{[AXXI.2]}$$

El IVA se determinó mediante el 12 % del costo de la bomba incluido el ad- valorem y fodinfra.

$$\text{IVA} = 12\%(650,98 + 130,19 + 3,25)\$ = 94,13 \$$$

El total de impuestos para importar la bomba de agua es:

$$\text{Impuestos} = 130,19 \$ + 3,25 \$ + 94,13 \$ = 227,57$$

El valor del envío(flete) es de 550 \$ por 18,3 kg (peso de la bomba). (DHL, 2013, p.1)

El precio total de la bomba en Ecuador se calculó con la Ecuación [AXXI.3]:

$$\text{Precio total} = \text{precio bomba} + \text{precio impuestos} + \text{precio flete} \quad \text{[AXXI.3]}$$

$$\text{Precio total} = 650,98 \$ + 227,57 \$ + 550 \$ = 1\,428,55$$

ANEXO XXII

DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA Y ENERGÍA ELÉCTRICA PARA EL SISTEMA DE CONTROL PARA MATERIAL PARTICULADO

Costo de agua

La cantidad de agua que necesitan los aspersores es 0,93 m³/h, pero para los costos se consideró solo el 70 %, ya que el 30 % es agua que la empresa agrega actualmente al proceso.

$$0,93 \frac{m^3}{h} * 0,7 = 0,652 \frac{m^3}{h}$$

El costo de agua que tendrá que pagar la empresa con un precio de 0,5 \$/m³ es:

$$0,65 \frac{m^3}{h} * 0,5 \frac{\$}{m^3} * \frac{16 h}{1 día} * \frac{300 días}{1 año} = 1 564,32 \frac{\$}{año}$$

Costo de luz

La potencia requerida por las bombas y el extractor fueron determinadas en el capítulo 3 a partir de la altura de bomba y pérdidas de carga respectivamente.

Tabla AXXII. 1. Potencia requerida por las bombas y extractor

| Equipo auxiliar | Potencia (kW) |
|--------------------------|---------------|
| Extractor centrífugo | 0,108 |
| Bomba centrífuga | 0,339 |
| Bomba de doble diafragma | 0,744 |
| Total | 1,191 |

El costo de la energía eléctrica con un valor de 0,12 ctvs/kw basado en las

potencias mínimas de las bombas y extractor es:

$$1,19 \text{ kW} * 0,12 \frac{\$}{\text{kWh}} * \frac{16 \text{ h}}{1 \text{ día}} * \frac{300 \text{ día}}{1 \text{ año}} = 686,19 \frac{\$}{\text{año}}$$

El costo total por servicios básicos es:

$$C_{SB} = 1\,564,32 + 686,19 = 2\,250,05 \frac{\$}{\text{año}}$$