



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO,  
POR MEDIO DEL USO DE FILTROS DE SUCCIÓN *JET PULSE*, EN UNA PLANTA DE  
TRITURACIÓN DE PIEDRA CALIZA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ESCUINTLA,  
DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**

**Marvin Josué Castillo García**

Asesorado por el Ing. Erick Leonel Hernández Girón

Guatemala, septiembre de 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO,  
POR MEDIO DEL USO DE FILTROS DE SUCCIÓN *JET PULSE*, EN UNA PLANTA DE  
TRITURACIÓN DE PIEDRA CALIZA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ESCUINTLA,  
DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARVIN JOSUÉ CASTILLO GARCÍA**

ASESORADO POR EL ING. ERICK LEONEL HERNÁNDEZ GIRÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2023



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |  |
|------------|--|
| DECANO     | Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)  |
| VOCAL II   | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez      |
| VOCAL III  | Ing. José Milton de León Bran            |
| VOCAL IV   | Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente |
| VOCAL V    | Br. Fernando José Paz González           |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez          |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|             |  |
|-------------|--|
| DECANA      | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada      |
| EXAMINADORA | Inga. María Martha Wolford E. de Hernández |
| EXAMINADORA | Inga. Sindy Massiel Godínez de Dávila      |
| EXAMINADOR  | Ing. José Danilo González Trejo            |
| SECRETARIO  | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez            |



## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO,  
POR MEDIO DEL USO DE FILTROS DE SUCCIÓN *JET PULSE*, EN UNA PLANTA DE  
TRITURACIÓN DE PIEDRA CALIZA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ESCUINTLA,  
DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha agosto de 2022.



**Marvin Josué Castillo García**



Ing. Cesar Ernesto Urquizú Rodas.  
Director de Escuela de Mecánica Industrial.  
Facultad de Ingeniería.  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente.

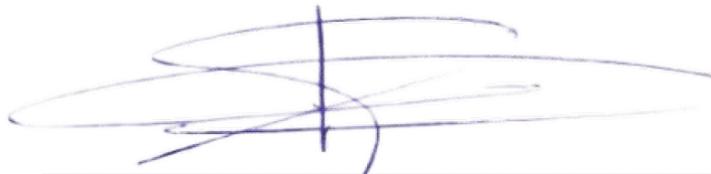
Estimado Ing. Urquizú Rodas

Por este medio, hago constar que, con relación a la asesoría respectiva, doy como **aceptado y concluido** el desarrollo del tema de investigación de tesis del estudiante Marvin Josué Castillo García con carné 2009-25308, de la carrera Ingeniería Industrial, la cual se apega a las siguientes especificaciones.

Línea de Investigación: ambiente.

Tema desarrollado: **REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, POR MEDIO DEL USO DE FILTROS DE SUCCIÓN *JET PULSE*, EN UNA PLANTA DE TRITURACIÓN DE PIEDRA CALIZA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ESCUINTLA, DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA.**

Atentamente.



Ingeniero Industrial Erick Leonel Hernández Girón

Colegiado número 6,586 *Erick L. Hernández G.*  
Guatemala, 26 de enero de 2023 *Colegiado No. 6586*





ESCUELA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

REF.REV.EMI.053.023

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, POR MEDIO DEL USO DE FILTROS DE SUCCIÓN JET PULSE, EN UNA PLANTA DE TRITURACIÓN DE PIEDRA CALIZA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ESCUINTLA, DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**, presentado por el estudiante universitario **Marvin Josué Castillo García**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

María Martha Wolford Estrada

Inga. María Martha Wolford de Hernández  
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, agosto de 2023.

/mgp





ESCUELA DE  
INGENIERÍA MECÁNICA INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

LNG.DIRECTOR.191.EMI.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, POR MEDIO DEL USO DE FILTROS DE SUCCIÓN JET PULSE, EN UNA PLANTA DE TRITURACIÓN DE PIEDRA CALIZA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ESCUINTLA, DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**, presentado por: **Marvin Josué Castillo García**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Firmada digitalmente por  
Cesar Ernesto Urquizu Rodas  
Motivo: Ingeniero Industrial  
Ubicación: Facultad de  
Ingeniería, Escuela de  
Ingeniería Mecánica  
Industrial, USAC  
Colegiado 4,272  
Periodo: julio a diciembre año  
2023

Ing. César Ernesto Urquizú Rodas  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, septiembre de 2023.



LNG.DECANATO.OI.653.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, POR MEDIO DEL USO DE FILTROS DE SUCCIÓN JET PULSE, EN UNA PLANTA DE TRITURACIÓN DE PIEDRA CALIZA, UBICADA EN EL MUNICIPIO DE ESCUINTLA, DEPARTAMENTO DE ESCUINTLA**, presentado por: **Marvin Josué Castillo García**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, septiembre de 2023

JFGR/gaoc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>Mi familia</b> | Por darme la vida y sabiduría para poder alcanzar esta meta. Por su amor incondicional que será siempre una inspiración.  |
| <b>Mi mamá</b>    | Por todo el apoyo incondicional durante toda mi vida, en especial en mi formación académica, por nunca dejar de creer en mí.  |
| <b>Mi hermana</b> | Por ser un apoyo en toda mi formación.  |
| <b>Mi hermano</b> | Por estar conmigo en todo momento.  |
| <b>Mis tíos</b>   | Por estar siempre a mi lado y por sus consejos.   |
| <b>Mi sobrino</b> | Por mostrarme el mundo desde otra perspectiva.  |
| <b>Mis amigos</b> | Sobre todo, aquellos que fueron fuente de motivación para no claudicar.   |
| <b>A todos</b>    | Aquellos que fueron parte de mi vida, los que creyeron y los que dejaron de creer, a los que están, a los que siempre estuvieron, a los que se fueron, a los que llegaron tarde y a los que nunca estuvieron. |



## AGRADECIMIENTOS A:

|   |  |
|---|--|
| <b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b> | Mi <i>alma mater</i> , mi segundo hogar y gran fuente de inspiración, por las grandes enseñanzas de sus mártires, sus muros y sus plazas.    |
| <b>Facultad de Ingeniería</b>                 | La unidad académica que me acogió desde el inicio de mi carrera universitaria, por los conocimientos adquiridos en sus aulas y sus pasillos. |
| <b>Mi familia</b>                             | Por nunca dejarme de apoyar durante todo este proceso, por ser siempre ese soporte para caer y levantarme las veces que fueron necesarias.   |
| <b>Mis amigos</b>                             | Por su importante influencia en mi vida, el apoyo brindado, las experiencias, las risas, las tristezas y los enojos.                         |
| <b>Mi asesor</b>                              | Por todos los consejos para el buen desarrollo de este trabajo de investigación y por la motivación para concluirlo con satisfacción.        |



## ÍNDICE GENERAL

|   |       |
|---|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....                                 | IX    |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                       | XIII  |
| GLOSARIO .....  | XV    |
| RESUMEN .....   | XIX   |
| OBJETIVOS.....  | XXI   |
| INTRODUCCIÓN .....  | XXIII |
| <br>  |       |
| 1. GENERALIDADES.....   | 1     |
| 1.1. Departamento de Escuintla .....                          | 1     |
| 1.1.1. Historia .....   | 2     |
| 1.1.2. Ubicación geográfica.....                              | 3     |
| 1.1.3. Demografía .....                                       | 5     |
| 1.2. La empresa Proyectos Industriales de Centroamérica ..... | 6     |
| 1.2.1. Reseña histórica .....                                 | 7     |
| 1.2.2. Ubicación .....  | 8     |
| 1.2.3. Misión.....  | 8     |
| 1.2.4. Visión .....   | 8     |
| 1.2.5. Valores éticos .....                                   | 8     |
| 1.2.6. Organización .....                                     | 9     |
| 1.2.6.1. Organigrama.....                                     | 9     |
| 1.2.7. Tipos de servicios .....                               | 10    |
| 1.3. Área de Proyectos Industriales de Proinca.....           | 11    |
| 1.3.1. Departamento de Administración de Proyectos .....      | 12    |
| 1.3.2. Departamento de Mercadeo .....                         | 13    |
| 1.3.3. Departamento de Proyectos Generales .....              | 14    |

|      |          |  |    |
|------|----------|--|----|
|      | 1.3.3.1. | División de mantenimiento .....                            | 14 |
|      | 1.3.3.2. | División de metal-mecánica.....                            | 15 |
|      | 1.3.3.3. | División de canteras .....                                 | 15 |
| 1.4. |          | Planta de trituración .....                                | 16 |
|      | 1.4.1.   | Administración general .....                               | 17 |
|      | 1.4.2.   | Departamento de Proyectos .....                            | 18 |
|      | 1.4.3.   | Departamento de Geología .....                             | 19 |
|      | 1.4.3.1. | Recursos naturales explotados .....                        | 19 |
|      | 1.4.3.2. | Piedra caliza.....   | 19 |
| 1.5. |          | Filtros de succión (de piedra caliza).....                 | 20 |
|      | 1.5.1.   | Definición técnica.....                                    | 22 |
|      | 1.5.2.   | Principio de funcionamiento.....                           | 22 |
|      | 1.5.2.1. | Filtros de sacudido mecánico .....                         | 23 |
|      | 1.5.2.2. | Filtros con limpieza por aire a la inversa<br>.....        | 25 |
|      | 1.5.2.3. | Filtros con limpieza por chorro de aire<br>comprimido..... | 27 |
|      | 1.5.3.   | Componentes .....  | 27 |
|      | 1.5.4.   | Clasificación.....   | 29 |
| 1.6. |          | Filtro de succión <i>jet pulse</i> .....                   | 29 |
|      | 1.6.1.   | Sistema de limpieza.....                                   | 30 |
|      | 1.6.2.   | Elementos.....   | 33 |
|      | 1.6.3.   | Características.....                                       | 34 |
| 1.7. |          | Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social .....      | 35 |
|      | 1.7.1.   | Aspectos legales.....                                      | 36 |
|      | 1.7.1.1. | Covid 19 .....   | 36 |
| 1.8. |          | Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.....           | 36 |
|      | 1.8.1.   | Aspectos legales.....                                      | 37 |
|      | 1.8.2.   | Permisos para trabajos a cielo abierto.....                | 38 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 1.8.3.   | Condiciones seguras del lugar.....                       | 41 |
| 1.8.4.   | Acciones preventivas en una planta de trituración.....   | 42 |
| 1.8.5.   | Contaminación cruzada por el efecto de trituración.....  | 43 |
| 1.9.     | Mantenimiento.....                                       | 44 |
| 1.9.1.   | Definición.....  | 45 |
| 1.9.2.   | Tipos de mantenimiento.....                              | 45 |
| 1.9.2.1. | Mantenimiento preventivo.....                            | 45 |
| 1.9.2.2. | Mantenimiento correctivo.....                            | 46 |
| 1.9.2.3. | Mantenimiento predictivo.....                            | 46 |
| 1.9.2.4. | Mantenimiento proactivo.....                             | 46 |
| 1.9.2.5. | Mantenimiento evolutivo.....                             | 46 |
| 2.       | SITUACIÓN ACTUAL.....                                    | 49 |
| 2.1.     | Situación actual del área de trituración.....            | 49 |
| 2.1.1.   | Procesos de clasificación de minerales.....              | 52 |
| 2.1.1.1. | Materiales procesados en trituración ...                 | 52 |
| 2.1.2.   | Maquinaria y equipos en el proceso.....                  | 53 |
| 2.1.2.1. | Equipos industriales.....                                | 55 |
| 2.1.2.2. | Equipos mecánicos.....                                   | 55 |
| 2.1.2.3. | Tipos de mantenimientos.....                             | 56 |
| 2.2.     | Zona de trituración.....                                 | 58 |
| 2.2.1.   | Acciones típicas de la trituración.....                  | 59 |
| 2.2.2.   | Procesado de piedra caliza.....                          | 60 |
| 2.3.     | Medio ambiente.....                                      | 61 |
| 2.3.1.   | Protocolos de monitoreo en la cantera.....               | 62 |
| 2.3.2.   | Actividades de contención de partículas suspendidas..... | 63 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.3.3. | Actividades de limpieza diaria.....  | 64 |
| 2.4.   | Departamento de seguridad e higiene industrial .....   | 64 |
| 2.4.1. | Salud y seguridad ocupacional.....   | 65 |
| 2.4.2. | Equipo de protección personal .....  | 66 |
| 2.4.3. | Riesgos laborales .....  | 67 |
| 2.5.   | Departamento de administración .....   | 67 |
| 2.5.1. | Disposiciones finales de los desechos<br>contaminantes .....   | 69 |
| 2.5.2. | Disposiciones finales de los materiales<br>contaminantes .....   | 69 |
| 2.5.3. | Equipos de contención de los residuos .....  | 70 |
| 2.6.   | Recolección de desechos .....  | 71 |
| 2.6.1. | Recolección de desechos comunes .....  | 71 |
| 2.6.2. | Recolección de desechos de piedra caliza.....  | 71 |
| 3.     | PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN<br>LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, POR MEDIO DEL USO DE<br>FILTRO DE SUCCIÓN <i>JET PULSE</i> ..... | 73 |
| 3.1.   | Área de trituración.....   | 73 |
| 3.1.1. | Control de partículas.....   | 74 |
| 3.1.2. | Calidad del aire.....  | 76 |
| 3.2.   | Torres de limpieza húmeda.....   | 77 |
| 3.2.1. | Ventajas.....  | 78 |
| 3.2.2. | Desventajas.....   | 79 |
| 3.3.   | Tipos de torres de limpieza húmedas.....   | 80 |
| 3.3.1. | Torres de aspersion.....   | 80 |
| 3.3.2. | Torres de aspersion ciclónica .....  | 82 |
| 3.3.3. | Torres de limpieza dinámica.....   | 84 |
| 3.3.4. | Torres de limpieza de orificio .....   | 85 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 3.4.     | Filtros de mangas .....   | 86  |
| 3.4.1.   | Colectores de mangas con limpieza por<br>sacudido mecánico .....                                  | 89  |
| 3.4.2.   | Colectores de mangas con limpieza por aire a la<br>inversa .....                                  | 92  |
| 3.4.3.   | Otros tipos de filtros de mangas .....  | 94  |
| 3.5.     | Colector de polvo de succión <i>jet pulse</i> con limpieza por<br>chorro de aire comprimido ..... | 96  |
| 3.5.1.   | Funcionamiento .....  | 98  |
| 3.5.2.   | Componentes.....  | 101 |
| 3.5.3.   | Teoría de filtración por tela .....   | 103 |
| 3.5.4.   | Diseño de un filtro .....   | 106 |
| 3.5.4.1. | Relación aire-tela de aplicaciones<br>similares .....   | 110 |
| 3.5.4.2. | Relación aire-tela según el tipo de<br>operación.....   | 112 |
| 3.6.     | Forma y características de diseño de equipos .....  | 113 |
| 3.6.1.   | Cajas a presión .....   | 114 |
| 3.6.2.   | Construcción estándar o por pedido .....  | 115 |
| 3.7.     | Mantenimiento y resultados.....   | 117 |
| 3.7.1.   | Sistema de limpieza.....  | 117 |
| 3.7.2.   | Mangas filtrantes.....  | 121 |
| 3.7.3.   | Mejoras en materiales filtrantes .....  | 122 |
| 3.8.     | Incorporación de una gestión ambiental.....   | 125 |
| 3.8.1.   | Manejo responsable de desechos de piedra<br>caliza.....   | 126 |
| 3.8.2.   | Aprovechamiento de los desechos .....   | 127 |
| 3.8.3.   | Manejo responsable de los desechos finales.....   | 127 |
| 3.8.4.   | Requisitos mínimos del Ministerio de Ambiente...  | 128 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 3.9.    | Capacitaciones.....   | 129 |
| 3.9.1.  | Uso y aprovechamiento del equipo <i>jet pulse</i> .....                         | 133 |
| 3.9.2.  | Capacitación para operaciones y manejo del<br>equipo.....                       | 133 |
| 3.9.3.  | Capacitación para los trabajadores de cantera ....                              | 134 |
| 3.10.   | Costos de implementar la gestión .....  | 135 |
| 3.10.1. | Costos por instalar el equipo .....   | 137 |
| 3.10.2. | Costos por mantenimiento.....   | 138 |
| 3.10.3. | Costos de operación.....  | 138 |
| 4.      | IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA .....  | 141 |
| 4.1.    | Método de control de partículas .....   | 141 |
| 4.1.1.  | Técnicas de monitoreo de descargas al medio<br>ambiente.....                    | 142 |
| 4.1.2.  | Acciones reactivas por fugas al medio ambiente<br>de piedra caliza.....         | 143 |
| 4.2.    | Monitoreo y control de torres de limpieza.....                                  | 144 |
| 4.2.1.  | Capacidad de procesamiento esperado por<br>jornada diaria de procesamiento..... | 145 |
| 4.2.2.  | Monitoreo y supervisión de las torres .....                                     | 145 |
| 4.3.    | Selección de torre de limpieza húmeda .....                                     | 146 |
| 4.3.1.  | Beneficios de la torres de aspersión.....                                       | 146 |
| 4.3.2.  | Beneficios de la torre de aspersión ciclónica.....                              | 147 |
| 4.3.3.  | Beneficios de la torre dinámica.....  | 147 |
| 4.3.4.  | Beneficios de la torre de orificio.....   | 148 |
| 4.4.    | Monitoreo y control de los filtros mangas.....                                  | 150 |
| 4.4.1.  | Actividades propias del monitoreo .....   | 150 |
| 4.4.2.  | Limpieza de los colectores .....  | 151 |
| 4.4.3.  | Otros tipos de limpiezas .....  | 153 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.5.    | Instalación del filtro <i>jet pulse</i> .....                                | 154 |
| 4.5.1.  | Selección del filtro eficiente.....  | 156 |
| 4.5.2.  | Verificación de la instalación.....  | 157 |
| 4.5.3.  | Programación de los componentes.....   | 157 |
| 4.6.    | Instalación de los equipos auxiliares .....                                  | 158 |
| 4.6.1.  | Verificación de las cajas a presión.....                                     | 159 |
| 4.6.2.  | Capacitación del personal responsable .....                                  | 159 |
| 4.7.    | Acciones de mantenimiento.....   | 160 |
| 4.7.1.  | Acciones preventivas de limpieza .....                                       | 161 |
| 4.7.2.  | Monitoreo de mangas filtrantes.....  | 162 |
| 4.7.3.  | Seguimiento en las mejoras de materiales<br>filtrantes .....                 | 162 |
| 4.8.    | Gestión ambiental y su implementación .....                                  | 163 |
| 4.8.1.  | Tareas diarias para el manejo de los desechos<br>de piedra caliza.....       | 164 |
| 4.8.2.  | Monitoreo y aprovechamiento de los desechos<br>generales de la cantera.....  | 165 |
| 4.8.3.  | Tareas mensuales de los desechos finales .....                               | 165 |
| 4.8.4.  | Verificación mensual según los requisitos del<br>Ministerio de Ambiente..... | 166 |
| 4.9.    | Actividades de evaluación de las capacitaciones.....                         | 167 |
| 4.9.1.  | Evaluación del aprovechamiento de equipo <i>jet<br/>pulse</i> .....          | 169 |
| 4.9.2.  | Evaluación de operaciones y manejo del equipo .                              | 169 |
| 4.9.3.  | Evaluación de los trabajadores de cantera .....                              | 170 |
| 4.10.   | Costos a analizar de implementar la gestión.....                             | 170 |
| 4.10.1. | Costos por instalar el equipo seleccionado.....                              | 171 |
| 4.10.2. | Costos del mantenimiento programado .....                                    | 172 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.10.3. | Costos de operación según el equipo<br>seleccionado.....               | 172 |
| 5.      | SEGUIMIENTO.....   | 175 |
| 5.1.    | Beneficios de instalar los filtros de succión <i>jet pulse</i> .....   | 175 |
| 5.1.1.  | Reducción de contaminantes al medio ambiente .                         | 176 |
| 5.1.2.  | Reducción de contaminación por partículas<br>suspendidas .....         | 176 |
| 5.2.    | Análisis de reportes semanales .....                                   | 177 |
| 5.2.1.  | Reporte de contención en filtros manga .....                           | 178 |
| 5.2.2.  | Pesaje de desechos recolectados en los filtros ....                    | 179 |
| 5.3.    | Verificación de la gestión ambiental.....                              | 179 |
| 5.3.1.  | Desechos recolectados .....  | 180 |
| 5.3.2.  | Materiales contaminantes recolectados.....                             | 181 |
| 5.4.    | Costos por mantenimiento a los filtros de succión <i>jet pulse</i> ... | 181 |
| 5.4.1.  | Mano de obra.....  | 182 |
| 5.4.2.  | Materiales .....   | 182 |
| 5.5.    | Estadísticas.....  | 183 |
| 5.5.1.  | Estadística descriptiva de los valores<br>recolectados .....           | 184 |
| 5.6.    | Auditorías .....   | 184 |
| 5.6.1.  | Auditoría interna .....  | 185 |
| 5.6.2.  | Auditoría externa .....  | 186 |
|         | CONCLUSIONES.....  | 187 |
|         | RECOMENDACIONES .....  | 189 |
|         | REFERENCIAS .....  | 191 |
|         | ANEXOS.....  | 195 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Figura 1.</b>  | Extracto histórico de Escuintla .....  | 3  |
| <b>Figura 2.</b>  | Ubicación de Escuintla .....   | 4  |
| <b>Figura 3.</b>  | Organigrama de PROINCA .....   | 10 |
| <b>Figura 4.</b>  | Servicios que brinda PROINCA.....  | 11 |
| <b>Figura 5.</b>  | Filtro de succión con bolsas de tela.....  | 21 |
| <b>Figura 6.</b>  | Filtro por sacudido mecánico.....  | 24 |
| <b>Figura 7.</b>  | Esquema de aire de filtro de aire a la inversa .....   | 26 |
| <b>Figura 8.</b>  | Componentes del filtro de mangas .....   | 28 |
| <b>Figura 9.</b>  | Sistema de limpieza .....  | 31 |
| <b>Figura 10.</b> | Fase de filtración .....   | 32 |
| <b>Figura 11.</b> | Fase de limpieza de la bolsa .....   | 33 |
| <b>Figura 12.</b> | Elementos del filtro <i>jet pulse</i> .....  | 34 |
| <b>Figura 13.</b> | Secuencia de limpieza recomendada en filtro <i>jet pulse</i> .....   | 35 |
| <b>Figura 14.</b> | Formulario de la Dirección General de Minería .....  | 39 |
| <b>Figura 15.</b> | Requisitos para presentar solicitud de licencia de explotación,<br>exploración o reconocimiento a cielo abierto..... | 40 |
| <b>Figura 16.</b> | Vista general del área de trituración .....  | 49 |
| <b>Figura 17.</b> | Zona de trituración.....   | 50 |
| <b>Figura 18.</b> | Trituradora Allis Chalmers .....   | 54 |
| <b>Figura 19.</b> | Torre de aspersión .....   | 82 |
| <b>Figura 20.</b> | Torre de limpieza de aspersión ciclónica.....  | 84 |
| <b>Figura 21.</b> | Funcionamiento del filtro de mangas con limpieza por<br>sacudido mecánico.....                                       | 90 |

|                   |   |     |
|-------------------|---|-----|
| <b>Figura 22.</b> | Montaje de las bolsas filtrantes .....  | 91  |
| <b>Figura 23.</b> | Funcionamiento del filtro con limpieza con aire a la inversa .....  | 94  |
| <b>Figura 24.</b> | Ventajas y desventajas de utilizar limpieza por aire comprimido.....  | 97  |
| <b>Figura 25.</b> | Filtro de manga con limpieza por aire comprimido ( <i>jet pulse</i> ) .....                                       | 99  |
| <b>Figura 26.</b> | Bolsa en funcionamiento con flujo de chorro de aire comprimido.....   | 101 |
| <b>Figura 27.</b> | Distribución del equipo auxiliar según diseño general .....   | 103 |
| <b>Figura 28.</b> | Puntos críticos de desalineamiento a evitar para obtener resultados eficientes en la limpieza de los filtros..... | 119 |
| <b>Figura 29.</b> | Secuencia de limpieza correcta e incorrecta.....  | 120 |
| <b>Figura 30.</b> | Ventajas de utilizar tela con membrana BHA-TEX.....   | 123 |
| <b>Figura 31.</b> | Ejemplo del sistema de aire a la inversa.....   | 153 |
| <b>Figura 32.</b> | Distribución general de la instalación.....   | 156 |

## TABLAS

|                 |   |     |
|-----------------|---|-----|
| <b>Tabla 1.</b> | Resumen demográfico del departamento de Escuintla según el último informe actualizado por el Ministerio de Economía.....                | 5   |
| <b>Tabla 2.</b> | Tamaños típicos de emisiones atmosféricas de partículas.....  | 75  |
| <b>Tabla 3.</b> | Relación de aire-tela recomendada para diversos tipos de colectores de polvo.....   | 88  |
| <b>Tabla 4.</b> | Factor para calcular la superficie de tela en grueso a parte del área neta de tela.....   | 107 |
| <b>Tabla 5.</b> | Factores para relaciones de aire-tela filtros <i>jet pulse</i> .....  | 108 |
| <b>Tabla 6.</b> | Relación aire-tela para diferentes combinaciones de filtros y telas pre definidos.....  | 110 |
| <b>Tabla 7.</b> | Consideraciones en la selección de la relación de aire a tela para el diseño de colectores de polvo para filtros <i>jet pulse</i> ..... | 112 |

|                  |  |     |
|------------------|--|-----|
| <b>Tabla 8.</b>  | Clasificación de fallas en las mangas filtrantes a causa de mala gestión en la limpieza..... | 121 |
| <b>Tabla 9.</b>  | Temas a desarrollar en la capacitación.....  | 130 |
| <b>Tabla 10.</b> | Programa de capacitación para trabajar con filtro <i>jet pulse</i> .....                     | 131 |
| <b>Tabla 11.</b> | Costos de implementar la gestión .....   | 136 |
| <b>Tabla 12.</b> | Boleta para evaluar el contenido del curso .....   | 167 |
| <b>Tabla 13.</b> | Evaluación hacia el capacitador y manejo del tema.....                                       | 168 |
| <b>Tabla 14.</b> | Formato de reportes semanales propuesto .....  | 177 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b>    | <b>Significado</b>                 |
|-------------------|------------------------------------|
| °C                | Grado Celsius                      |
| kg                | Kilogramo                          |
| kV                | Kilovoltio                         |
| kW                | Kilowatt                           |
| m                 | Metro                              |
| m <sup>3</sup>    | Metro cúbico                       |
| m <sup>3</sup> /h | Metro cúbico por hora              |
| mm                | Milímetro                          |
| psi               | <i>Pound force per square inch</i> |
| ton               | Tonelada                           |



## GLOSARIO

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Aclaración</b>    | Separación de líquidos de sólidos con la intención de separar partículas, normalmente sólidas, de un líquido (aceite) que posee una densidad menor que las partículas.   |
| <b>Agua residual</b> | Son aquellas aguas que han recibido uso y cuyas cualidades han sido modificadas.   |
| <b>Biodegradable</b> | Es el producto o sustancia que puede descomponerse en los elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales. |
| <b>Confiability</b>  | Probabilidad de que una parte de la máquina o equipo esté funcionando adecuadamente en un momento preciso y bajo circunstancias definidas.   |
| <b>Contaminación</b> | Pertenencia de cualquier impureza material o energética, en un medio a niveles superiores a los normales.  |
| <b>Demanda</b>       | Hace referencia a la cantidad de productos o servicios que se solicitan o se desean en un  |

determinado mercado de una economía a un precio específico.

**Densidad**

Masa por unidad de volumen, esta dimensional puede ser expresada en  $\text{kg/m}^3$  a una temperatura específica.

**Desgaste**

Partículas pequeñas de material producidas por el rozamiento de dos superficies en contacto.

**Evaluación**

Valoración de conocimientos, actitud y rendimiento de una persona o de un servicio.

***Jet pulse***

Filtro de manga utilizado para depurar el aire a ser liberado al ambiente en sistemas de succión de aire y transporte neumático.

**Merma**

Disminución o reducción del volumen o la cantidad de una cosa.

**Monitoreo**

Proceso mediante el cual se obtienen, interpretan y evalúan los resultados de una o varias muestras, con una frecuencia de tiempo determinada.

**Orden de trabajo**

Instructivo en el cual se describen las tareas de mantenimiento a realizar por el departamento de mantenimiento.

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>Purificación</b> | Separación líquido / líquido / sólidos con la intención de separar dos fases líquidas entremezcladas y mutuamente insolubles de diferentes densidades, comúnmente los sólidos que poseen mayor densidad que los líquidos pueden ser eliminados al mismo tiempo.                  |
| <b>Rpm</b>          | Revoluciones por minuto.   |
| <b>Sedimento</b>    | Comúnmente puede ser llamado lodo, son sólidos separados de un líquido.  |
| <b>Sistema CIP</b>  | Por sus siglas en inglés: <i>cleaning in place</i> , es aquel que permite llevar a cabo la limpieza de tuberías, equipos y accesorios en línea, bombeando en contracorriente agua mezclada con algún tipo de detergente.   |
| <b>Tamiz</b>        | Pieza de tela entrelazada con separación granulométrica. Dependiendo el diámetro de la partícula que se desea atrapar, así será el calibre de separación entre sus orificios, además es utilizado para contener polvo o cualquier tipo de contaminación en espacios controlados. |



## RESUMEN

La necesidad de la investigación nace en la Empresa de Proyectos Industriales de Centroamérica (Proinca) por la continua ejecución de proyectos a cielo abierto, especialmente cuando se trata de una cantera de trituración donde se han instalado diferentes equipos industriales y se le ha dado mantenimiento a maquinaria industrial. En Escuintla está instalada una cantera que presenta un posible problema ambiental, requiriéndole que se pueda diseñar un sistema amigable con el medio ambiente, para capturar las partículas suspendidas de piedra caliza y otras partículas generadas en la trituración.

Proinca, en su compromiso ambiental, busca solucionar el problema específico de la cantera, proponiendo la instalación de filtros de succión tipo *jet pulse* con mangas para que, al ser instalados estratégicamente, se pueda captar el mayor volumen de material disperso y este mismo, además de mitigar el impacto al medio ambiente, pueda ser reincorporado como materia prima en otros procesos de transformación.

Las necesidades del entorno de la cantera y el compromiso ambiental de Proinca, son la base para diseñar el modelo eficiente que permita solucionar la dispersión de material particulado en el ambiente, y la afectación a los hogares cercanos a la planta de procesamiento. La investigación y el planteamiento de la solución estarán basados en las normas legales del país, en los reglamentos del cuidado al medio ambiente y en las guías de estudios de impacto ambiental emitidos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.



## OBJETIVOS

### General

Reducir el impacto ambiental de la emisión de material particulado, por medio de uso de filtros de succión *jet pulse* en una planta de trituración de piedra caliza, ubicada en el municipio de Escuintla, departamento de Escuintla.

### Específicos

1. Incrementar el volumen de piedra caliza recolectado, por medio de un buen diseño del filtro de succión *jet pulse*, en la planta de trituración de piedra caliza.
2. Maximizar la recolección de piedra caliza triturada, identificando las zonas donde se expulsa el mayor volumen de material particulado y configurando los equipos de contención en aquellos puntos que demandan mayor participación en recolección y contención de partículas.
3. Optimizar la recolección de desechos captados por los filtros, estandarizando la ruta de trabajo diaria, clasificando los desechos y contaminantes de la trituración de piedra caliza.
4. Minimizar los costos de recolección de piedra caliza, a través del diseño del conjunto de tareas mínimas, para el manejo de los desechos que fueron recuperados en los filtros, con la finalidad de evitar daños al medio ambiente y desechar de forma legal los residuos.

5. Reducir los costos de mantenimiento de los filtros de succión *jet pulse* por medio del diseño del programa de inspección, evitando que los desechos obstruyan los accesos.
6. Minimizar los gastos de reparación en los equipos, identificando posibles fallas, por medio de una guía de revisión diaria, antes de iniciar operaciones.
7. Aumentar la rentabilidad de la empresa, colocando el desecho recolectado por los filtros de succión *jet pulse* en el área óptima de la planta de trituración, para su futura distribución.

## INTRODUCCIÓN

La empresa Proyectos Industriales de Centroamérica (Proinca) desarrolla una amplia variedad de trabajos industriales, como ejemplo: programas de mantenimiento a equipos estacionarios, maquinaria amarilla e instalaciones. Brinda servicios a una planta de de trituración localizada en el departamento de Escuintla y tiene la capacidad de procesar hasta 3 toneladas de piedra caliza por semana, trabajando los 7 días de la misma.

Proinca, dentro del plan de trabajo, ha diseñado y desarrollado diferentes programas de mantenimiento para los equipos instalados, haciéndose necesario diseñar el conjunto de protocolos que permita reducir el impacto al medio ambiente, derivado de la generación constante de material particulado. En el proceso de piedra caliza, el material particulado es arrastrado por las corrientes de aire, puede extenderse hasta 2 kilómetros del punto de procesamiento, demarcando la zona de incidencia del impacto.

Es precisamente este el origen de la iniciativa de la reducción del impacto al ambiente, la retención de partículas suspendidas iniciará en los filtros, por lo que es importante diseñar las dimensiones, tamizado y dirección de captación hacia la mayor zona de procesamiento. Posteriormente, es relevante diseñar la instalación y su respectiva graduación y regulación de los filtros de succión *jet pulse*.

En el desarrollo del presente trabajo de graduación se citan artículos de investigaciones relacionadas a la reducción del impacto del material particulado al ambiente, que evidencian la eficacia de estos equipos y los beneficios de su

uso, obteniendo operación de explotación más segura y amigable con el ambiente, asegurando que las comunidades cercanas no serán depósitos de partículas suspendidas de piedra caliza, evitando los efectos subsiguientes.

Proinca ha sido involucrada en diferentes proyectos dentro de la ciudad capital y en el área rural. A diferencia de la ciudad capital, en el área rural los proyectos demandan mayor esfuerzo al ejecutar el montaje de maquinaria industrial, dichos proyectos también poseen un grado de criticidad por no vulnerar o afectar el entorno donde se estará trabajando, fortaleciéndose en los estudios de impacto ambiental para disminuir el daño que se pueda ocasionar.

El Ministerio de Ambiente autoriza si es viable o no ejecutar proyecto a cielo abierto, mejoras o modificaciones en plantas industriales donde Proinca posee representación. De no poseer una autorización previa no se podrán ejecutar dichos proyectos. Es importante reconocer que por causas naturales del Covid-19, el cual incrementó en la población la sensibilidad a los problemas en las vías respiratorias, el material particulado suspendido aumenta la probabilidad de enfermedades respiratorias.

Por lo tanto, se desarrollarán cinco capítulos a tratar, los cuales estarán compuestos de la siguiente manera: en el capítulo uno se presentan las generalidades, con el contexto de todos los temas que se utilizarán para la propuesta. En el capítulo dos se aborda la situación actual, es decir el estado en el que se encuentra el lugar donde se desarrolla la propuesta del presente trabajo de graduación.

En el capítulo tres se presenta la propuesta para la reducción del impacto ambiental en la emisión de material particulado, por medio del uso de filtro de succión *jet pulse*. Esta propuesta pretende aportar una solución para el

problema planteado. En el capítulo cuatro se desarrolla la implementación de la propuesta, y para hacerla viable y funcional se plantea cuál es la metodología de implementación. Por último, en el capítulo cinco se especifica el seguimiento y sus bases con relación a la propuesta, con la finalidad de hacerlo sostenible en el tiempo.



# **1. GENERALIDADES**

## **1.1. Departamento de Escuintla**

El departamento de Escuintla está localizado a 63 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala, es uno de los principales departamentos con altos índices industriales, por su posicionamiento geográfico posee accesos y salidas hacia El Salvador y hacia México. Este departamento posee plantas de procesamiento de alimentos, plantas de fabricación de productos no perecederos, alta afluencia de transporte público y diversos lugares turísticos.

Escuintla, por ser el epicentro en la costa sur de intercambios económicos, posee un sinnúmero de inversiones y desarrollos comerciales, se han desarrollado industrias fabriles de las más reconocidas en el mercado guatemalteco, además su crecimiento sigue apuntando hacia la construcción del nuevo aeropuerto internacional de Guatemala, por lo que su inversión y desarrollo se encuentra en auge y constante crecimiento. La industria azucarera fue el catalizador de la región, impulsando este departamento y sus alrededores con fuentes de empleo y desarrollo.

Además, posee extensiones territoriales de diferentes monocultivos que incrementan los negocios regionales y negocios de exportación, el sector bananero es otro pilar fuerte de la región y del país. Este departamento, además de cultivos, siembras y cosechas, dispone de explotación minera a cielo abierto, actividades sobre las cuales no se encontró evidencia que existan regulaciones fuertes por sus autoridades municipales, únicamente las preestablecidas por el organismo rector en Guatemala: el Ministerio de Energía y Minas. Otro sector en crecimiento es el de potencia, que ha experimentado

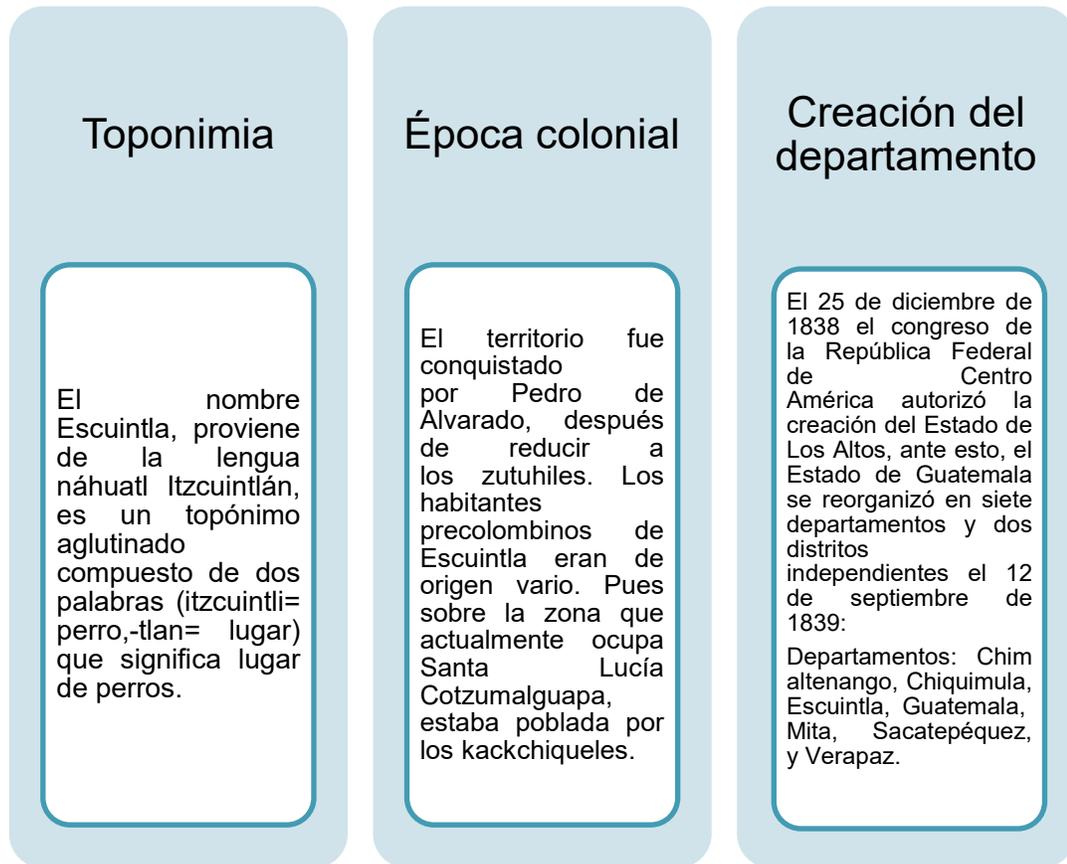
generación de la misma con diferentes fuentes de energía renovables y no renovables.

### **1.1.1. Historia**

Siendo una de las principales regiones industriales y de siembra, Escuintla ha denotado ser un departamento con influencias extranjeras desde los principios de la colonización del país, por lo que en la primera figura (en la siguiente página) se presenta un breve extracto de su historia.

## Figura 1.

### Extracto histórico de Escuintla



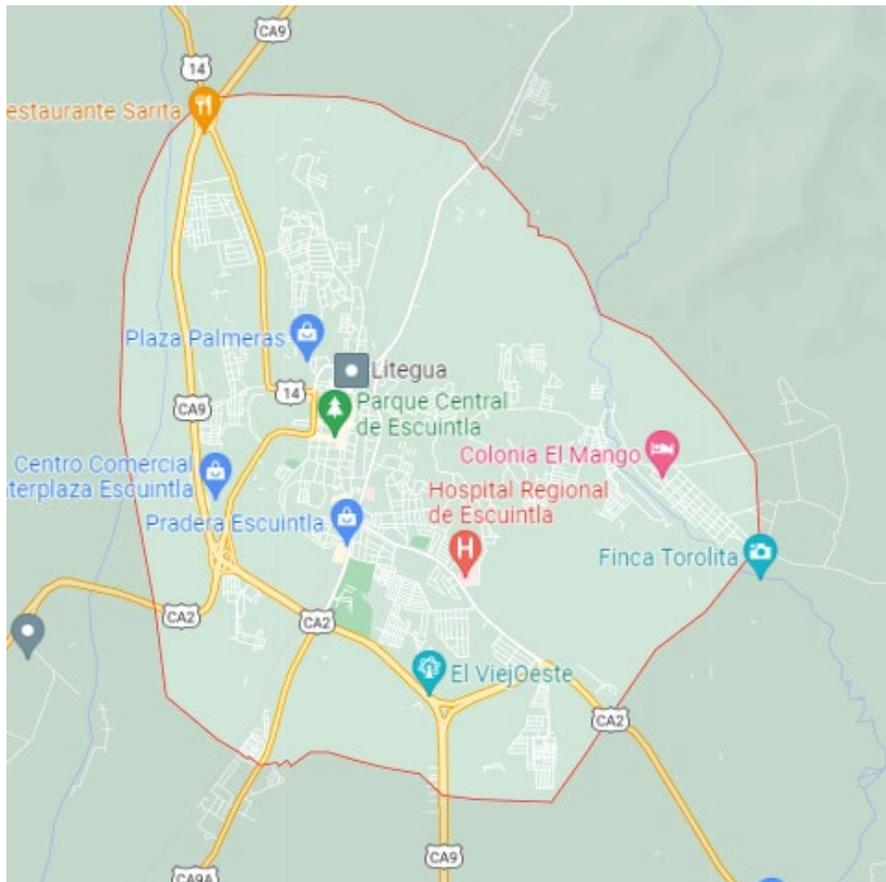
*Nota.* Breve descripción de la historia del departamento de Escuintla. Obtenido de L. Valladares. (2017). *Historiografía de Escuintla*. (<https://aprende.guatemala.com/historia/geografia/municipio-de-escuintla-escuintla/>), consultado el 8 de agosto de 2022. (párrs. 2-3). De dominio público.

### 1.1.2. Ubicación geográfica

Su extensión territorial es de 4,384 km<sup>2</sup>. Sus municipios más importantes son: Nueva Concepción, Puerto San José, Santa Lucía Cotzumalguapa, Tiquisate, además de poseer uno de los puertos más importantes de la región: Puerto Quetzal.

## Figura 2.

### Ubicación de Escuintla



*Nota.* Gráfica de mapa que muestra la ubicación del departamento de Escuintla. Obtenido de Google Maps (s.f.). *Mapa de Escuintla.*

(<https://www.google.com/maps/place/Escuintla/@14.2013118,-90.8542906,11.75z/data=!4m5!3m4!1s0x85891d73ded9bbeb:0x422418f759a5cab!8m2!3d14.3009252!4d-90.7881835>), consultado el 8 de agosto de 2022. De dominio público.

### 1.1.3. Demografía

Según el último informe demográfico realizado por el Ministerio de Economía, a finales de diciembre del año 2014 el departamento de Escuintla presenta los siguientes valores críticos y relevantes a presentar.

#### Tablas 1.

*Resumen demográfico del departamento de Escuintla según el último informe actualizado por el Ministerio de Economía*

| Índice demográfico      | Valores  | Análisis   |
|-------------------------|--|--|
| Población total         | 731,326  | Según el informe demográfico la población total de Escuintla representa el 4.7 % de la población total del país. Además, se presentó un incremento del 2.11 % anual.   |
| Distribución por género | 50.2 % hombres y 49.8 % mujeres.   | En Escuintla su distribución presenta un 7.2 % de personas que se identifican como indígenas y un 51.1 % ladinos, la diferencia de estos valores se considera mestizos. La edad mediana es de 21 años.   |
| Municipios              | Tiquisate<br>Nueva concepción<br>Santa Lucia<br>Cotzumalguapa<br>La Gomera<br>Iztapa<br>La Democracia<br>Masagua<br>Guanagazapa<br>Siquinalá<br>Escuintla<br>Palín<br>San Vicente Pacaya | Según el informe estadístico el departamento de Escuintla a finales del 2014 incluía a los municipios de Santa Lucia Cotzumalguapa y Escuintla (municipio) con las regiones donde se concentraba la mayor cantidad de población y el municipio con menor población era San Vicente Pacaya. |

*Nota.* Resumen de informe demográfico realizado por el Ministerio de Economía a finales de diciembre del año 2014 en el departamento de Escuintla. Obtenido de R. Narciso. (2014). *Caracterización departamental Escuintla 2014.* (p. 43). INE.

## **1.2. La empresa Proyectos Industriales de Centroamérica**

Proinca es una empresa enfocada en el crecimiento industrial en la región, sus principales proyectos consisten en el desarrollo y construcción de naves industriales, montaje de estructuras metálicas de grandes dimensiones, diseño, construcción y montaje de trituradoras con cabezales desmontables. Otra rama de sus servicios es el mantenimiento industrial para maquinaria estacionaria, maquinaria móvil y transporte pesado.

Por sus diferentes funciones, la empresa ha generado un conjunto de protocolos para adaptarse a las necesidades de sus contratistas, especialmente para aquellos proyectos que suelen ser ejecutados en climas agrestes a cielo abierto, donde las condiciones climáticas pueden impactar en el desarrollo de los mismos, considerando para ello como herramienta principal la salud y seguridad industrial.

Diferentes marcas multinacionales e internacionales han contratado los servicios de Proinca, demandando anualmente multiproyectos dentro y fuera del país, la expansión de los servicios de la empresa ha generado estrés en la ejecución de sus proyectos, donde el error tiene tolerancia cero y la perfección es uno de sus pilares. La planeación, ejecución y seguimiento de los proyectos alcanzan estándares internacionales de calidad, suelen ser auditados por firmas extranjeras para dar el visto bueno a los desarrollos inmobiliarios presentados.

Además de ello, se le han planteado a la empresa nuevos retos, enfocados hacia el desarrollo inmobiliario industrial, con énfasis en la reducción del impacto ambiental, en proyectos nuevos o en aquellos servicios de mantenimiento que generalmente realizan.

### **1.2.1. Reseña histórica**

Desde la fundación de la empresa en el año 2014 y en sus comienzos se enmarcaron en iniciar sus operaciones con el capital humano bajo, para ese momento no excedían una planilla de diez personas en total, en su primer año de operaciones duplicaron el volumen del capital humano y, para finales del año 2021, poseían un total de 75 personas laborando en distintos proyectos dentro y fuera del país.

La creciente demanda en servicios de mantenimiento, servicios logísticos en traslados de cargas sobredimensionadas, supervisión de montajes de silos, hornos de fundición y otros proyectos que forjaron su reputación, dieron pauta para iniciar a requerirles diseños de naves industriales, generando así sus primeros proyectos industriales en cercanías de la avenida Petapa y Atanasio Tzul.

Según sus registros históricos, fue a inicios del año 2019 cuando incursionaron en el diseño, planeación, desarrollo, ejecución y montaje de plantas trituradoras en El Salvador. Sus contratistas fueron firmas extranjeras donde ellos participaron en licitaciones, pero el respaldo técnico fue otorgado por medio de garantías inmobiliarias presentadas por los contratistas anteriores como acto de buena recomendación.

Así es como dio inicio una nueva era de proyectos para Proinca, en sus comienzos la mayor demanda consistía en monitoreos de montajes de equipos industriales y control de mantenimientos hacia el diseño propio, construcción, montaje y puesta en marcha que, a largo plazo, serán los aspectos base para prestar los mantenimientos preventivos hacia aquellos proyectos que han ejecutado.

### **1.2.2. Ubicación**

Sus oficinas administrativas se encuentran en la zona 5 de la ciudad capital de Guatemala y se encuentran realizando proyectos en 5 de los 22 departamentos del país, a finales de 2021 se concluyó el último proyecto en Santa Ana, El Salvador.

### **1.2.3. Misión**

“Ser la empresa innovadora en la ejecución de desarrollos industriales, especialmente en el diseño, planeación, construcción, supervisión y mantenimiento de naves industriales, hornos de fundición, así como la prestación de servicios a las empresas avícolas, ganaderas y porcinas” (Proinca, s.f., p. 2).

### **1.2.4. Visión**

“Ser la empresa líder en desarrollos industriales en los servicios de diseño, planeación, construcción, supervisión y mantenimientos para el sector de Guatemala y países vecinos hacia el año 2040” (Proinca, s.f., p. 2).

### **1.2.5. Valores éticos**

En Proinca el personal, sin distinción de cargo o representación alguna dentro o fuera de sus instalaciones, ha sido capacitado para que sus valores personales y valores éticos sean un reflejo de los diferentes talleres de los cuales han sido partícipes, destacando el respeto a sus semejantes, la puntualidad, la honestidad, la cordialidad, la solución de conflictos por medio del diálogo, el trabajo en equipo, el respeto al valor monetario de los equipos que

se les han asignado, el respeto y cuidado a las instalaciones de las empresas donde se encuentran laborando, pero muy especialmente el desempeño eficiente para lo que han sido contratados.

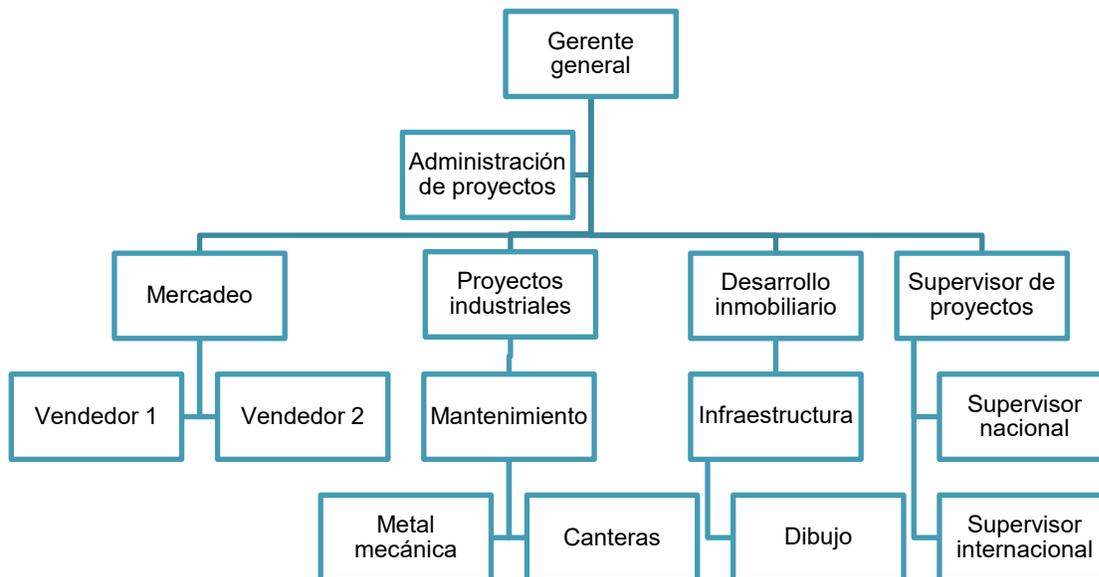
### **1.2.6. Organización**

Proinca posee una estructura organizacional tipo jerárquico, sus niveles jerárquicos superiores poseen las líneas de autoridad y son responsables de las tareas asignadas al personal inferior en la ejecución de los proyectos.

#### **1.2.6.1. Organigrama**

En la siguiente página se presenta detallado el actual organigrama de Proinca:

**Figura 3.**  
*Organigrama de Proinca*



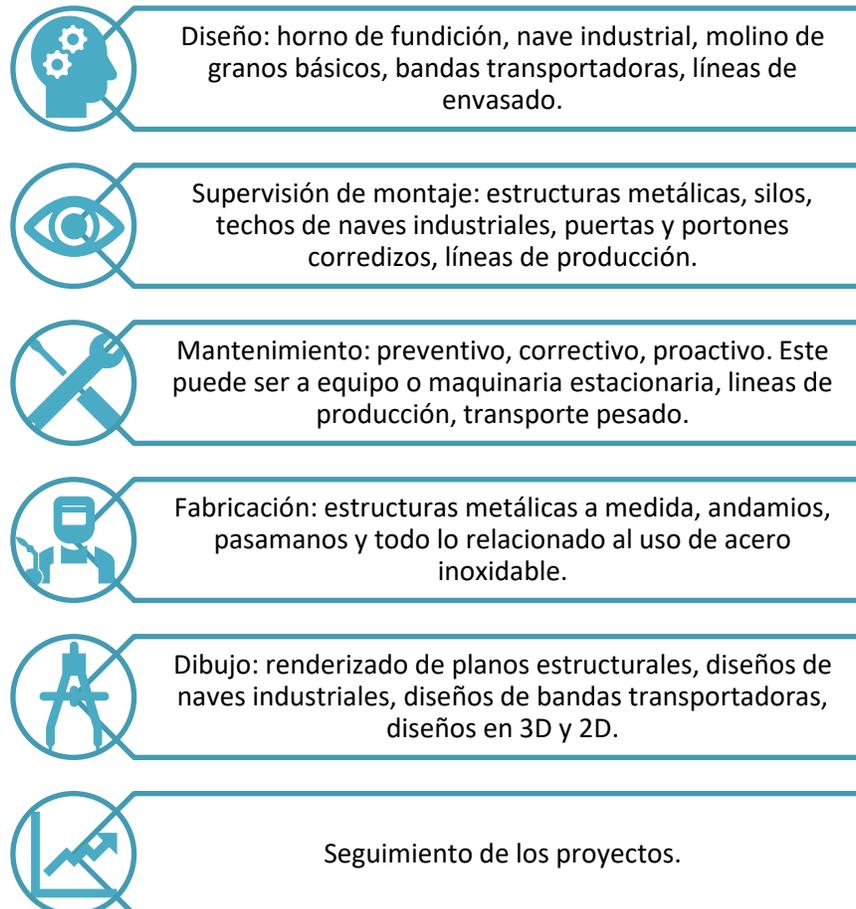
*Nota.* Presentación y descripción del organigrama del laboratorio. Obtenido de Proinca. (s.f.). *Memoria de labores.* (p. 4). Proinca.

### 1.2.7. Tipos de servicios

Los diferentes proyectos y servicios que puede desarrollar Proinca pueden estar basados en las necesidades especiales de cada contratista, comúnmente solicitan mantenimientos a sus equipos industriales estacionarios, pero se ha marcado un incremento en la demanda de desarrollo inmobiliario, donde se incorpora el diseño, el montaje, la supervisión, la puesta en marcha y el acompañamiento durante los primeros tres meses de producción.

## Figura 4.

### *Servicios que brinda Proinca*



*Nota.* Presentación y descripción de los servicios que brinda el laboratorio. Obtenido de Proinca. *Memoria de labores.* (pp. 13-16). Proinca.

### 1.3. Área de Proyectos Industriales de Proinca

Este departamento tiene bajo su responsabilidad los subdepartamentos de mantenimiento, metal-mecánica y canteras. Sus funciones están basadas en desarrollar los proyectos desde su diseño hasta su ejecución, según los requerimientos especiales de cada contratista, para ello influyen los análisis de

suelos, análisis de impacto ambiental, análisis de incidencia sobre zonas pobladas y en general se evalúan los costos de desarrollo junto al tiempo necesario de lograr darse por completo un determinado proyecto.

En el Área de Proyectos Industriales se ha desarrollado por más de 6 años personal capacitado para lograr entender las condiciones especiales de lo que requiere la ejecución del desarrollo en estructuras, instalación de maquinaria industrial estacionaria y construcción de obra gris en naves industriales. Además, este departamento se ha comprometido a mejorar las condiciones ambientales en los proyectos de canteras, para así promover condiciones de explotación y movimientos de tierras con el menor impacto al medio ambiente y su entorno.

De esta forma la empresa ha generado un compromiso creciente entre su personal y la prestación de servicios otorgada, dando por hecho que uno de los principales objetivos en todo proyecto, sin distinción alguna, sea el compromiso hacia los recursos ambientales. Para los mantenimientos la empresa ha incorporado programas de cero emisión de contaminantes y cero desecho de materiales de empaques, anteriormente quedaba bajo la responsabilidad del contratista el manejo de los desechos generados por los mantenimientos a sus equipos o por los mantenimientos a sus instalaciones, pero a principios del 2016 la empresa involucró al personal para recolectar todo tipo de desecho generado en los mantenimientos.

### **1.3.1. Departamento de Administración de Proyectos**

La finalidad de este departamento radica en la supervisión, monitoreo, control y desarrollo de estrategias que permitan llevar a cabo los proyectos en los tiempos estimados con los recursos asignados. El personal en este

departamento se involucra directamente en la ejecución de los proyectos, si es necesario participar desde el diseño de un proyecto industrial para construir algún equipo o nave industrial comparten los avances con los dibujantes.

Los proyectos destinados a mantenimientos de estructuras requieren mayor participación de este personal, ya que las empresas, por su constante ritmo de producción, condicionan a un número finito de personas para que puedan permanecer realizando dichas actividades, incluyendo el tiempo asignado para que el personal pueda laborar, por lo que estas complicaciones hacen que las acciones asignadas y las auditorías mismas sean perfectas.

### **1.3.2. Departamento de Mercadeo**

Este es uno de los departamentos que presenta alta responsabilidad hacia la empresa, de tal forma que, si los empleados no promocionan los diferentes servicios, no se incrementan las contrataciones. El personal posee una cartera de clientes antiguos a los cuales se les presta seguimiento si ya poseen algún proyecto en ejecución, de lo contrario se generan publicaciones para impulsar la marca.

Para este personal es importante reconocer qué tipos de servicios son los que sí puede llegar a prestar la empresa y también reconoce qué tipos de servicios o proyectos son los que se están solicitando para evitar prometer servicios que no puedan ser desarrollados. Constantemente pueden recibirse hasta 50 llamadas para consultar por servicios y tipos de desarrollos en proyectos industriales que pueda ejecutar Proinca.

### **1.3.3. Departamento de Proyectos Generales**

Está conformado por 12 personas, sus acciones y actividades diarias son exclusivamente de monitoreo, supervisión y resolución de problemas. La asignación del personal puede estar dada en 12 proyectos distintos, colocando a una persona por proyecto, quien estará en apoyo al equipo de personas que se encuentre ejecutando alguna construcción o mantenimiento industrial.

En el Departamento de Proyectos Generales se plantea la premisa de existencia para la empresa, siendo esa premisa la necesidad de generar control numérico sobre los insumos y personal asignado a la ejecución de los proyectos en general, parte de su estructura funcional se fundamenta para cruzar información con el Departamento de Contabilidad, mediante informes internos se valida la información acerca de los avances de un determinado proyecto, también se puede evaluar si los insumos, materiales y mano de obra asignados fueron eficientes o si generaron pérdidas.

#### **1.3.3.1. División de mantenimiento**

Este departamento es el responsable de ejecutar los proyectos asignados a Proinca exclusivamente en mantenimientos de equipos estacionarios, maquinaria, transporte pesado y estructuras metálicas. Para cada uno de los rubros anteriormente citados será necesario desempeñar sus actividades con los recursos asignados en el tiempo proyectado, parte de sus compromisos con los clientes o contratistas incluye respetar al 100 % la programación entregada desde que se cotizaron los servicios, esto ha logrado mejorar la imagen de la empresa.

### **1.3.3.2. División de metal-mecánica**

En este departamento se construyen estructuras metálicas a medida, la mayor demanda ha requerido emplear acero inoxidable para el sector de los restaurantes. Proinca ha logrado superar diferentes barreras en la ejecución de sus proyectos, ya que desde sus inicios se debía construir la mayoría de las estructuras en los talleres de la empresa, pero con el auge de equipos de oxicorte y de soldadura de plasma, que pueden ser trasladados de un lugar a otro, se pueden construir las piezas directamente donde el proyecto lo requiera, eso otorga ventajas económicas en tiempo de construcción, tiempo de instalación y menor requerimiento de tiempo para su mano de obra.

### **1.3.3.3. División de canteras**

El personal asignado a este departamento posee habilidades especiales en el conocimiento de movimiento de tierras, clasificación de minerales, y localización de bancos para ser explotados de minerales según sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Para la división de canteras es importante reconocer cuáles pueden ser las restricciones legales y técnicas, así como los riesgos derivados de las vulnerabilidades y amenazas en determinada zona de explotación de tierras.

Paralelamente al diseño eficiente de los equipos a emplear, mediante la alineación entre la banda transportadora y la tolva de recuperación de materiales con el equipo de trituración, debe analizarse cuáles pueden ser los daños a generar en el territorio que será explotado, los distintos análisis incluyen estudios geológicos, estudios de contención de tierras, diseño de áreas intermedias para acumulación de tierras no productivas y diseño de puntos

intermedios para colocar todos los desperdicios químicos que estarán siendo empleados para procesar los minerales finales.

#### **1.4. Planta de trituración**

La planta de trituración se encuentra en Escuintla, en un terreno con pendiente cero, rico en bancos de minerales y de piedra caliza. La función de esta planta es procesar la mayor cantidad de material posible al día, se divide en tres zonas principales, siendo la primera de tolva de alimentación con capacidad de recepción de 4 quintales de material rocoso en composición de tierra seca, el material de aporte deberá contener como máximo un 5% de humedad, de lo contrario deberá permanecer en una estación intermedia hasta alcanzar esa propiedad.

Con la tolva de recepción, donde actúa un efecto vibratorio con cribas giratorias, hacen el trabajo de desprendimiento en partes no mayores a 10 centímetros de diámetro por cada bloque de tierra con minerales que pueden ser transportados en la banda, esta banda se encuentra a 15 metros del cabezal de mandíbula, donde deberá caer por gravedad, al precipitarse el material ingresa directamente al cilindro de mandíbulas trituradoras, donde se realiza el procesamiento de la piedra caliza para el presente estudio de investigación.

La graduación de las mandíbulas permitirá seleccionar el tamaño del grano a procesar, la cantera en estudio procesa sus granos con diámetros de 1 milímetro hasta 3 milímetros, para garantizar que no se procesen materiales mayores a ese diámetro se han colocado 3 secciones de tamiz, el primero es de 3 milímetros para garantizar que pasarán solamente desde ese tamaño hasta los de menor tamaño, desechando los que no pueden ser procesados.

El sistema permite recircular el material que no fue procesado en la primera corrida de molienda, reincorporando ese polvillo mixto nuevamente a la tolva de trituración para posteriormente cumplir con los diámetros esperados y que pueda ser depositado en contenedores tipo furgón con capacidad de ½ tonelada.

#### **1.4.1. Administración general**

Para la planta de trituración y su administración es importante reconocer el plan de trabajo y el terreno que está siendo explotado, previo a eso ya se deben disponer estudios geológicos que permitan al líder del proyecto disponer de las cantidades de tierra a procesar diariamente. Si la cantera trabaja con mayor espectro de incertidumbre a prueba de ensayo y error solamente se perderán los recursos asignados.

La administración general comprenderá la planeación estratégica del recurso asignado, no solamente el recurso económico, se deberán considerar los horarios y jornadas de trabajo, la distribución del recurso humano para lograr procesar al día por lo menos 3 toneladas de material crudo y obtener ½ tonelada de piedra caliza, lo cual se debe considerar si las condiciones climáticas lo permiten y si los bancos asignados para su explotación no tienen la necesidad de pretrabajarlos con maquinaria pesada o con el uso de dinamita.

Las restricciones para este tipo de administración estarán condicionadas por la reducción o mitigación del impacto dañino causado al medio ambiente y hacia aquellas zonas pobladas cercanas al proyecto, uno de los principales defectos que se busca mejorar es contener la dispersión suspendida en el medio ambiente de los restos de la piedra caliza procesada. El tamiz, al ser

vibratorio, genera volumen constante de fugas de esta ceniza, por lo que la empresa, siendo responsablemente comprometida con el medio ambiente, desea mejorar sus condiciones de explotación de este material.

Para la administración, en síntesis, estaría bien asignar la productividad (relación eficiencia – eficacia) mediante el manejo de los procesos, a través de los recursos como el manejo de personal, el aprovechamiento eficiente de los equipos estacionarios, el aprovechamiento de la maquinaria asignada y la explotación de las tierras.

#### **1.4.2. Departamento de Proyectos**

En la planta de trituración este departamento es el responsable de diseñar las proyecciones del material a ser procesado diariamente y de pronosticar cuánto material final puede ser recuperado, sus estadísticas estarán basadas en los estudios geológicos presentados por otro departamento de la planta de trituración. El trabajo de campo es constantemente demandante, por la incertidumbre de las condiciones climáticas, ya que, si bien es cierto la piedra caliza, por ser un sector de costa sur, puede ser explotada intermitentemente, esto dependerá del clima.

La temporada de lluvia en el sector de la costa sur es un periodo extenso y torrencial que afecta fuertemente los índices de producción, por lo que el Departamento de Proyectos estratégicamente ha ideado explotar los bancos de tierras útiles en 3 jornadas laborales, alcanzando así producción de 24 horas, sin cese de operaciones, hasta que el clima de invierno haga presencia y se corten las jornadas de trabajo a 5 u 8 horas efectivas.

### **1.4.3. Departamento de Geología**

Su rol y funciones se centrarán en mantener constantemente los estudios de suelos en los bancos de tierra o bancos de piedra que puedan ser procesados según sus propiedades físicas y químicas. La piedra caliza en general ha sido un material o insumo de alta demanda presente desde el sector de la siderurgia hasta el sector de los alimentos. Para el Departamento de Geología no será suficiente realizar toma de pruebas y ensayos en el lugar a ser explotado, también son trasladadas las muestras al laboratorio para pruebas de microscopio.

#### **1.4.3.1. Recursos naturales explotados**

La mayoría de los recursos naturales son provenientes de la tierra, se excluyen las zonas boscosas debido a normas nacionales de protección en la erradicación de bosques y tala ilegal de árboles. Los recursos naturales o bancos de minerales deberán ser procesados en fases de preselección y de autorización, no se dispondrá de un segmento de tierra sin antes obtener cierto volumen de contenido en minerales y materiales naturales de piedra caliza. Según sean las necesidades del proyecto o según sea el tipo de material a procesar, así serán los permisos presentados al MARN.

#### **1.4.3.2. Piedra caliza**

Para procesar la piedra caliza deberán ser seleccionados cuidadosamente los bancos de tierra y piedra, la piedra caliza es un material relativamente escaso en ciertas regiones de la costa sur, pero que en determinadas áreas puede concentrar grandes dimensiones de material a procesar. Según la cantera donde se desarrolla el proyecto se han realizado

mediciones en una extensión de 2500 metros cuadrados superficiales, siendo de ellos 1800 metros cuadrados aptos para la explotación.

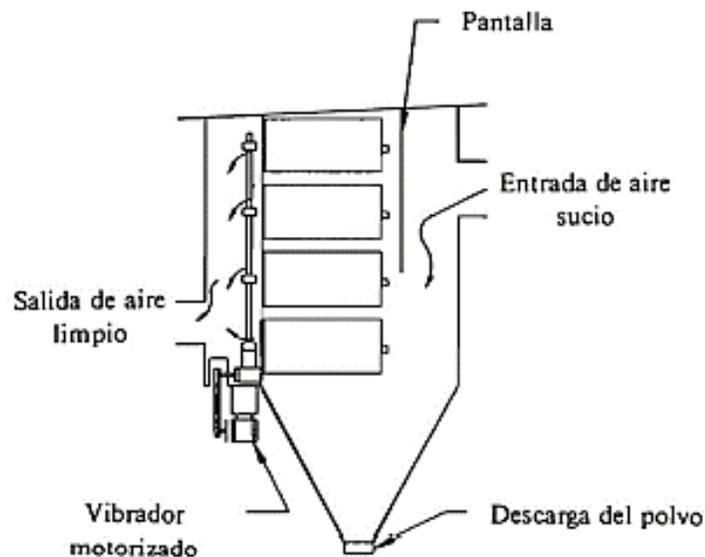
Según los registros de la cantera, se pueden excavar hasta 15 metros de material para recuperar piedra caliza, luego de esa profundidad dependerá de la zona geológica donde predomine basalto y piedra pómez. Mezclar la piedra pómez o el basalto en la trituración de piedra caliza termina comprometiendo la producción, por lo que ese tipo de material ya no puede seguir siendo procesado. El material que está siendo procesado para recuperar exclusivamente piedra caliza deberá contener el menor porcentaje de humedad posible, de lo contrario el material procesado es lechoso y contaminado con otros agregados.

#### **1.5. Filtros de succión (de piedra caliza)**

El diseño de los filtros de succión cumplirá la función de un colector de polvo, para ello se emplean bolsas de mangas o bolsas de tela, se colocan secuencias continuas en un compartimiento aislado en la parte media-alta de donde se está procesando la piedra caliza, estos compartimientos poseen hilos de bolsas de tela con forma cilíndrica y están suspendidos verticalmente.

## Figura 5.

### *Filtro de succión con bolsas de tela*



*Nota.* Ejemplo de un filtro de succión. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementara para mejorar su confiabilidad.* (p. 30). Universidad de San Agustín.

El polvo cargado de partículas pasa generalmente a lo largo del área de las bolsas y luego radialmente a través de la tela, reteniéndolas en la cara de las bolsas corriente arriba para finalmente que el gas limpio pueda ser ventilado hacia la atmósfera.

Los filtros de mangas recolectan partículas de tamaños que van desde las submicras hasta varios cientos de micras de diámetro, con eficiencias generalmente en exceso al 99 o 99.9 %. La capa de polvo o plasta recolectada sobre la tela es la razón principal de esta alta eficiencia. La mayor parte de la

energía utilizada para operar el sistema aparece como caída de presión a través de las bolsas, y de las partes y conductos asociados.

Los valores típicos de la caída de presión del sistema varían desde cerca de 1.25 hasta 5 kPa (130 a 500 milímetros de columna de agua). La característica de operación principal de los filtros de mangas, que los distingue de otros filtros de gas, es la capacidad de renovar la superficie de filtración periódicamente por medio de limpiezas. Las bolsas filtrantes por lo general se construyen con telas tejidas o, más comúnmente, perforadas con aguja y cosidas en la forma deseada, montadas en una estructura y usadas en un amplio rango de concentraciones de polvo.

#### **1.5.1. Definición técnica**

“El filtro de succión es empleado para depurar el aire que será liberado al medio ambiente, comúnmente utiliza sistema de succión de aire y transporte neumático” (Arciniegas, 2012, p. 9).

#### **1.5.2. Principio de funcionamiento**

Las operaciones con los filtros de succión son cíclicas, se puede emplear el tiro inducido de un ventilador o por acción de un motor vibrador. Según sea la necesidad de procesar material en los mandriles de trituración se deberá estar alternando entre periodos de filtrado relativamente largos o por periodos cortos de limpieza, es importante para ello obtener la mayor información posible de las características propias del banco de tierra que está siendo procesado. En el procesamiento el polvo se estará acumulando sobre las bolsas de tela, por lo que deberá ser removido de la superficie de la tela y posteriormente se deberá depositar en una tolva para su manejo responsable.

### **1.5.2.1. Filtros de sacudido mecánico**

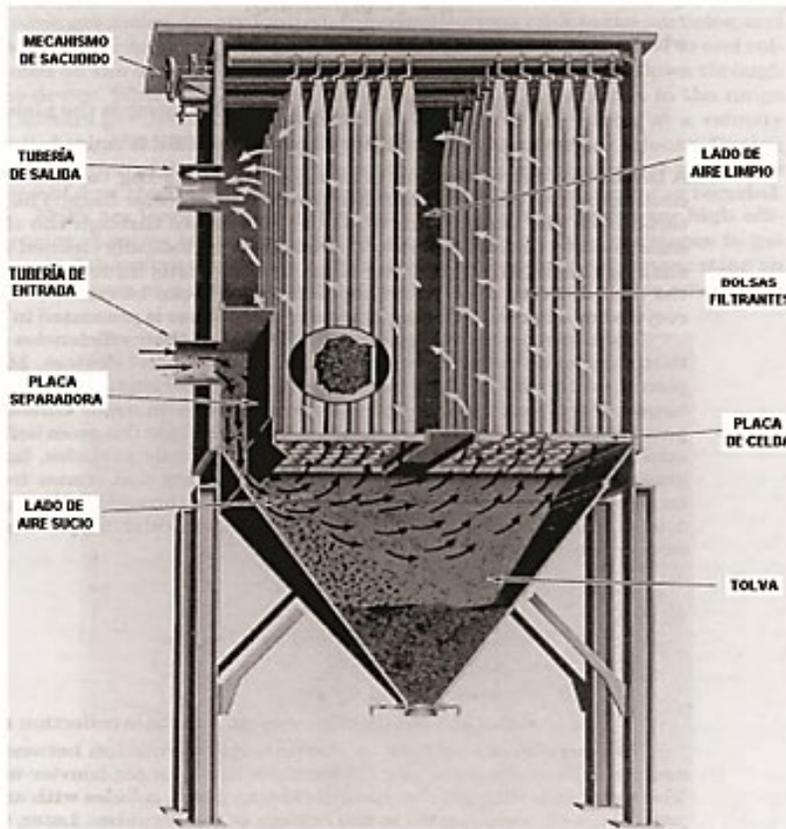
En la limpieza por sacudido mecánico, usada con flujo de gas del interior al exterior, la transferencia de energía se logra suspendiendo la bolsa de un gancho o una estructura que oscila, la cual es accionada por un motor. El movimiento puede ser impartido a la bolsa de varias maneras, pero el efecto general es de crear una onda sinusoidal a lo largo de la tela y, a medida que la tela se mueve hacia afuera de la línea central de la bolsa durante la acción de la onda, el polvo acumulado sobre la superficie se mueve con la tela.

Cuando la tela alcanza el límite de su extensión, las plastas de polvo poseen la inercia suficiente para desprenderse de la tela y descender hacia la tolva. En filtros con compartimientos múltiples, generalmente operados continuamente, un motor acoplado a un sistema de engranajes y yunques golpeadores acciona el sistema de sacudido. Los compartimientos operan en secuencia de manera que se limpie un compartimiento a la vez. El flujo de aire del compartimiento es interrumpido, permitiendo así el asentamiento del polvo, el flujo de gas residual cesa y el mecanismo de sacudido es encendido por varios segundos hasta un minuto o más (en promedio 30 segundos).

Los periodos de asentamiento y sacudido pueden ser repetidos, y enseguida el compartimiento es restablecido en línea para la filtración. Como resultado de la ausencia de flujo a través del compartimiento, la superficie colectora del filtro debe ser incrementada para compensar la porción que se encuentre fuera de servicio para su limpieza.

**Figura 6.**

*Filtro por sacudido mecánico*



*Nota.* Ejemplo de filtro por sacudido mecánico. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 30). Universidad de San Agustín.

La imagen anterior presenta el corte transversal de la parte interna de la tolva donde está siendo atrapado el polvo en suspensión generado por la trituración de piedra caliza, este a su vez es inducido con turbina eléctrica para impulsar aquellas micropartículas con menor peso y que se desean atrapar en los filtros de tela. Según la extensión del volumen procesado se deberá recolectar cada cierto tiempo ese volumen que estará impreso en las telas.

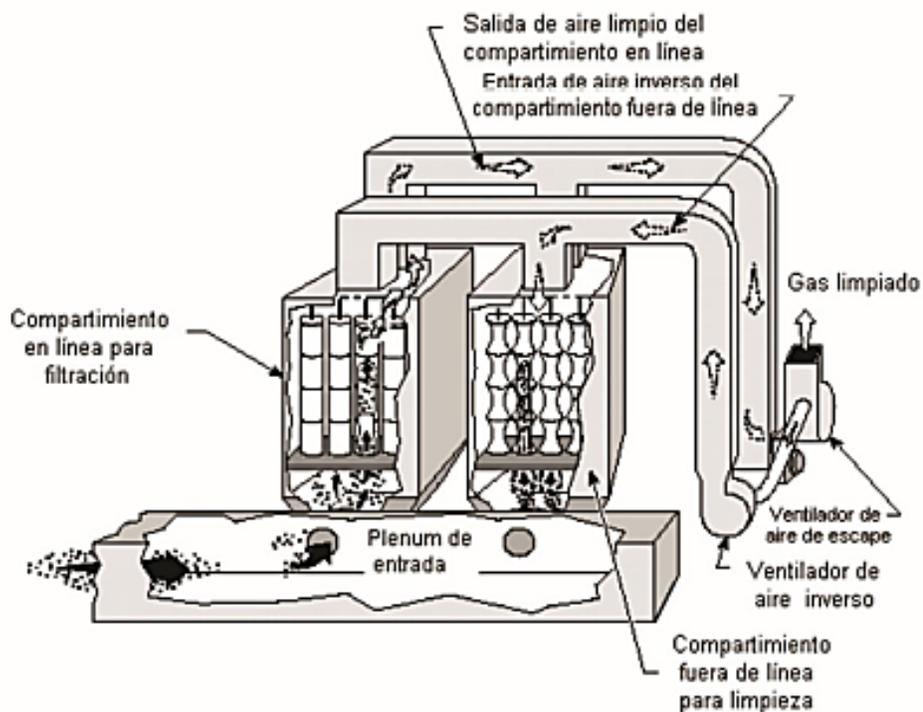
### **1.5.2.2. Filtros con limpieza por aire a la inversa**

Al realizar la limpieza por medio de aire a la inversa, el flujo de aire es interrumpido en el compartimiento que está siendo limpiado y un flujo inverso (de afuera hacia adentro) es dirigido a través de las bolsas. Este revés del flujo de aire pliega la bolsa suavemente hacia sus líneas centrales, lo que causa que la capa de sedimento se desprenda del área de tela.

El desprendimiento es causado por fuerzas tipo tijera desarrolladas entre el polvo y la manga a medida que esta última cambia su forma. Las tapas metálicas en la parte superior de las bolsas son una parte integral de la bolsa, tanto como lo son varios anillos cosidos que rodean las mangas para prevenir su colapso durante la limpieza.

**Figura 7.**

*Esquema de aire de filtro de aire a la inversa*



*Nota.* Ejemplo de un esquema de como limpiar un filtro por medio de aire a la inversa. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 34). Universidad de San Agustín.

La fuente del aire inverso es, por lo general, un ventilador por separado (ventilador de aire inverso), que es capaz de suministrar aire limpio y seco para uno o dos compartimientos, a una relación aire-tela tan alta o más alta que la del flujo de gas ocasionado por el ventilador de aire de escape. La anterior figura ilustra un filtro limpiado con aire a la inversa.

### **1.5.2.3. Filtros con limpieza por chorro de aire comprimido**

Los filtros con este tipo de limpieza se diferencian de los filtros con limpieza por aire inverso en que este utiliza un chorro relativamente breve de aire a alta presión para la limpieza de las mangas, mientras que el de aire inverso, aparte de trabajar con impulsos de presión relativamente baja, el tiempo de los ciclos de trabajo es mucho mayor. Este tipo de filtros puede usar bolsas o mangas de tela no tejida, así como cartuchos de napas filtrantes de materiales similares al papel plegadas en forma plana o cilíndrica.

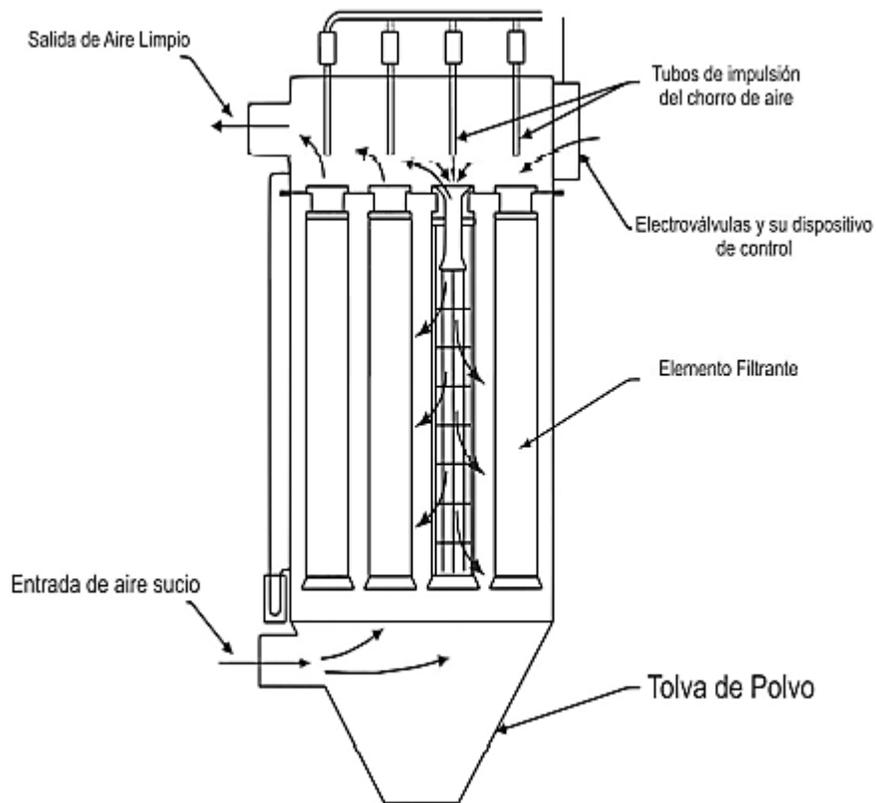
Los equipos más comunes emplean aire comprimido entre 6 y 8  $kg/cm^2$ , en ocasiones se utilizan ventiladores de alta presión que trabajan a presiones inferiores, pero suministran caudales de aire secundario mayores. Todos estos diseños retienen el polvo en la parte externa con el flujo de aire de afuera hacia dentro del medio filtrante.

La acción siempre se realiza introduciendo el chorro de aire de limpieza a través de la misma abertura por la que sale el aire limpio de la manga, bolsa o cartucho. En muchos casos la pieza de unión de la abertura por la que sale el aire limpio de las mangas tiene forma de tubo de Venturi para dirigir e inducir un flujo mayor de aire y mejorar así la limpieza.

### **1.5.3. Componentes**

El diseño es replicado en las industrias que instalan estos tipos de filtros, cambian las configuraciones específicas según el material que estará siendo atrapado y las condiciones atmosféricas del lugar, por lo que su diseño básico utiliza el mismo patrón.

**Figura 8.**  
*Componentes del filtro de mangas*



*Nota.* Ejemplo de diseño básico de los componentes del filtro de mangas. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 36). Universidad de San Agustín.

Según el autor, los filtros poseen por lo menos estos siete componentes: ducto de ingreso, tolva de polvo y recuperación, elementos filtrantes, canastillas, tanque pulmón-manifol, electroválvulas y su dispositivo de control, y ductos de salida.

#### **1.5.4. Clasificación**

No se reconoce una metodología o conjunto de acciones normadas para clasificar los filtros de mangas, por lo que estos pueden ser clasificados por distintos medios, la principal característica que se evaluará al instalar uno de estos filtros es su tipo de limpieza requerido, los principales son: por sacudido mecánico, uso de aire a la inversa o chorro de aire comprimido, según la dirección del flujo de aire (que puede ser desde el interior de la bolsa hacia el exterior o viceversa), la localización del ventilador del sistema, el flujo y cantidad del aire que estará siendo insuflado.

Las variables de limpieza anteriores demarcarán el método de limpieza a emplear, por lo que los filtros de mangas pueden ser clasificados basándose en el tipo de limpieza necesario.

- Colector de mangas con limpieza por sacudido mecánico
- Colector de manga con limpieza por aire a la inversa
- Colector de manga con limpieza por chorro de aire a presión
  - *Plenum pulse*
  - *Jet pulse*
  - Filtros compactos

#### **1.6. Filtro de succión *jet pulse***

El filtro de polvo *jet pulse* (llamado así por su sistema de limpieza por chorros de aire comprimido), es un dispositivo que recibe un flujo cargado de polvo para ser filtrado para luego colectarlo y descargar el aire limpio a la atmósfera.

El acceso del aire contaminado es por el lado de la tolva y choca contra las placas deflectoras, de modo que todo el material baja su velocidad y parte de él cae directamente dentro de la tolva; continuando su ascenso, el aire choca y rodea a las bolsas (mangas) tubulares apoyadas internamente mediante canastillas de alambre; luego pasa a través de las mangas y se eleva en el interior de las mismas hasta un compartimiento de aire limpio común del cual es descargado.

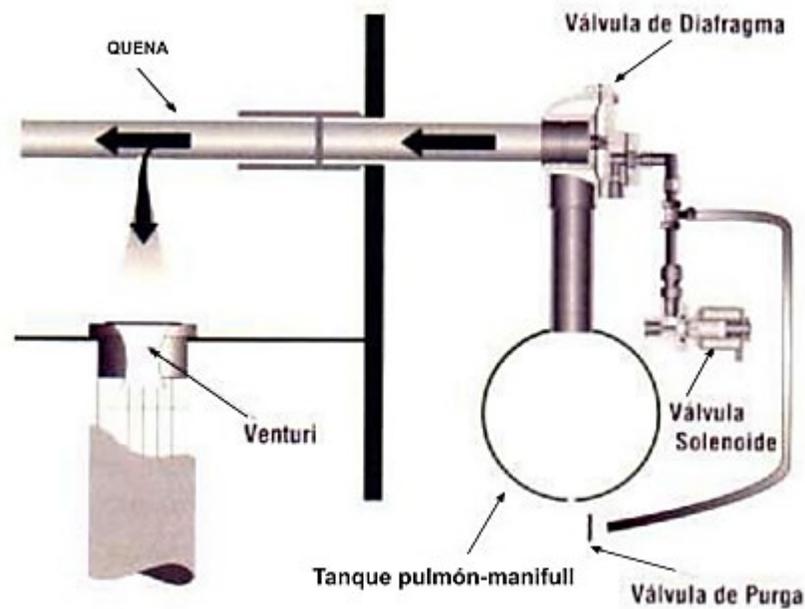
Estos filtros son por lo general de una sola cámara, salvo en los sistemas de producción continua en donde se contempla divisiones completas dentro de los filtros, esto para tener la posibilidad de realizar el mantenimiento a los mismos.

#### **1.6.1. Sistema de limpieza**

El sistema de limpieza de las mangas es por medio de un chorro de aire a gran velocidad que ingresa a la bolsa, ocasionando una expansión de esta, haciendo que el material caiga en la tolva recuperación y sea evacuado. En este sistema la limpieza de las mangas se realiza fila por fila, para ello existe un tubo (llamado quena, por su forma) que posee pequeños agujeros, de número igual al de mangas filtrantes ubicadas en fila y ubicados en medio de estas. Esta quena está separada de un pulmón de aire (*manifull*) por una válvula de diafragma.

## Figura 9.

### *Sistema de limpieza*



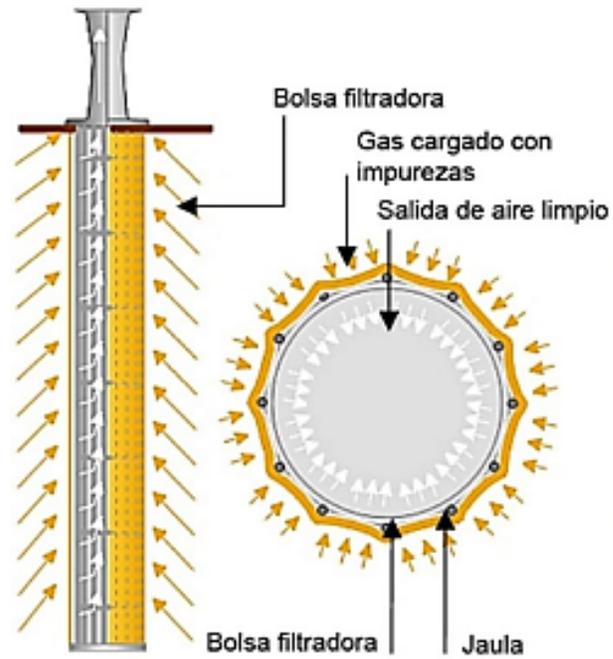
*Nota.* Ejemplo de sistema de limpieza de las mangas es por medio de un chorro de aire a gran velocidad. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 40). Universidad de San Agustín.

Cada fila de mangas cuenta con su respectiva flauta y válvula de diafragma, el aire que sale de agujero de la quena hacia el interior de la manga es inducido y acelerado gracias a un Venturi ubicado en la canastilla que soporta a la manga filtrante.

El sistema de limpieza *pulse jet* o *jet pulse* consta de dos fases: la fase de filtración y la fase de limpieza de la manga. Cada una de estas es totalmente independiente de la otra, por lo que la captación de partículas en suspensión es altamente efectiva.

**Figura 10.**

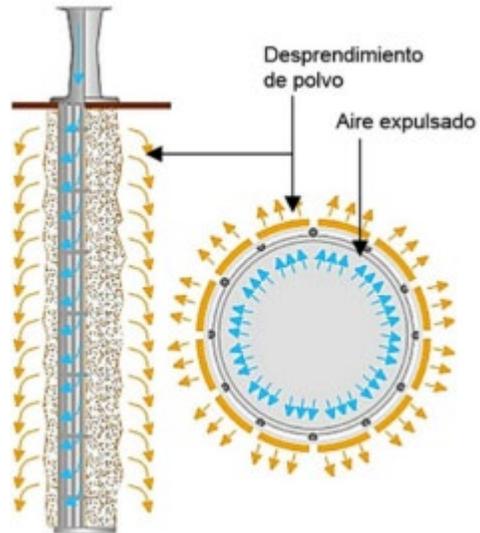
*Fase de filtración*



*Nota.* Ejemplo de sistema de limpieza *pulse jet* o *jet pulse* en la fase de filtración. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 41). Universidad de San Agustín.

## Figura 11.

### *Fase de limpieza de la bolsa*



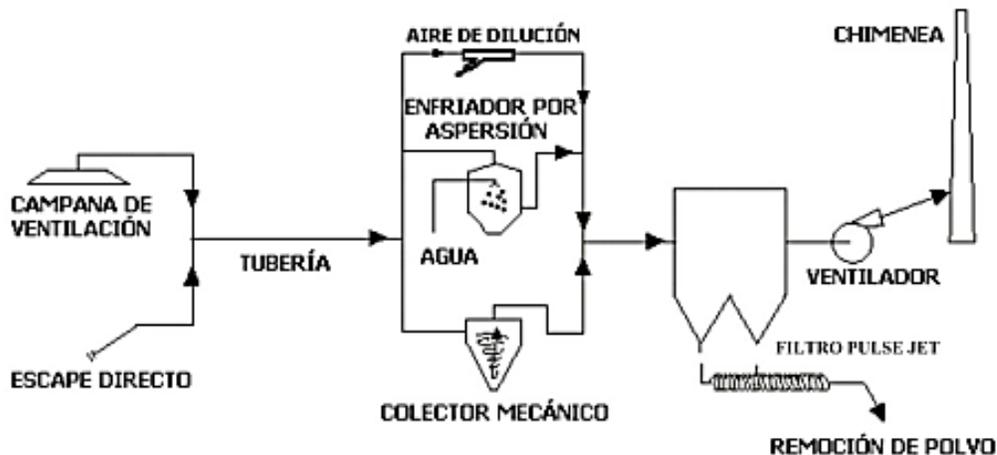
*Nota.* Ejemplo de sistema de limpieza *pulse jet* o *jet pulse* en la fase de la limpieza de la bolsa. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 41). Universidad de San Agustín.

### 1.6.2. Elementos

Conforme el diseño final que estará siendo solicitado a medida, así serán los elementos complementarios del filtro *jet pulse* a instalar, un diseño básico constará de los siguientes elementos:

**Figura 12.**

*Elementos del filtro jet pulse*



*Nota.* Ejemplo de elementos del filtro *jet pulse*. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 42). Universidad de San Agustín.

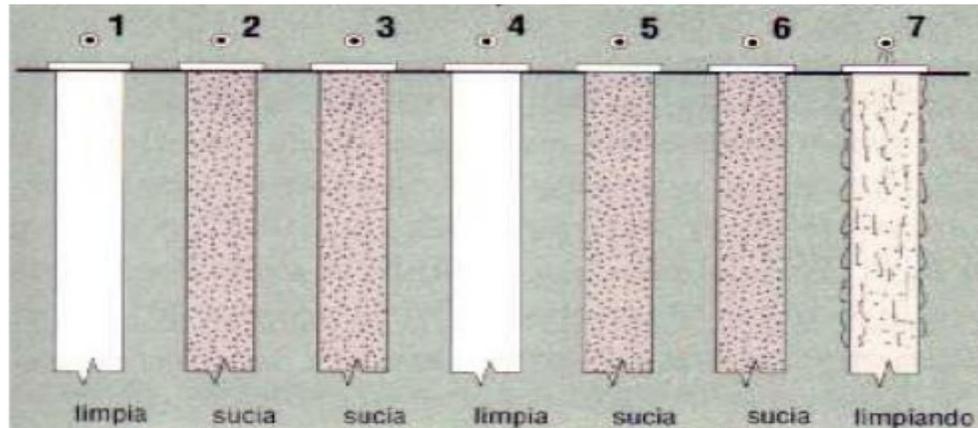
### 1.6.3. Características

El ciclo de limpieza puede estar controlado por un temporizador o por un instrumento que mide la presión diferencial. Para mangas filtrantes normales se recomienda que la presión diferencial llegue de 3 a 6 pulgadas de columna de agua, en el caso de mangas tipo membrana (de papel) la presión deberá ser de 2 a 4 pulgadas de columna de agua.

La secuencia de limpieza en ese tipo de filtro de mangas es importante para lograr que las mangas no fallen antes de tiempo. La limpieza en un filtro de mangas tipo *pulse jet* cuenta con 7 filas y deberá tener el siguiente orden para realizar la limpieza: fila 1, fila 4, fila 7, fila 2, fila 5, fila 3 y finalmente la fila 6.

**Figura 13.**

*Secuencia de limpieza recomendada en filtro jet pulse*



*Nota.* Ejemplo de ciclo de secuencia de limpieza en el filtro *jet pulse*. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 43). Universidad de San Agustín.

### **1.7. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social**

Es Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social es la dependencia gubernamental y la institución rectora competente para formular políticas que velen por la salud integral de la ciudadanía en el país en general, además de ello establece monitoreos e instrucciones generales hacia la salud preventiva y curativa en determinadas regiones que podrían ser afectadas por enfermedades endémicas, pandemias o contagios virales.

Dentro de esto, el MSPAS también genera el conjunto de acciones de protección, promoción, recuperación y rehabilitación de la salud física y mental de cada guatemalteco. Otro aspecto relevante dentro de este organismo estatal es velar por la preservación higiénica del medio ambiente, dentro de ese

aspecto crea mesas de trabajo y acciones técnicas para velar por el cumplimiento de distintos tratados y convenios internacionales relacionados con epidemias y desastres naturales.

### **1.7.1. Aspectos legales**

El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social fue creado mediante el Decreto No. 2786 en el año 1957, para ello fue necesario fusionar las secretarías de Estado de salud pública y la de prevención social en una sola secretaría. A partir de eso se han gestionado todos los servicios de salud y prevención en materia de enfermedades contagiosas y monitoreos a zonas vulnerables como una asistencia en conjunto.

#### **1.7.1.1. Covid-19**

Para la pandemia que ingresó a Guatemala a inicios del año 2020 el MSPAS decretó diferentes normativos y reglamentos de prevención, la mayoría de ellos estaban orientados a cumplir con restricciones de evitar aglomeración, incluir el distanciamiento físico en los lugares de trabajo, evitar moverse sin mascarilla, entre otros. Para ello fue necesario que se cumplieran protocolos de bioseguridad y reducir de esa forma el incremento de casos de Covid 19. El MSPAS destacó personal de monitoreo y puestos de vacunación.

### **1.8. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales**

Es una de las oficinas gubernamentales responsable del cuidado y preservación del medio ambiente y los recursos naturales en el país, sus funciones son dirigidas a mitigar el impacto dañino al medio ambiente, vela por el cumplimiento de la legislación que regula la materia y autoriza licencias de

explotación de terrenos, así como licencias de construcción para diferentes edificaciones y monitorear el manejo de los desechos, tanto en la industria como en vertederos municipales y vertederos clandestinos a cielo abierto.

Para el MARN es crítica la forma en que las empresas extractivas procesan las tierras, sus reglamentos han sido formulados de tal forma que se permita explotar cierto territorio, pero con el menor impacto dañino hacia el medio ambiente o con el menor impacto dañino hacia las comunidades cercanas de donde se encuentre el proyecto en desarrollo.

Otro aspecto importantes del MARN incluye el manejo responsable de los desechos generados con el procesamiento de las tierras, ya que en algunas canteras es necesario utilizar dinamita deberá ser realizado por una empresa acreditada en el uso de explosivos. Las canteras que por necesidad empleen químicos pesados deberán presentar programas de recolección y manejo de estos desechos, garantizando que los mismos no serán vertidos en afluentes o fuentes de agua cercanas a cada proyecto.

El MARN, por otro lado, deberá monitorear constantemente si el desarrollo de la explotación minera o extractiva cumple con lo formulado para solicitar extensión de licencia. Si al final de un determinado periodo de evaluación se han incumplido con aquellos aspectos importantes o se han fijado multas por las malas prácticas, se cancelarán estos proyectos dando por concluida toda actividad minera.

### **1.8.1. Aspectos legales**

Esencialmente el MARN deberá emitir la autorización de explotación minera, aprovechamiento de suelos y autorización de extracción de minerales

en una cantera, para ello se cumplirá con todos los requisitos necesarios que exige el propio trámite. En el *Manual de legislación ambiental de Guatemala* se presenta el artículo asociado hacia la explotación minera y uso de canteras que indica:

La Ley de Minería y el Reglamento de esta, no contemplan lo referente a la recuperación de zonas afectadas negativamente por la actividad minera, aunque en el Reglamento para Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental, aprobado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente, se contempla que, cualquier proyecto o actividad relacionada con la explotación y exploración de minas, canteras y petróleo necesita un Estudio de Impacto Ambiental. Ese reglamento manda que se especifique cual será el impacto ambiental y el Plan de Mitigación necesario para contrarrestar y mitigar los efectos causados por los impactos adversos identificados en el Estudio. (Herrera y Sobenes, s.f., p. 75)

### **1.8.2. Permisos para trabajos a cielo abierto**

El MARN como tal no autoriza este tipo de permisos, en sí es el Ministerio de Energías y Minas el que gestiona los permisos, para ellos será necesario cumplir con un conjunto de formularios, documentación clasificada y permisos adicionales que, al presentarse en una carpeta, quedarán a disposición de la oficina de licencias de explotación minera para su rechazo o aprobación.

**Figura 14.**

*Formulario de la Dirección General de Minería*

|  |                          |                         |                                 |  |                          |
|--|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|--|--------------------------|
| RECONOCIMIENTO<br>(SR)   | <input type="checkbox"/> | EXPLORACIÓN<br>(SEXR)   | <input type="checkbox"/>        | EXPLOTACIÓN<br>(SEXT)  | <input type="checkbox"/> |
| Nombre de la Sociedad Anónima o Empresa Mercantil:<br><input type="text"/>   |                          |                         |                                 |  |                          |
| Nombres y apellidos completos del Representante Legal:<br><input type="text"/>   |                          |                         |                                 |  |                          |
| Nombres y apellidos completos del solicitante, si comparece en nombre propio:<br><input type="text"/>  |                          |                         |                                 |  |                          |
| <b>Datos Generales del compareciente:</b>  |                          |                         |                                 |  |                          |
| Edad:<br>años  | <input type="text"/>     | Estado Civil:           | <input type="text"/>            | Nacionalidad:  | <input type="text"/>     |
| Profesión u Oficio:<br><input type="text"/>  |                          |                         |                                 |  |                          |
| Dirección del Domicilio:<br><input type="text"/>   |                          |                         |                                 |  |                          |
| DPI:   | <input type="text"/>     | Documento extendido en: | <input type="text"/>            | No. Pasaporte:   | <input type="text"/>     |
| Lugar señalada para recibir notificaciones dentro del perímetro de la Ciudad de Guatemala:<br><input type="text"/>   |                          |                         |                                 |  |                          |
| Números telefónicos:<br><input type="text"/>   |                          |                         | Fax:<br><input type="text"/>    |  |                          |
| N I T:<br><input type="text"/>   |                          |                         | E-mail:<br><input type="text"/> |  |                          |
| Atentamente comparezco a solicitar:  |                          |                         |                                 |  |                          |
| Tipo de Licencia : <input type="text"/>  |                          |                         |                                 |  |                          |
| Por el plazo de: <input type="text"/>  |                          |                         |                                 |  |                          |
| De conformidad con la Ley de Minería, Decreto No. 46-97 del Congreso de la República de Guatemala y su Reglamento, y para el efecto:   |                          |                         |                                 |  |                          |
| <b>EXPONGO:</b>  |                          |                         |                                 |  |                          |
| Declaro expresamente que no tengo, o mi representado (a) no tiene prohibición alguna para ser titular del Derecho Minero, de conformidad con el artículo 10 de la Ley de Minería. Me comprometo a notificar a la Dirección General de Minería, cualquier cambio de dirección para recibir notificaciones, o cualquier cambio en la información anteriormente expuesta. |                          |                         |                                 |  |                          |
| Nombre que designaré al Derecho Minero:<br><input type="text"/>  |                          |                         |                                 | Área solicitada: (NAD27)<br><input type="text"/> Km <sup>2</sup> |                          |
| Localizada en el (los) Municipio (s) de:<br><input type="text"/>   |                          |                         |                                 |  |                          |
| Departamento (s) de:<br><input type="text"/>   |                          |                         |                                 |  |                          |
| Minerales:<br><input type="text"/>   |                          |                         |                                 |  |                          |
| Lugar y Fecha: _____   |                          |                         |                                 |  |                          |
| _____<br>Firma del Solicitante   |                          |                         |                                 |  |                          |
| Firma Legalizada: _____  |                          |                         |                                 |  |                          |

*Nota.* Presentación de formulario de permisos para trabajos a cielo abierto. Obtenido de Ministerio de Energías y Minas. (2007). *Dirección general de minería.* (p. 2). MEM.

**Figura 15.**

*Requisitos para presentar solicitud de licencia de explotación, exploración o reconocimiento a cielo abierto*

|   |  |
|---|--|
| 1 | •Formulario de solicitud   |
| 2 | •Solvencia de fiscalización  |
| 3 | •Justificar la personaría si comparece por medio de mandatario o representante legal. Artículo 41 de la Ley.                               |
| 4 | •Ubicación, descripción y extensión del área solicitada, acompañando original o fotocopia de la hora cartográfica a escala conveniente.    |
| 5 | •Descripción general del programa de trabajo a realizar, debidamente firmado por ingeniero civil, geólogo o minero.                        |
| 6 | •DPI legalizado.   |
| 7 | •Adjuntar original de la constancia vigente de colegiado activo del ingeniero que firma el plano y la descripción del programa de trabajo. |

*Nota.* Descripción de los requisitos para la solicitud de licencias de explotación. Obtenido de Ministerio de Energías y Minas. (2007). *Dirección general de minería.* (p. 3). MEM.

Además, para la solicitud de licencia de explotación, según el artículo 20 de la misma ley, el interesado deberá presentar el original del estudio de impacto ambiental al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, donde adjuntará a su expediente una copia con los sellos de recepción respectivos y presentar la aprobación del EIA por parte del MARN, previo a las publicaciones de los edictos respectivos, que es un requisito dispensable sin el cual no podrá continuarse el trámite que consiste en requerir el dictamen legal con aprobación de la Procuraduría General de la Nación.

Según la Dirección General de Minería, se pueden conceder plazos de licencias de reconocimiento para un máximo de 6 meses, plazos para licencias de exploración un máximo de 3 años y para un plazo de licencia para explotación hasta de 25 años. Para las áreas de licencia de reconocimiento deberá estar constituida en un polígono cerrado no menor de 500 kilómetros cuadrados y no mayor a 3000 kilómetros cuadrados. A diferencia de la licencia de explotación que deberá estar constituida en un polígono cerrado no mayor a 100 kilómetros cuadrados.

Finalmente, se deberá limitar las áreas con el uso de coordenadas UTM con sus lados orientados en dirección norte-sur y este-oeste (con ángulos rectos) o bien por límites internacionales o el litoral marítimo. Deberá presentarse y calcularse con un número no mayor a cuatro decimales, esto está contemplado en el párrafo segundo del artículo 24 del Decreto 48-97.

### **1.8.3. Condiciones seguras del lugar**

Si la cantera está trabajando sobre el nivel del suelo, las normativas de prevención estarán fijadas a las acciones seguras con que el personal laboral deberá portar su equipo de protección personal, que establece como mínimo el uso de botas con punta de acero, pantalón de lona, camisa manga larga, cintas

reflectabas en la camisa o, por defecto, uso de chaleco refractivo, casco de seguridad industrial y lentes industriales, si la cantera y sus equipos generan más de 25 decibeles prolongadamente por 3 horas a más se deberán utilizar tapones para los oídos.

Si la cantera trabaja por debajo del nivel del piso se deberá colocar tabiques con pilares para sostener las paredes, evitando así la caída de muros y provocar atrapamiento del personal. Para terrenos o zonas lluviosas se deberá monitorear las condiciones atmosféricas y las crecidas de afluentes para evitar que sean llevados por alguna corriente o que sea inundada la zona de explotación.

#### **1.8.4. Acciones preventivas en una planta de trituración**

El personal que labora en la cantera donde está prestando apoyo Proinca ha sido notificado sobre las siguientes acciones preventivas, las cuales se deberán poner en práctica todos los días de trabajo.

- Está totalmente prohibido presentarse bajo efecto de licor o bajo efecto de cualquier tipo de estupefaciente o droga que limite las capacidades de trabajo y exponga su integridad física y la de los compañeros de trabajo a cualquier tipo de riesgo o accidente.
- Está totalmente prohibido consumir licor o estupefacientes en las instalaciones de la cantera, sin importar que sea jornada laboral o no.
- Se deberá portar el equipo de protección personal dentro de las instalaciones de la cantera, se exceptúa el uso de casco, lentes y

tapones de oídos dentro de las oficinas administrativas o en el área de los comedores.

- Se deberá respetar la asignación del puesto otorgado, así como las tareas asignadas que, de incumplirse, podrían comprometer la continuidad de la producción en la cantera.
- Está totalmente prohibido abandonar el puesto de trabajo o puesto de trabajo asignado, de lo contrario se generará una sanción verbal o despido inmediato por reincidencia.
- Se deberá respetar a todo compañero de trabajo, evitando juegos, bromas o cualquier otro tipo de actitud que comprometa la producción de la cantera y la integridad física del personal.
- Se deberán respetar las zonas rojas de trabajo donde ya ha sido asignado un determinado número de personas para realizar ciertas actividades, aquellas personas que no son del área de trabajo deberán evitar ingresar por cualquier situación.
- Es importante reconocer todo tipo de alerta temprana, si un equipo, maquinaria o estructura presenta defectos o debilidades deberá ser reportado inmediatamente a su superior.

#### **1.8.5. Contaminación cruzada por el efecto de trituración**

Este efecto es común en la molienda o trituración, la contaminación cruzada estará identificada como la dispersión de material o partículas suspendidas hacia el medio ambiente, por lo que aquellas partículas

subatómicas de menor peso generarán una nube de contaminación y las que poseen un peso determinado que pueda caer sobre los equipos o suelos del área circundante de la zona de trituración permanecerán en reposo hasta que sea levantada manualmente.

A esto se le sumaría si el material de aporte que está siendo procesado posee otras características especiales que lo pueden crear con mayor índice de volatilidad o con mayor índice de diseminación por el sector. Para ello es importante la instalación de los filtros de recuperación y contención, evitando en su mayoría la propagación de los desechos hacia el medio ambiente, hacia los afluentes y hacia las viviendas cercanas.

## **1.9. Mantenimiento**

Se reconoce así al conjunto de tareas ordenadas y programadas destinadas hacia la preservación de un equipo, maquinaria o instalación por medio de análisis según el uso y aprovechamiento de ese determinado recurso. Las tareas del mantenimiento podrán estar condicionadas en su ejecución, si el mantenimiento es para algún equipo en especial o maquinaria que se encuentre en movimiento deberá ser necesario pararlas por completo.

Si el mantenimiento es para alguna instalación, estructura o edificación no será necesario detener operaciones, solamente si el tipo de acciones de mantenimiento entorpecen la movilidad del personal dentro de las zonas efectivas de trabajo.

En la cantera las tareas de mantenimiento son asignadas a los mecánicos de Proinca, algunas tareas son ejecutadas en las instalaciones y de ser necesario se transporta el equipo o maquinaria hacia las instalaciones de la

empresa. La maquinaria pesada es trabajada en el sitio. Cuando algunos equipos presentan fallas en los proyectos, son trasladados para poder inspeccionar cuál fue la avería y cuál sería la acción por ejecutar para solucionar el problema. Los mecánicos inspeccionan la maquinaria cuando se encuentra en el predio del proyecto.

### **1.9.1. Definición**

Se le conoce como un procedimiento en el cual se realizan las tareas necesarias para mantener en óptimas condiciones el equipo de producción, maquinas industriales, maquinaria o herramientas, para prolongar su vida útil.

### **1.9.2. Tipos de mantenimiento**

En la cantera se realizan los mantenimientos hasta que se presenta la falla en la maquinaria, la programación es vital para la continuidad de sus labores, las fallas que comprometen a los equipos y en sí el funcionamiento general de la cantera son casi inexistentes.

#### **1.9.2.1. Mantenimiento preventivo**

Este mantenimiento está destinado a prolongar la vida útil de los equipos y sus componentes mediante la revisión y la reparación (previa al colapso), para garantizar la fiabilidad y el buen funcionamiento. Se establecen rutinas periódicas para establecer el cambio de componentes antes del fin de su vida útil teóricamente y se da la revisión de los demás componentes, algunas veces mediante equipos auxiliares de medición.

### **1.9.2.2. Mantenimiento correctivo**

Este tipo de mantenimiento se realiza cuando el equipo colapsa, deteniendo la producción repentinamente, por lo que se deberá solucionar como una emergencia inmediata.

### **1.9.2.3. Mantenimiento predictivo**

En esta estrategia se hace seguimiento a la evolución temporal de ciertos parámetros, sin alterar el funcionamiento normal del equipo, para diagnosticar el comportamiento futuro de la posible manifestación de fallas o situaciones fuera de las condiciones estándares. Lo que se busca es planear las tareas proactivas con tiempo suficiente, con el objetivo de disminuir las paradas por mantenimientos preventivos y así minimizar los costos para mantenimiento y por no producción.

### **1.9.2.4. Mantenimiento proactivo**

El enfoque principal de este tipo de mantenimiento es determinar la causa o causas raíz que generan los fallos en los equipos o maquinaria, la proactividad será el conjunto de acciones inmediatas destinadas a corregir las fallas encontradas y mitigar por completo las causas que las están generando para que así no se generen más averías.

### **1.9.2.5. Mantenimiento evolutivo**

Este tipo de mantenimiento está asignado hacia el sector de la informática, por lo cual se asigna hacia el equipo de computación y los ordenadores de los equipos que son empleados en la cantera, reconociendo así

aquellas gestiones relativas de un cambio, desarrollo de nuevas funcionalidades, ampliación, modificaciones y ampliaciones del sistema operativo, por lo que será considerado evolutivo como un sinónimo de actualización y mejora.

El mantenimiento evolutivo también puede estar asociado al desarrollo de nuevas funcionalidades, automatización de procesos y mejora de aquellos procesos donde intervenía mano de obra.



## 2. SITUACIÓN ACTUAL

### 2.1. Situación actual del área de trituración

El área total de que dispone la cantera es de dos mil metros cuadrados, esa extensión es utilizada para distribuir estaciones de recolección de material que será procesado y material que ha sido separado y que cumple con los requerimientos básicos para la molienda. Otros puntos de concentración en el área son para acumular residuos de materiales que pudieron caer de la cinta transportadora o que fueron rechazados para la trituración.

#### **Figura 16.**

*Vista general del área de trituración*



*Nota.* Vista del área de que dispone la cantera para la trituración de materiales que cumplen con los requerimientos para la demolición. Elaboración propia.

La imagen anterior presenta una de las dos tolvas por donde se desecha el material que no fue de aporte al proceso de extracción de piedra caliza, la zona o el banco de explotación presenta piedra y roca de diferentes dimensiones, por lo que su procesado es un poco complejo. La idea de la imagen es evidenciar que no se poseen filtros antes y después del procesado de piedra caliza, lo que genera suspensión de partículas contaminantes en la cantera, así como en su entorno.

**Figura 17.**

*Zona de trituración*



*Nota.* Fotografía de la explotación que ha sufrido la cantera por más de cinco años. Elaboración propia.

Claramente se puede apreciar que la zona de trituración es la que mayor contaminación genera, la propagación que se genera diariamente podría superar 200 libras de material disperso, de ese material que puede caer al suelo

otras partículas quedarán suspendidas en el aire, es por eso que se ha presentado la necesidad de mitigar dichos problemas de día, la cantera ya posee más de cinco años en explotación, por lo que es necesario mejorar sus condiciones de trabajo.

Los empleados, que en número son muy pocos, realizan diferentes tareas relacionadas a la explotación minera. Dentro de esas tareas se pudo evidenciar que no han sido capacitados o programados para que los niveles de contaminación puedan reducirse con otras tareas combinadas en la contención de los desechos disueltos, comúnmente realizan tareas dentro de los bancos de extracción de piedra caliza, traslado, separación, colocación en la banda transportadora y acumulación final de los materiales rechazados en montañas o bancos de tierras.

Las ventajas de la zona de trabajo incluyen el hecho de que no se emplean materiales o suministros empacados del exterior, que generen un nuevo contaminante que sea mezclado con los minerales finales, exclusivamente se acumulan los desechos de piedra caliza, arcillas, pedrín u otros minerales que pueden ser vendidos como material de segunda a otros procesos productivos. La acumulación de los bancos de desechos se realiza en línea conforme alcanzan un estimado de tres metros de altura y casi seis metros de diámetro, una vez por semana son recolectados por una empresa externa para trasladarse al comprador final.

La cantera puede trabajar jornadas extendidas, iniciando a las cinco de la mañana porque posee residentes de obra, y deteniendo sus labores hasta las siete u ocho de la noche. El nivel de ruido es fuerte, el aire en el lugar es denso, la planilla que se rota cada diez días es de quince personas, quienes son los responsables de que todo el equipo se encuentre en funcionamiento óptimo,

evitando así que se detenga la producción diaria, los domingos se descansa, los sábados se trabaja en horario normal. Se encontraron zonas de acumulación de desechos comunes, son de menor volumen comparadas con los desechos generados por la explotación minera. Al final del día se puede percibir una nube densa que va asentándose sobre la cantera en general, esa nube se vuelve a generar al día siguiente y se repite cada día de trabajo.

### **2.1.1. Procesos de clasificación de minerales**

Antes de explotar un banco de tierra los propietarios del proyecto realizan estudios geológicos, se toman muestras a diferentes distancias entre puntos superficiales y a diferentes profundidades, la intención de la recolección de muestras es ser llevadas a un laboratorio geotécnico para determinar si el terreno es apto para explotar piedra caliza y si es consistente, de lo contrario puede ser desechado, anualmente se realizan nuevas capturas de pruebas técnicas que permitirán identificar nuevas zonas de explotación.

#### **2.1.1.1. Materiales procesados en trituración**

Pueden existir un sinnúmero de materiales y minerales que suelen ser procesados y explotados en las canteras, especialmente en la cantera en estudio solamente se procesa piedra caliza. Los equipos, la maquinaria y las configuraciones de la trituradora son exclusivos para ese material, su composición puede darse en bloques irregulares de distintos tamaños, suelen ser extraídos con martillos hidráulicos, palas mecánicas, si la zona es irregular se pueden emplear obreros con picos para ser extraídos manualmente.

La piedra caliza es en sí el material final extraído luego de extraer los bloques irregulares de la tierra o de cavernas en muros, iniciará con una

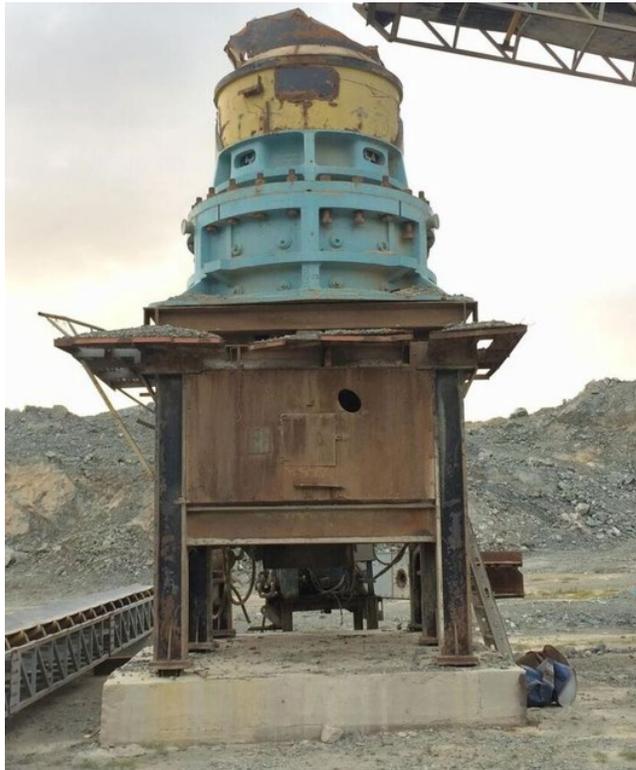
primera trituración con martillos hidráulicos para reducir el tamaño a medidas estandarizadas de la maquinaria, luego se colocan en la banda transportadora para que ingresen a la tolva de trituración, donde una configuración de dientes metálicos y aleaciones de dureza pueden moler a partículas más pequeñas los materiales que fueron aportados, continúa el proceso donde son nuevamente sometidas dichas partículas a una nueva molienda, para convertir así la piedra caliza en polvos finos que pueden ser utilizados en obra gris y construcción.

### **2.1.2. Maquinaria y equipos en el proceso**

La cantera posee una trituradora, el procesamiento y la producción han permitido procesar más de 1000 libras de material de aporte diario, de ese volumen se obtienen 600 a 700 libras de piedra caliza de buena calidad, que es acumulada en contenedores tipo silos metálicos horizontales, para evitar pérdidas adicionales al medio ambiente. Además de eso se evita que las lluvias arruinen ese material recuperado, ya que, al entrar en contacto con agua, pierde sus propiedades químicas y físicas necesarias para el uso final en el sector de la construcción.

**Figura 18.**

*Trituradora Allis Chalmers*



*Nota.* Fotografía de la trituradora marca Allis Chalmers que posee la cantera desde hace más de diez años. Elaboración propia.

La trituradora posee más de 10 años de uso, pero sigue siendo funcional, es de quijadas con impacto de 28,800 PSI, dentro de su parte interna y según las especificaciones del fabricante se obtiene que posee volantes de 48" de diámetro que giran a 600 RPM, este equipo es accionado por un motor de 10 HP de 1700 RPM a 220 voltios, su diámetro de succión es de 4". Su diámetro externo es de un metro, su altura de la base de fijación hacia el punto más alto donde se capta el material a procesar es de 75 centímetros, el diámetro de alimentación es de 50 centímetros.

### **2.1.2.1. Equipos industriales**

Otros equipos empleados para el preprocesamiento del material de aporte que ha sido extraído de los bancos de piedra y bancos de tierra son las maquinarias trituradoras y de impacto. Se posee una máquina de impacto de eje vertical tipo pilón, su función es transformar la roca en áridos de menor dimensiones que los bloques que están ingresando desde los bancos de extracción. Seguidamente se encuentra la maquinaria de impacto de barras con tres etapas, su procesamiento consta en recibir el material que ha salido de los bancos de piedra aún más dura.

En otras líneas de procesamiento se pueden encontrar maquinarias de quijada, su función y uso es reducir dimensiones de 6 pulgadas a una pulgada el material que está ingresando, por su diseño se puede triturar a compresión el material. Otra maquinaria es de doble propósito, ya que posee quijada de trituración y rodo de molienda, su función será reducir el grano que pasará a transformarse en polvo fino, la separación entre la zona de rodaje y el área de contacto del rodillo que está sujeto a presión a una separación determinada puede garantizar que ese grano cumplirá con un tamaño estandarizado.

Todos los equipos están dispersos en las zonas de trabajo, algunas de las maquinarias de trituración de quijada y de rodos están colocadas a distancias relativas de los bancos de extracción para reducir las tareas de transporte.

### **2.1.2.2. Equipos mecánicos**

Como tales solo se encuentran las bandas de transporte, estas pueden rotarse, ajustarse y conectarse entre sí para hacer llegar material de aporte,

material procesado y material de desecho a diferentes puntos de la cantera, las bandas han sido montadas estratégicamente en bases semimovibles para que puedan girarse o transportarse con un montacargas.

Martillos y punzones son utilizados para deformar los bancos o yacimientos de donde se extrae la piedra caliza, en aquellos lugares donde los equipos mecánicos no pueden ingresar es necesario que se realice manualmente, los trabajos se complementan con la trituración, por lo que no se emplean más equipos mecánicos en los procesos. Los equipos disponibles pueden distribuirse en distintos puntos en la zona de explotación, pero deberán colocarse en la bodega al concluir las labores, otros equipos de mayor volumen podrán quedarse expuestos al medio ambiente.

Los equipos mecánicos, así como otros equipos que se utilizan constantemente, presentan problemas en su funcionamiento por la constante acumulación de sedimento de partículas de piedra caliza, cuando los equipos se exponen a lluvias o lloviznas pueden calentarse por mal funcionamiento hasta que se limpian y se engrasan, cuando estos equipos continúan trabajando en condiciones altas de estrés por contaminación suelen detenerse operaciones por lapsos de veinte a treinta minutos hasta que regulan su temperatura para continuar con las operaciones de vibración y perforación.

### **2.1.2.3. Tipos de mantenimientos**

Todos los equipos presentes en la caldera, incluyendo la trituradora, han sido trabajados con mantenimientos reactivos, los empleados que se rotan por turnos indican que poseen diversas tareas para procesar la tierra y extraer la piedra caliza, pero la maquinaria y los equipos pueden ser reparados por un cierto grupo de trabajadores presentes en la cantera, no hay un departamento

de mecánica destacado en sus instalaciones, pero la empresa sí posee personal.

Ese personal es despachado exclusivamente cuando se detienen operaciones o cuando los equipos no procesan material a ritmos óptimos de trabajo, los mantenimientos preventivos han sido descartados, es pura falla y detención de operaciones. Cuando el equipo falla le puede tomar un aproximado de una hora para que el equipo de mecánicos llegue al lugar, mientras sucede eso se han enviado reportes de las fallas pequeñas que se fueron dando y de las señales de alerta que también fueron informadas previamente.

En general, si un equipo, maquinaria o herramienta funciona o puede seguir procesando material, no es detenido para servicios de engrase, revisión de fisuras, revisión de engranajes u otros puntos de importancia que comprometen la vida útil de ese artículo. Los mantenimientos correctivos y reactivos pueden comprometer el ritmo de producción, adicionalmente pueden generar mayores gastos de procesamiento de materiales, ya que no se poseen *stocks* de repuestos o bodega de insumos para que los equipos puedan volver a estar en marcha.

Cada mantenimiento correctivo puede demandar como mínimo un día de retención de operaciones, pero, si la pieza o las piezas que deberán ser sustituidas no se encuentran a medida en tiendas de repuestos nacionales, deberán ser fabricadas a medida o ser solicitadas al fabricante a otro país.

## **2.2. Zona de trituración**

Del área total que dispone la cantera se distribuye la zona de trituración, el radio de trabajo y la distribución de los equipos es de sesenta y cuatro metros cuadrados, se evalúa así ya que la banda de transporte principal que lleva el material a trituración ha sido procesado anticipadamente en dos fases primarias, una de ellas es en el pilote horizontal de impacto y la segunda estación es bajo el rodillo de estandarización del grano, concluyendo esas fases se conecta la banda que ingresará el material a la trituradora.

La trituradora, como consta en sus especificaciones técnicas y en la imagen agregada, utiliza área pequeña donde está colocada en una base de concreto a pilares de metal, la zona de trituración no ha sido condicionada con métodos, equipos o instrumentos mecánicos que contengan la dispersión de contaminantes, el trabajo se realiza a cielo abierto, por lo que el nivel de sonido puede ser soportable al utilizar equipos de protección auditivos.

Luego de que la piedra caliza ha sido procesada es depositada en un contenedor metálico, el contenedor se encuentra en una banda transportadora para que su movilización sea con mayor practicidad, luego de alcanzar el nivel máximo de recolección se retira el contenedor hacia la zona de almacenaje tipo bodega, se coloca un nuevo contenedor, hasta finales del año 2018 el material se trasladaba expuesto por bandejas de transporte, pero con el clima lluvioso se contaminaba el producto final.

Todos los contenedores que reciben el polvo de cal son marcados con logo de la empresa para que puedan ser retornados, algunas empresas disponen de contenedores propios donde se realiza el vaciado para que no se les realicen cargos extras. En la zona de trituración pueden permanecer tres a

cinco trabajadores, ellos velarán porque el funcionamiento de los equipos sea correcto y que no se detengan las líneas de aporte de material.

### **2.2.1. Acciones típicas de la trituración**

La molienda o trituración como tal es la principal actividad que se puede realizar, el material a procesar ingresa todavía en forma de piedra de cal, luego de ser triturado se convierte en polvo fino de cal, este puede ser tamizado o empacado, según el tipo de uso así deberá ser el procesamiento. Para la cantera en estudio el material procesado es empleado como un agregado en obras de construcción, por lo que no es requerido su tamizado para recubrimientos de paredes, pisos o techos, ya que es necesario que el grano sea fino y con mejores condiciones físicas para evitar gránulos sobre las superficies que serán alisadas.

Otra acción típica para la trituración es la separación de minerales, para ello la cantera y su administración ha necesitado realizar estudios de suelos sobre los posibles bancos de extracción, si el estudio no cumple con los límites de expectativa del porcentaje de concentración de hidróxido de calcio al 90 % puede ser rechazado el terreno, esos márgenes son impuestos por la empresa para aprovechar el movimiento de tierras, uso de equipos neumáticos, uso de equipos mecánicos y aprovechamiento del recurso humano que puede trabajar manualmente al no poder colocar maquinaria pesada.

Suelen presentarse imprevistos durante los procesos de trituración, los principales retrasos son ocasionados por fallas inesperadas, estas fallas se han derivado del bajo control de mantenimientos preventivos, la trituradora ya posee más de diez años de antigüedad, por lo que algunas piezas internas y piezas móviles presentan mayores retos para localizar sus repuestos, es por eso que

los mecánicos de la empresa suelen reconstruir o construir a medidas las piezas que contienen mayor desgaste, por cada falla inesperada suelen detenerse operaciones una hora o hasta doce horas, todo ese tiempo la cantera deja de producir y representa pérdidas al final del año.

### **2.2.2. Procesado de piedra caliza**

Es importante reconocer el bando de extracción del material base o material duro, esa materia deberá cumplir con diferentes estándares de calidad para no comprometer el producto final y no entregar producto de baja calidad, es necesario realizar estudios geológicos y recolección de muestras para determinar así la presencia de carbonato de calcio en forma de roca de piedra caliza metamórfica, cuyo principal mineral es la calcita.

Es necesario reconocer que la piedra metamórfica posee concentración de otras minerales y que, según las limitaciones finales del producto a recolectar, pueden considerarse como impurezas, dichas impurezas son el cuarzo, hematita, grafito, limonita, clorita, mica, tremolita. La composición de esos minerales puede variar de 90 % de concentración hasta 100 % de concentración, según el tamaño del grano así puede darse el grado de impureza.

La calcita produce un mosaico con superficies que reflejan brillo, lo cual le permite a la roca adquirir un pulimento agradable y ornamental. Las capas enterradas de la piedra caliza se convierten en mármol por medio del metamorfismo termal, es decir por medio del calor de masas ígneas intrusas con ayuda del agua y otros agentes. Las rocas calizas dolomíticas o dolomitas calcáreas a veces forman capas alternas con la calcita, formando mármoles

indeseados debido a que los dos materiales, frecuentemente difieren en color, textura, susceptibilidad al pulimento y resistencia al clima.

Las sustancias orgánicas dan origen a rocas cuyas manchas varían desde gris claro hasta negro. Los mármoles dolomíticos o el mármol de calcio puro, es decir, el mármol absolutamente puro, es blanco y brillante. Los mármoles rosados y rojos deben su color a la hematita o al carbonato de magnesio. Los mármoles amarillos y crema lo deben a un contenido de limonita. Los mármoles con hierro imparten hermosas coloraciones de verde, rojo o café con sombras veteadas o planeadas.

### **2.3. Medio ambiente**

Las condiciones generales con las que se trabajan en la cantera generan contaminación en los diferentes medios. Al medio físico en el momento de la extracción de tierra y piedra caliza de los terrenos en explotación, por la alteración del suelo extraído, asimismo, la maquinaria presenta fugas de lubricantes y otros fluidos que se mezclan con la tierra y del aire por la suspensión de material particulado, el cual puede pasar hasta dos horas suspendido en el área después de concluir las operaciones, en el caso que hayan espacios naturales de agua cercanos, también se ven afectados cuando cae el material particulado.

Al medio biológico genera un impacto, porque al extraer la piedra afecta la flora y la fauna del área explotada y de sus alrededores. Por otro lado, al medio sociocultural lo afecta cuando al extraer la piedra caliza se ve afectada la vida de las personas que rodean el área explotada e incluso en algunas ocasiones obliga a cambiar la cotidianidad de las comunidades aledañas.

Ya que no se emplea materiales de aporte extras u otros insumos se descartan envases, envolturas u otros contaminantes inorgánicos, los afluentes cercanos a la cantera se pueden contaminar por las partículas suspendidas, de otra forma se podría considerar que está controlado el entorno y el medio ambiente del lugar.

Los empleados de la cantera emplean rondas de monitoreo para evaluar el grado de contaminación en terrenos aledaños, estas actividades se realizan una vez por mes, solo se recolectan anotaciones y con base en estas se generan informes internos. Si es necesario recolectar restos de basura inorgánica se realiza para mitigar el daño circundante proveniente de la cantera, a su vez, se comprometen con siembras de árboles ornamentales en los límites o colindancias del terreno para que sirva como barrera natural en contención de desechos de plástico, cartón, latas u otros elementos que puedan ser trasladados con la fuerza del viento, el personal de la cantera vela constantemente por su entorno.

### **2.3.1. Protocolos de monitoreo en la cantera**

Diariamente se realizan tareas de monitoreo antes de iniciar labores y luego de concluir las tareas del día, estos protocolos sirven para recolectar todo tipo de desecho inorgánico que se encuentre en las zonas de trabajo, sus tareas son preventivas para que no se mezclen otros productos con la trituración de la cal, reducir la probabilidad de que partículas plásticas o de papel obstruyan entradas de aire de equipos industriales y que otros desechos interfieran con la movilidad y las operaciones de las bandas de transportación. Destacan las siguientes actividades dentro del protocolo de monitoreo:

- Validar que el área de trabajo no presente desechos sólidos e inorgánicos contaminantes.
- Al encontrar algún desecho o contaminante que comprometa la maquinaria de trabajo se deberá recolectar y colocar en el recipiente indicado.
- Durante la trayectoria al puesto o área de trabajo se deberá verificar que no se encuentren desechos contaminantes.
- Verificar que el equipo con que se está trabajando no posea fugas de líquidos, fluidos u otros agentes contaminantes al suelo.
- Evitar lanzar, desechar o tirar desechos en caminos, corredores, puestos de trabajo o cualquier otra zona dentro y fuera de las instalaciones de la cantera.
- Es responsabilidad compartida verificar y garantizar que la cantera no posee desechos en sus instalaciones.

### **2.3.2. Actividades de contención de partículas suspendidas**

La idea de la investigación y de la propuesta surge por las necesidades propias de la cantera, los trabajos propios de explotación de tierras, trituración y extracción de piedra caliza generan contaminación por partículas suspendidas, esta contaminación no ha sido controlada, la administración del proyecto ha planteado que es necesario contener ese volumen de contaminación, las descargas diarias al medio ambiente pueden ser trasladadas por corrientes de

aire, estas corrientes de aire terminan depositando los contaminantes en los lugares cercanos a la cantera.

No han desarrollado algún método específico o idóneo para contener la contaminación de las partículas suspendidas, durante el día se visualiza una nube densa que cubre más del 90 % de la cantera y durante la noche las partículas con mayor peso, pero aún en suspensión, se precipitan sobre los equipos, maquinaria, pisos, techos y áreas verdes, y luego de varios años ya se identifica esto como un fenómeno de contaminación ambiental.

### **2.3.3. Actividades de limpieza diaria**

Departamento de limpieza como tal no posee la cantera, cada uno de los trabajadores es responsable de que su unidad de trabajo, equipo, maquinaria o área asignada se encuentre limpia, ordenada y organizada, de lo contrario se les puede levantar una falta, o una llamada de atención, las actividades antes de iniciar labores consisten en remover el exceso de tierra y exceso de partículas de piedra caliza que fue depositado durante la noche por suspensión.

Durante el día se deberá garantizar que las áreas de trabajo y zonas comunes en la cantera no sean contaminadas con desechos de latas, plástico, papel y cartón, si la zona de trabajo de uno de los trabajadores presenta acumulación de desechos que no sean derivados de la explotación mineral deberán recolectarse y depositarse en sus envases correspondientes.

### **2.4. Departamento de seguridad e higiene industrial**

En la cantera se monitorean todas las tareas que representen peligro, riesgo y probabilidad de accidente, cada uno de los trabajadores posee

diferentes capacitaciones para evitar descuidos o errores involuntarios como atrapamiento entre equipos, aplastamiento por pilones de compactación, cortes por puntas o equipos punzo cortantes, todas esas acciones se llevan a cabo mediante constantes ciclos de capacitaciones, la empresa se ha comprometido en velar y resguardar la salud física, mental y psicológica de sus trabajadores.

En la cantera, al trabajar con todos los equipos a su punto máximo de operaciones, el ruido es uno de varios factores que pueden afectar a los trabajadores, por ello se han dotado de tapones auditivos para evitar ese tipo de contaminación auditiva y que genere estrés en los trabajadores, para la contaminación del medio ambiente en función de las partículas suspendidas se usan mascarillas, las mascarillas son de uso industrial, por lo que se intercambia el filtro cada cierto tiempo.

Los lentes de seguridad son otro artículo que acompaña a los trabajadores para evitar que penetren desechos de piedras o rocas y que puedan lastimar su visión al estar cerca de la zona de trituración y de la zona de extracción del material. Otro artículo que no puede hacer falta en los trabajadores son sus botas de punta de acero para evitar que los pies sean aplastados o desmembrados.

#### **2.4.1. Salud y seguridad ocupacional**

La relación de las funciones del trabajo y las actividades que se realizan diariamente en la cantera elevan los niveles de peligro en diversas variables, se pueden evaluar acciones tangibles críticas que podrían comprometer la salud física de los trabajadores y efectos no controlados como el ruido y las vibraciones, que también pueden afectar directa o indirectamente a quienes se

exponen más tiempo y con menor distancia a los equipos más ruidosos en la cantera.

Para ello la empresa dota de equipos de protección personal, trabaja en función de los artículos de mayor relevancia del Decreto 229-2014 para garantizar que la jornada de trabajo, las instalaciones y el entorno como tal cumpla con las condiciones mínimas exigidas en la ley. La contaminación ambiental puede afectar las vías respiratorias de los trabajadores, es otro de los efectos que se continúan evaluando y mitigando, para así llegar a presentar una empresa totalmente agradable para el trabajo pesado que allí se realiza.

La prevención es una tarea compartida de todos sus trabajadores, no se poseen equipos de seguridad ocupacional como tal, pero sí han sido autorizados para apoyarse mutuamente, ese apoyo puede iniciar con una observación hacia el mal comportamiento de un compañero de trabajo como llegar a redactar una queja o demanda por cometer acciones indebidas en el trabajo, todo eso forma parte de los protocolos de prevención en la empresa, la tasa de accidentes es baja, no se han registrado accidentes leves o fuertes durante el año 2021, aunque la cantera ha trabajado bajo diferentes restricciones por los protocolos covid-19, se continúan llevando a cabo los contadores oficiales para identificar puntos vulnerables que permitan mejorar las relaciones diarias y disminuir cualquier situación de peligro.

#### **2.4.2. Equipo de protección personal**

Se conforma por casco industrial, lentes de protección industrial, protectores auditivos, mascarilla, botas con punta de acero. Todo ese equipo es dotado desde el primer día de trabajo en la cantera, por el incumplimiento o por no utilizarse se puede negar el acceso a las instalaciones al personal, la

administración en general prohíbe que se circule por las zonas de trabajo o áreas que son asignadas específicamente a cada empleado, para evitar accidentes con montacargas u otros equipos de carga que se emplean.

### **2.4.3. Riesgos laborales**

En la cantera se han definido diferentes acciones inseguras que podrían generar algún tipo de riesgo laboral, por lo que sus máximas autoridades les definen a los rangos medios, a cargo de los trabajadores de menor rango, que hacer todo aquello de lo que está prohibido en las normas de convivencia puede crear la probabilidad de accidente y este puede provocar el riesgo laboral, se concretará cuando ocurra el evento, pero se evaluará la causa que originó el accidente y si se define que la consecuencia fue por error voluntario o por hacer actividades que se ha prohibido realizar se podrá castigar a ese trabajador con sanciones internas.

Realizar actividades que no sean exclusivamente tareas de labores asignadas será considerado como una falta al protocolo de convivencia y de labores en el trabajo, por lo que todos los trabajadores ya poseen dichas instrucciones y evitan adoptar conductas negativas que exponen su salud hacia el peligro, al igual que con sus compañeros de trabajo, estaría siendo prohibido realizar todo tipo de bromas, empujar o jalar a un compañero en el trabajo y sin duda alguna el ingerir bebidas alcohólicas o cualquier tipo de alucinógeno.

### **2.5. Departamento de Administración**

Es el responsable de administrar todos los recursos en la cantera, la administración también consiste en generar los programas de producción sobre la explotación de minerales y tierras estimadas en volumen para un periodo de

tiempo establecido, dicho de otra forma, el Departamento de Administración también tiene como parte de sus funciones garantizar que los niveles de producción estimada para el mes sean alcanzados.

Durante el procesamiento de tierras y minerales se distribuyen tareas para operarios de bajo nivel como tareas de supervisión y monitoreo a operarios de nivel intermedio, los jefes de área deberán garantizar que el Departamento de Administración alcance sus metas conforme las proyecciones estimadas de cada banco de explotación, son infinitas variables que pueden afectar la producción, pero el pronóstico ha sido una herramienta clave para ese departamento.

Durante las visitas realizadas a la cantera uno de sus administradores de mayor antigüedad señaló que, en proporción al estimado de producto final proyectado, se pueden generar diferencias de menos 5 % hasta menos 10 %, eso es un margen considerablemente aceptable según sus anotaciones, pero superar el 15 % puede comprometer todas sus operaciones en función a los costos empleados.

No solamente la explotación de minerales es una de las tareas principales de ese departamento, además garantizar la continuidad de las operaciones en función del buen desempeño de los equipos y de la ejecución de las tareas de todo el personal asignado a diferentes puestos asignados es uno de los roles de mayor demanda, trabajar como un solo organismo o como un solo departamento es parte de las acciones diarias, evitar retrasos, alcanzar las metas e incrementar la producción anual son sus objetivos constantes.

### **2.5.1. Disposiciones finales de los desechos contaminantes**

Dentro de la cantera no se generan desechos contaminantes provenientes de desechos sólidos o desechos líquidos, el personal no está autorizado para ingresar a su zona de trabajo alimentos, alimentos empacados, por lo que los desechos clasificados como contaminantes deberán quedar resguardados desde las oficinas administrativas o en el salón de alimentos. Los desechos contaminantes que se generan por el movimiento de tierras y por la transformación de los materiales se recolectan con las tierras suspendidas y se va creando un montículo para que pueda ser trasladado como tierra de abono a empresas externas.

### **2.5.2. Disposiciones finales de los materiales contaminantes**

Se debe tomar en cuenta el Acuerdo Gubernativo No. 164 - 2021, del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, *Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos Comunes*, el cual tiene por objetivo establecer las normas sanitarias y ambientales que deben aplicarse para la gestión integral de los residuos y desechos sólidos comunes, en función de asegurar la protección de la salud humana y evitar la contaminación del ambiente.

Los materiales derivados de plástico, cartón, latas u otros similares pueden desecharse en contenedores localizados dentro de las oficinas administrativas, las tareas que se realizan en la cantera y directamente en la zona de procesamiento de tierras y minerales, evitan que se introduzcan artículos que no son de uso necesario, los trabajadores deberán portar exclusivamente el uniforme de trabajo y su equipo de protección personal, al tener reglas como evitar fumar en áreas de trabajo o ingresar alimentos o

bebidas se reduce a cero la probabilidad de que exista algún material contaminante.

La explotación de la piedra caliza no requiere químicos o agentes externos para ser separada, para ello se han realizado estudios geológicos con toma de muestras de bancos de tierras, luego de eso se desconoce si la empresa o los trabajadores podrían ingresar algunos materiales contaminantes a las zonas de trabajo, todo aquel material contaminante deberá ser desechado en los recipientes acondicionados en el ingreso de las oficinas administrativas

### **2.5.3. Equipos de contención de los residuos**

Para residuos contaminantes se utilizan toneles de latón o de metal, son toneles reciclados donde se han despachados ciertos fluidos que sirven para realizar mantenimiento a los equipos industriales, como al montacargas, regularmente ese contenedor puede captar los residuos de quince días, luego son vertidos en el vehículo municipal que realiza la recolección de los desechos en la empresa.

El recipiente para residuos no contaminante es de plástico, también llamado tonel, a diferencia del recipiente de metal, en ese suelen colocar desechos de alimentos, envoltura de alimentos, envolturas de cigarrillos o envoltura de paquetería que ha llegado a las instalaciones, se descartan residuos químicos como residuos de aceites y lubricantes. Cada uno de estos recipientes posee separación y señalización adecuada para que no sean confundidos.

## **2.6. Recolección de desechos**

Los montículos de desechos que surgen del procesamiento de piedra caliza suelen venderse a empresas externas que los compran como abono y fertilizantes de terrenos aptos para los cultivos, semanalmente pueden recolectarse uno o dos montículos con volumen aproximado de 2 toneladas de material de desecho, aunque no sea piedra caliza, puede ser cal o mineral, derivado de ciertas propiedades que benefician la explotación de la cantera puede ser comercializado como material de aporte a la agricultura.

Los trabajadores no realizan tareas directas de recolección, se configuran las bandas transportadoras para que los desechos sean acumulados en puntos estratégicos, al llegar a su nivel máximo de elevación la banda transportadora cambia su punto de concentración para iniciar la preparación de un nuevo montículo de desechos.

### **2.6.1. Recolección de desechos comunes**

Todos los desechos comunes que se generan en las actividades diarias se recolectan constantemente, se evita que sean desechados en el entorno de las instalaciones, la empresa municipal realiza la recolección dos veces por semana, en estos desechos comunes se ha considerado mezclar todos los desechos generados en las oficinas administrativas y en las áreas de los sanitarios.

### **2.6.2. Recolección de desechos de piedra caliza**

Los desechos derivados de la trituración de la piedra caliza se recolectan en montículos, estos se venden a otras empresas que los procesan como

abonos y fertilizantes. La recolección es inmediata al trabajo de explotación de la cantera, cuando la producción se detiene, también se detiene la acumulación de los desechos.

La piedra caliza posee diferentes usos naturales, industriales, domiciliarios, constructivos y para el sector agrícola. Lo que se conoce como desechos para otro sector productivo puede considerarse como materia prima. Las empresas que recolectan los desechos suelen llegar a la empresa en estudio dos a tres veces por semana para cargar con lo que ya se ha procesado, de esa forma la cantera y su administración garantizan que el manejo de las disposiciones finales se realiza con protocolos de mitigación al medio ambiente, que no se mezclan con desechos comunes, que no se depositan en basureros clandestinos y que el procesamiento de los bancos de tierra puede generar mayor beneficio económico.

### **3. PROPUESTA PARA LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, POR MEDIO DEL USO DE FILTRO DE SUCCIÓN *JET PULSE***

#### **3.1. Área de trituración**

El área de trituración es la zona con mayor concentración de ruido y de contaminación dispersa, por ello se ha identificado la opción de instalar el filtro de succión para lograr así reducir el impacto ambiental y las nubes de polvo que se generan diariamente, la cantera en general puede generar diferentes tipos de contaminantes, pero se trabajará específicamente en el problema de la dispersión de partículas suspendidas.

La idea principal es mejorar las condiciones ambientales con el control de partículas, además de eso se mejorará la calidad del aire con la contención de partículas suspendidas, con el atrapamiento de los residuos microscópicos que se generan al triturar la piedra caliza se podrá obtener varios beneficios, el principal es mejorar la regulación de descargas hacia el medio ambiente y su entorno, el segundo es aprovechar la captación de ese material para que posteriormente pueda ser tamizado. Al captarlo, extraerlo de los filtros y empacarlo puede ser vendido como material de segunda.

La piedra caliza puede generar diferentes problemas en la agricultura, riachuelos y enfermedades respiratorias, la exposición a la misma constantemente ocasionaría enfermedades crónicas en los seres humanos,

daños en la piel de animales de granja y la erradicación de cosechas sensibles a la cal.

### **3.1.1. Control de partículas**

La contaminación del aire se puede definir como gases dañinos o partículas en la atmósfera en concentraciones lo suficientemente altas para ser dañinas a la salud humana, a las plantas, a los animales y a los equipos industriales. Se estima que los contaminantes primarios concentrados en el aire son los descargados directamente desde una fuente contaminante y los contaminantes secundarios son aquellos que se forman por reacciones en la atmósfera, uno de sus máximos representantes es el ozono. De la cantera la mayoría de sus descargas son materias particuladas, algunos contaminantes gaseosos, óxidos de nitrógeno, monóxidos de carbono y compuestos orgánicos volátiles.

El material particulado o mezcla de partículas sólidas se forma por aquellas partículas que están suspendidas en el aire, analistas internacionales como la Agencia para la Protección Ambiental reconoce el material particulado como la materia particulada que se presenta con diámetro aerodinámico nominal de 10 micrómetros o menos. Según sea su proceso de transformación o de degradación en la trituración pueden ser de otras dimensiones, comúnmente conocidas en las canteras de piedra caliza, las que presentan diámetro aerodinámico pueden ser de 2.5 micrómetros o menos, por lo que las subclasifica en MP<sub>10</sub> (materia particulada gruesa) y MP<sub>2.5</sub> (materia particulada fina).

Indica así la Agencia para la Protección del Medio Ambiente: a menor dimensión de la partícula, mayor tiempo podrá permanecer en suspensión y por

consiguiente puede ser transportada a mayores distancias, otra características de las partículas de piedra caliza es sobre si son partículas muy pequeñas, que en la práctica se ha evidenciado que no pueden sedimentarse en la atmósfera y en atmosferas húmedas pueden crear núcleos de condensación y precipitarse con la lluvia. Otro factor que influye es el tipo de composición química, por lo que pueden cargar consigo contaminación a los suelos y aguas donde se depositarán luego de la precipitación, al caer hacia afluentes como ríos, estanques u otros depósitos de agua pueden ser movilizadas nuevamente.

**Tabla 2.**

*Tamaños típicos de emisiones atmosféricas de partículas*

| <b>Tipo de partículas</b>                     | <b>Diámetros de partículas (µm)</b> | <b>Tiempo teórico para caer 1 metro</b> |
|---|-------------------------------------|---|
| Polvos de carbón                              | 100 a 1                             | 1.1 segundo a 168 minutos               |
| Polvos de cemento, fragmentación de minerales | 100 a 0.1                           | 1.1 segundo a 142 minutos               |
| Cenizas voladoras                             | 100 a 0.1                           | 1.1 segundo a 142 minutos               |
| Humos de combustión de aceites                | 1 a 0.1                             | 168 minutos a 142 horas                 |
| Núcleos de combustión                         | 0.1 a 0.01                          | 142 horas a 99 días                     |
| Polvos y humos metálicos                      | 100 a 0.001                         | 1.1 segundo a 3 años                    |

*Nota.* Descripción de algunos contaminantes primarios concentrados en el aire. Obtenido de E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 17). Universidad de Piura.

Las partículas de piedra caliza que se generan en la cantera en análisis pueden enmarcarse en las primeras tres clasificaciones, las medidas pueden variar microscópicamente, por ello se identifica que la dispersión hacia terrenos aledaños o comunidades vecinas ha afectado en el transcurso del tiempo,

algunas de estas partículas pueden quedarse en suspensión, pero durante el periodo de lluvia se pueden recolectar de sus tendederos de ropa, de techos, pisos y suelos. De tal forma que el control de partículas es una acción y respuesta inmediata ante el continuo nivel de contaminación y descargas generadas al medio ambiente, el compromiso de las autoridades de la cantera se evidencia al iniciar con sus procesos de análisis y preautorización de la solución a ese fenómeno.

### **3.1.2. Calidad del aire**

Para Guatemala la calidad del aire está regulada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, su legislación es explícita y clara en proteger el medio ambiente, sus entornos y sus medios de vida están verificados conforme al *Manual de legislación ambiental de Guatemala*, desarrollado con la colaboración del Instituto de Derecho Ambiental y Desarrollo Sustentable, de fecha marzo del año 1999.

En dicho instrumento se pueden citar otros instrumentos legales como acuerdos y decretos gubernativos donde se consideran acciones y tareas propias de los patronos para regular, garantizar y crear un ambiente controlado según el tipo de trabajo que se realice bajo una nave industrial o trabajando a cielo abierto, lo principal para las autoridades guatemaltecas es resguardar la salud física de los trabajadores y de las personas en general que puedan verse afectadas directa o indirectamente con la contaminación.

El MARN diseñó en el año 2001 el plan de gestión de calidad del aire, mediante ese instrumento se establece que es necesario instalar redes de monitoreo para diagnosticar las áreas que generan la contaminación, posteriormente se deberían desarrollar y ampliar modelos de dispersión de

contaminantes para reducir el daño al medio ambiente, se incluye que es necesario evaluar los impactos de la contaminación del aire en exteriores y en interiores, evaluar y cuantificar los efectos directos e indirectos de la contaminación del aire.

Todas esas acciones han sido desconocidas por la administración de la cantera, pero en un futuro inmediato se deberán adoptar y llevarlas a la práctica, pues mejorar la calidad del aire es otro reto importante.

### **3.2. Torres de limpieza húmeda**

La idea de instalar una torre de limpieza húmeda en la cantera representa ser una opción dentro de varias soluciones a la mitigación de la contaminación ambiental, esencialmente la torre es un dispositivo de control de contaminación del aire que servirá para remover el material particulado, puede atrapar gases ácidos resultantes de trituración con los efectos del trabajo a altas temperaturas, su principio es remover los contaminantes a través de la difusión, impacto, intercepción y absorción sobre pequeñas gotas de líquido, por lo que el líquido retiene al contaminante, pero a su vez es un recolector, la torre prevista para instalarse en la cantera podría mover partículas entre 0.2 y 10 micrómetros.

Es necesario acondicionar la torre de humedad idónea al volumen de producción que se genera en la cantera, la eficiencia de recolección de las torres de limpieza húmedas pueden variar conforme la distribución del tamaño de las partículas que se están captando, por lo que la eficiencia de control podría disminuir respecto al tamaño del materia particulado, otros factores que pueden hacer variar la eficiencia de la recolección incluyen emplear torre de limpieza por Venturi o torres de aspersion sencillas, los fabricantes de ambos

modelos difieren en porcentajes de eficiencia de recolección, pueden variar del 40 % al 60 %, lo relevante del uso de esta tecnología es la variación y disponibilidad que permite graduar el rango submicrométrico de la partícula que se estará captando.

La instalación de la torre estará condicionada por la distribución general de la cantera, se puede colocar a una distancia promedio de cinco metros de la trituradora, de ser necesario debe instalarse en base de cemento para otorgar mayor estabilidad al procesado de la limpieza, aunque no presente vibración u oscilación es necesario instalarla fijamente con pernos u otros elementos de fijación.

### **3.2.1. Ventajas**

La practicidad con la relación de los filtros de mangas es la principal ventaja, su tamaño compacto lo hace muy viable para instalarse en espacios que no estorben en la cantera, sus costos de mantenimiento pueden considerarse muy bajos porque solamente necesitan retirar sus filtros cada cierto periodo de tiempo, diferentes fabricantes establecen que son útiles con la remoción de material particulado, además agregan ciertas características sobre las ventajas provistas por dichos equipos.

- Poseen material higroscópico, este se considera como un material de absorción de agua.
- Captura partículas secas que suelen ser de difícil atrapamiento con otros equipos.
- Puede utilizarse con materiales corrosivos, combustibles y explosivos.

- El material particulado puede ser atrapado en corrientes de gases residuales con alto contenido de humedad.
- El material particulado reacciona fácilmente en presencia de gases solubles.

Las torres de limpieza húmedas tienen numerosas aplicaciones industriales, incluyendo calderas industriales, incineradores, procesadores de metales, producción de sustancias químicas, producción de asfalto y producción de fertilizantes.

### **3.2.2. Desventajas**

La principal desventaja que presentan las torres de limpieza es que la mayor eficiencia de control se logra a expensas de una mayor caída de presión a través del sistema (según información propia del fabricante). Existe un consumo elevado de agua por la evaporación, particularmente cuando el gas que está siendo limpiado se encuentra a alta temperatura.

Otra desventaja es que las temperaturas y razones de flujo de gas residual son más bajas que en los precipitadores electrostáticos o en los filtros de mangas. Los diseños actuales tienen razones de flujo de aire de más de 47 m<sup>3</sup> /s y temperaturas de hasta 400°C. Además, generan residuos en forma de lodo, el cual requiere tratamiento adicional. La mayor desventaja es por la probabilidad de crear corrosión, a menos que la humedad añadida sea removida de la corriente de gas.

### **3.3. Tipos de torres de limpieza húmedas**

Las torres que se pueden instalar en canteras, zonas de trituración, molinos de granos básicos, así como otros productos que pueden descargar partículas contaminantes al medio ambiente, deben ser evaluadas conforme las dimensiones del área de trabajo y conforme la capacidad de procesamiento de material particulado, para ello es necesario conocer cuatro principales que suelen encontrarse en canteras guatemaltecas o en otros países vecinos.

Es importante reconocer que la captación del material particulado con las torres de limpieza, y muy en especial las de tipo húmedo, necesitan material de aporte como fluidos o líquidos especiales que precipitarán dentro de una nube de condensación el material particulado, este a su vez caerá por el nuevo peso que posee hacia un tamiz o recolector, luego se traslada hacia tolvas de captación de la misma torre donde se conducirá hacia el área de desechos finales.

#### **3.3.1. Torres de aspersión**

Este tipo de torre es la de mayor simpleza por su configuración y uso de los aspersores, dentro de ella el aire cargado con material particulado ingresa a una cámara y hace contacto con el vapor de agua producido por boquillas de aspersión, la torre puede colocarse entre la trayectoria vertical o en la horizontal del flujo de gas residual. La aspersión del líquido puede dirigirse en contra del flujo del gas, en la misma dirección del flujo del gas, o perpendicular al flujo de gas.

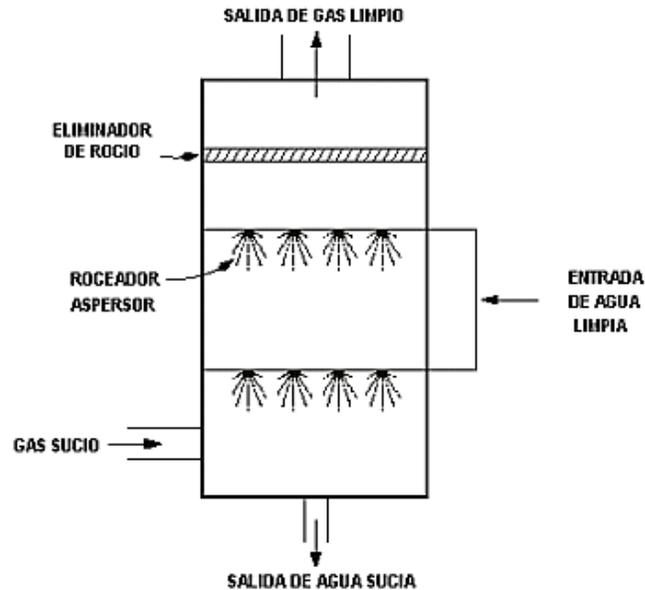
El flujo de gas entra al fondo de la torre y fluye hacia arriba. El agua es asperjada hacia abajo desde las boquillas montadas en las paredes de la torre

o montadas en un arreglo al centro de la torre. Las pequeñas gotas de agua capturan las partículas suspendidas en el flujo de gas por medio de impacto, intercepción y difusión. Las gotas lo suficientemente grandes para caer por gravedad se recolectan al fondo de la cámara. Las gotas que permanecen atrapadas en el flujo del gas son recolectadas en un eliminador de rocío corriente arriba de las boquillas.

Las torres de aspersión dependen principalmente de la recolección de partículas por impacto, presentan así eficiencias de recolección altas para material particulado grueso. Las eficiencias de remoción típicas para una torre de aspersión pueden ser tan altas como 90 % para partículas de más de 5  $\mu\text{m}$ . Las eficiencias de remoción para partículas de 3 a 5  $\mu\text{m}$  de diámetro varían de 60 a 80 %. Por debajo de 3  $\mu\text{m}$ , las eficiencias de remoción declinan a menos de 50 %. Las aplicaciones de las torres de aspersión incluyen el control de emisiones de MP de operaciones de molienda, operaciones con pigmentos y control de polvo en plantas de fertilizante. Las torres de aspersión también pueden ser empleadas para el control de MP en secadores de agregados en las plantas de asfalto.

**Figura 19.**

*Torre de aspersión*



*Nota.* Ejemplo del proceso de función de una torre de aspersión de partículas. Obtenido de E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 16). Universidad de Piura.

### **3.3.2. Torres de aspersión ciclónica**

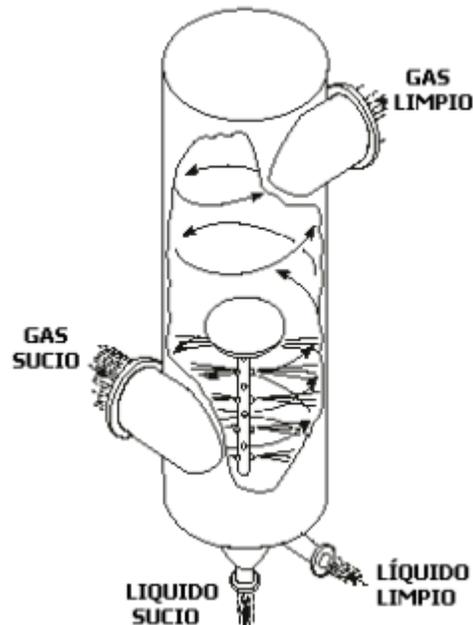
La torre de aspersión ciclónica difiere del diseño de la torre de aspersión en que la corriente del gas residual fluye a través de la cámara en un movimiento ciclónico. Su funcionamiento es similar al del ciclón, pero difieren en que, en la torre de aspersión ciclónica, existe un rociador. El movimiento ciclónico es producido al posicionar la entrada del gas tangencial a la pared de la cámara limpiadora o al colocar aspas giratorias dentro de la cámara de limpieza. La entrada del gas es ahusada, de manera que su velocidad aumenta a medida que entra en la torre. El líquido limpiador es rociado desde unas

boquillas en una tubería central (de entrada, tangencial) o desde la parte superior de la torre (aspas giratorias).

Las gotas de líquido atrapadas en la corriente de gas experimentan una fuerza centrífuga que resulta del movimiento rotatorio de la corriente de gas, causando que migren hacia las paredes de la torre. Las gotas se impactan contra la pared de la torre y caen al fondo de la misma. Las gotas que permanecen atrapadas en el gas residual pueden ser removidas con un eliminador de rocío.

**Figura 20.**

*Torre de limpieza de aspersión ciclónica*



*Nota.* Diferencia entre una torre de aspersión ciclónica y una torre de aspersión E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 17). Universidad de Piura.

### **3.3.3. Torres de limpieza dinámica**

También llamadas desintegradores o torres de limpieza asistidas mecánicamente. Son similares a las torres que poseen aspersores, pero además poseen un rotor que es impulsado por electricidad para cortar el líquido limpiador en gotas que salen finamente dispersas. El rotor se puede colocar fuera de la torre o en su parte interna, este se conecta por medio de un conducto, para remover el líquido es necesario utilizar un separador ciclónico extrayendo la mayoría del material particulado presente. En su mayoría suelen humidificar el gas residual los sistemas de limpieza, pero este modelo

especialmente puede utilizar el rotor para reducir la evaporación y de deposición de partículas al medio ambiente.

Este tipo de torre ha sido diseñada para remover con mayor eficiencia el material particulado, con la adición del rotor el sistema de limpieza puede incrementar los costos de mantenimiento, cuando se presenta material particulado grande puede ocasionar daños a los rotores, otra debilidad es la corriente de gas húmeda que puede corroer con mayor facilidad. Según especificaciones técnicas de un fabricante aleatorio, el consumo de electricidad puede variar desde 4 a 10 kW por 0.5 m<sup>3</sup>/s.

#### **3.3.4. Torres de limpieza de orificio**

En la torre de limpieza de orificio, también conocida como torre de limpieza por impacto, la corriente de gas fluye sobre la superficie de un líquido de limpieza. A medida que el gas se impacta sobre la superficie del agua, arrastra pequeñas gotas de líquido, el gas residual fluye hacia arriba y entra en un orificio con una abertura más angosta que la del conducto. El orificio induce turbulencia en el flujo, lo cual atomiza las gotas arrastradas.

Las gotas atomizadas capturan el material particulado de la corriente del gas. Una serie de deflectores remueven entonces a las gotas, las cuales caen en la superficie del líquido que está abajo. Algunas torres de limpieza de orificio tienen orificios ajustables para controlar la velocidad del gas. Las torres de limpieza de orificio pueden manejar razones de flujo de gas de hasta 1.42 m<sup>3</sup> /min y cargas de partículas de hasta 23 g/m<sup>3</sup> (10 granos por pie cúbico estándar). La ventaja principal de ese tipo de torres de limpieza es la eliminación de una bomba de recirculación para el líquido limpiador, la cual contribuye bastante a los costos operacionales en la mayoría de los diseños de

torres de limpieza. La desventaja principal es la dificultad de remover el lodo residual.

En la mayoría de los diseños de torres de limpieza, el residuo se descarga continuamente por el fondo de la torre. Las torres de limpieza de orificio emplean una superficie estática de líquido limpiador, de manera que el lodo residual es removido con un eyector de lodos, el que opera como una banda transportadora. El lodo se sedimenta en el eyector, el cual lo transporta hacia afuera de la torre de limpieza. Las torres de limpieza de orificio no se emplean ampliamente, pero se han utilizado en secadores, recipientes de cocción, operaciones de molienda y trituración, operaciones de recubrimientos (recubrimiento de píldoras, vidriado de cerámicas), ventilación (ventilación de silos, operaciones de descarga) y manejo de material (estaciones de transferencia, mezcla, descarga y empaque).

Ese tipo de torres de limpieza puede remover efectivamente material particulado de más de 2  $\mu\text{m}$  de diámetro, con eficiencias de control fluctuando del 80 % al 99 %. Aunque las torres de limpieza de orificio pueden ser diseñadas como unidades de alta energía, la mayoría son construidas para servicio de baja energía. Los costos de compra y los de operación y mantenimiento son significativamente más altos que los costos para torres de aspersión sencillas.

### **3.4. Filtros de mangas**

Es un colector de polvo que debe utilizar mangas o bolsas de tela para captar material particulado, su configuración de compartimentos aislados distribuidos en hileras de bolsas de tela y con tubos redondos colgados de forma vertical permiten optimizar el ángulo de ataque. El gas cargado de

partículas pasa generalmente a lo largo del área de las bolsas y luego radialmente a través de la tela. Las partículas son retenidas en la cara de las bolsas corriente arriba y el gas limpio es ventilado hacia la atmósfera. El filtro es operado cíclicamente, alternando entre periodos de filtrados relativamente largos y periodos cortos de limpieza. Durante la limpieza, el polvo que se ha acumulado sobre las bolsas de tela es removido del área de la tela y depositado en una tolva para su disposición posterior. El paso del aire a través del filtro se logra mediante el tiro inducido de un ventilador.

Según uno de varios fabricantes, el filtro de mangas puede recolectar partículas de tamaños desde las submicras hasta llegar a cientos de micras de diámetro, pero su eficiencia de atrapamiento puede llegar a ser el 99 % de la captación del material suspendido que se traslada entre los compartimentos, en la tela se va creando una capa de polvo, esa capa de no ser removida puede obstruir completamente los poros de las mangas. Algunos modelos pueden configurar la temperatura de gas hasta los 260 °C, otro aspecto que destaca por el fabricante es que la energía empleada para operar el sistema puede aparecer como caída de presión a través de las bolsas de tela y de los conductores asociados. Añade el fabricante que los valores típicos de las caídas de presión del sistema pueden variar desde los 1.25 kph hasta alcanzar los 5kPa.

Los filtros de mangas se utilizan donde se requiere alta demanda de recolección de partículas. Por las características del gas (la temperatura y la corrosividad) se pueden generar restricciones especiales y por las características de las partículas (principalmente la adhesividad) que afectan a la tela o a su operación y que no pueden ser tomadas en cuenta económicamente. Las variables importantes del proceso incluyen las características de la partícula, las características del gas y las propiedades de la tela. El parámetro de diseño más importante es la relación aire-tela o cantidad de gas en metros

cúbicos por minuto (o pies cúbicos por minuto) que penetra un metro cuadrado (o un pie cuadrado de tela) y el parámetro de operación de interés por lo general es la caída de presión a través del sistema de filtro.

La característica de operación principal de los filtros de mangas, que los distingue de otros filtros de gas, es la capacidad de renovar la superficie de filtración periódicamente por medio de limpiezas. Las bolsas filtrantes por lo general se construyen con telas tejidas o, más comúnmente, perforadas con aguja y cosidas en la forma deseada, montadas en una estructura y usadas en un amplio rango de concentraciones de polvo.

**Tabla 3.**

*Relación de aire-tela recomendada para diversos tipos de colectores de polvo*

| Tipo de limpieza del colector | Relación aire/tela |
|-------------------------------|--------------------|
|                               | En m <sup>2</sup>  |
| Aire inverso                  | 0.61 a 0.76        |
| Sacudido mecánico             | 0.76 a 0.91        |
| Plenum-pulse                  | 1.07 a 1.22        |
| <i>Jet pulse</i>              | 1.52 a 1.83        |

*Nota.* Ejemplo de característica de operación principal de los filtros de mangas, que los distingue de otros filtros de gas. Obtenido de E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 22). Universidad de Piura.

Los filtros de mangas pueden ser clasificados por varios medios, incluyendo el tipo de limpieza (por sacudido mecánico, aire a la inversa o chorro de aire comprimido), la dirección del flujo de gas (desde el interior de la bolsa hacia el exterior o viceversa), la localización del ventilador del sistema (de succión o de presión), o tamaño (cantidad baja, mediana o alta de flujo de gas).

De esos cuatro enfoques, el método de limpieza es probablemente la característica más distintiva.

### **3.4.1. Colectores de mangas con limpieza por sacudido mecánico**

Dentro del uso de colectores de manga y el uso de equipos mecánicos destaca el sacudido mecánico, por ser un método popular para realizar las tareas de limpieza con altos índices de eficiencia. Para cualquier tipo de limpieza debe impartirse a la tela la energía suficiente para superar las fuerzas de adhesión que sostienen el polvo a la bolsa. En la limpieza por sacudido mecánico, usada con flujo de gas del interior al exterior, la transferencia de energía se logra suspendiendo la bolsa de un gancho o una estructura que oscila, la cual es accionada por un motor.

El movimiento puede ser impartido a la bolsa de varias maneras, pero el efecto general es crear una onda sinusoidal a lo largo de la tela. A medida que la tela se mueve hacia afuera de la línea central de la bolsa durante la acción de la onda, el polvo acumulado sobre la superficie se mueve con la tela. Cuando la tela alcanza el límite de su extensión, las plastas de polvo poseen la inercia suficiente para desprenderse de la tela y descender hacia la tolva.

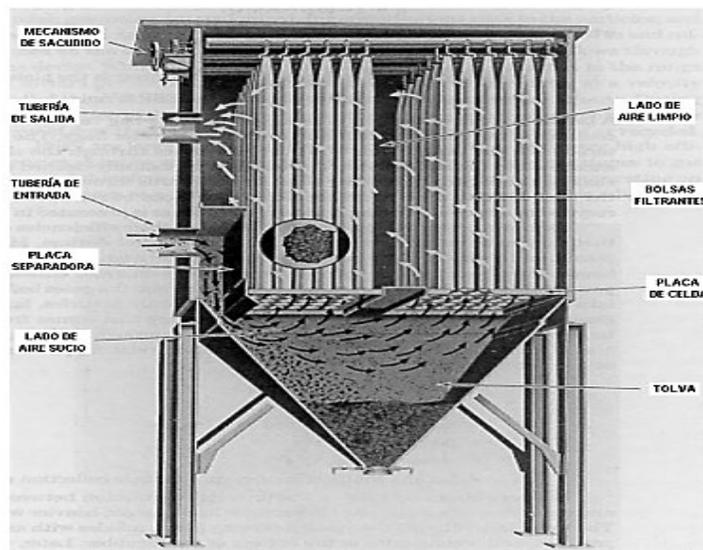
En filtros pequeños (menos de 14.2 m<sup>3</sup> /min) de un compartimiento, generalmente operados de manera intermitente, una palanca conectada al mecanismo de sacudido puede ser operada manualmente a intervalos apropiados, típicamente al final de una jornada de trabajo. En filtros con compartimientos múltiples, generalmente operados continuamente, un motor acoplado a un sistema de engranajes y yunques golpeadores acciona el

sistema de sacudido. Los compartimientos operan en secuencia de manera que se limpie un compartimiento a la vez.

El flujo de gas del compartimiento es interrumpido, permitiendo así el asentamiento del polvo, el flujo de gas residual cesa y el mecanismo de sacudido es encendido por varios segundos hasta un minuto o más (en promedio 30 segundos). Los periodos de asentamiento y sacudido pueden ser repetidos, y enseguida el compartimiento es restablecido en línea para la filtración. Como resultado de la ausencia de flujo a través del compartimiento, la superficie colectora del filtro debe ser incrementada para compensar la porción que se encuentre fuera de servicio para su limpieza.

### Figura 21.

*Funcionamiento del filtro de mangas con limpieza por sacudido mecánico*

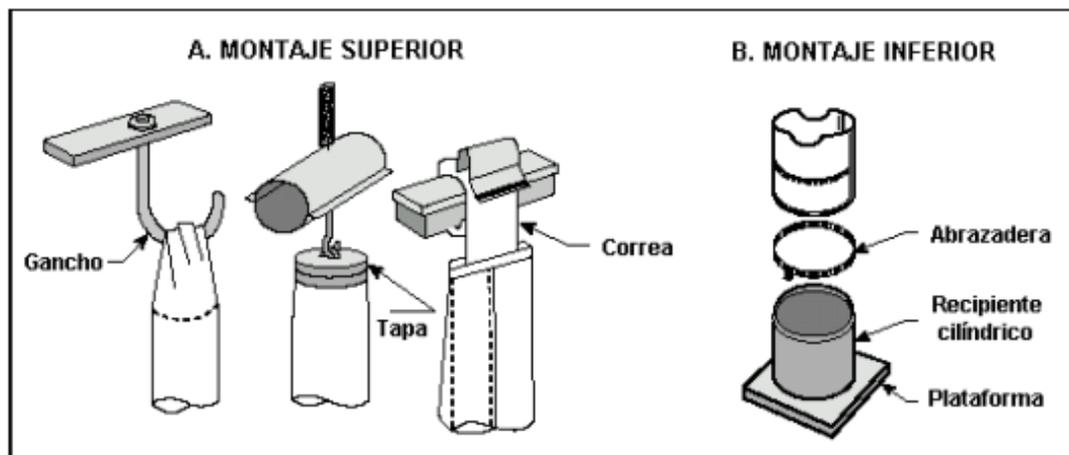


*Nota.* Ejemplo de funcionamiento del filtro de mangas con limpieza por sacudido mecánico. Obtenido de E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 36). Universidad de Piura.

Los parámetros que afectan a la limpieza mediante sistema de engranajes motores son la frecuencia del movimiento de sacudido y la tensión de la bolsa montada. Estos parámetros son parte del diseño del filtro, la composición del polvo, la concentración y la pérdida de presión, y por lo general no se cambian fácilmente. Los valores típicos son de alrededor de 4 Hz para la frecuencia. La tensión de las bolsas depende de cómo esté diseñado el tipo de montaje.

**Figura 22.**

*Montaje de las bolsas filtrantes*



*Nota.* Ejemplo de parámetros que afectan a la limpieza mediante sistema de engranajes motores son la frecuencia del movimiento de sacudido y la tensión de la bolsa montada. Obtenido de E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático*. (p. 24). Universidad de Piura.

En comparación con las bolsas limpiadas por aire a la inversa, la acción vigorosa de los sistemas de sacudido mecánico tiende a presionar más a las bolsas, lo cual requiere telas más pesadas y durables. Las telas tejidas son usadas casi exclusivamente para la limpieza por sacudido mecánico, aunque

también se permite el uso de telas afelpadas a velocidades de filtración un poco más altas. Estas velocidades más altas permiten la construcción de un filtro más pequeño, lo cual requiere menos inversión.

Sin embargo, las velocidades más altas conducen a caídas de presión más altas, aumentando así los costos de operación. Para cualquier aplicación determinada, existe un balance económico que con frecuencia debe ser descubierto estimando los costos para ambos tipos de tela. La limpieza por sacudido mecánico ha quedado obsoleta debido a que actualmente la mayoría de los filtros en funcionamiento son limpiados con chorro a pulso. Sin embargo, los aún existentes, continúan en servicio, aunque requieren de un mayor mantenimiento.

Cuando se requieren filtros de mayor tamaño que los chorros a pulso típicos, con frecuencia son unidades con aire a la inversa construidas a pedido. Los filtros de chorro pulsante se han vuelto populares porque ocupan menos espacio que los filtros con sacudido mecánico y son percibidos como menos caros. Para aplicaciones a temperaturas altas que utilizan bolsas de fibra de vidrio se puede esperar una vida más larga de las bolsas que la que sería encontrada con uno de sacudido mecánico.

#### **3.4.2. Colectores de mangas con limpieza por aire a la inversa**

En la limpieza por medio de aire a la inversa, el flujo de gas es interrumpido en el compartimiento que está siendo limpiado y un flujo inverso (de afuera hacia adentro) es dirigido a través de las bolsas. Ese revés del flujo de gas pliega la bolsa suavemente hacia sus líneas centrales, lo cual causa que la plasta se desprenda del área de tela. El desprendimiento es causado por

fuerzas tipo «tijera» desarrolladas entre el polvo y la manga a medida que esta última cambia su forma.

Las tapas metálicas en la parte superior de las bolsas son una parte integral de la bolsa, tanto como lo son varios anillos cosidos que rodean las mangas para prevenir su colapso durante la limpieza. Sin estos anillos, el polvo que cae y se acumula, y tiende a obstruir la bolsa a medida que la tela se pliega sobre sí misma mientras es limpiada, tal como con los filtros con sacudido mecánico con compartimientos múltiples. En los filtros con aire a la inversa ocurre un ciclo similar, que consiste de interrumpir el flujo de gas y permitir que el polvo se asiente antes de que empiece la acción limpiadora.

Tal como con los filtros con sacudido mecánico, se debe añadir una capacidad adicional de filtración a los filtros con aire a la inversa para compensar por la porción que se encuentre fuera de servicio por limpieza en cualquier tiempo. Algunos filtros con aire a la inversa emplean un sistema suplementario con agitación para ayudar a la limpieza aumentando la cantidad de energía suministrada a la bolsa.

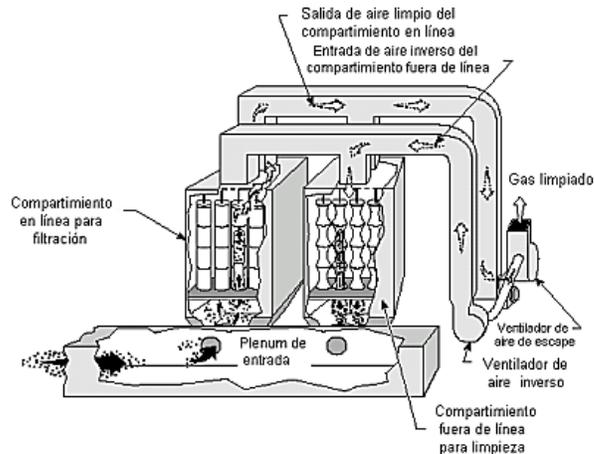
La fuente del aire inverso es, por lo general, un ventilador por separado (ventilador de aire inverso), que es capaz de suministrar aire limpio y seco para uno o dos compartimientos a una relación aire-tela tan alta o más alta que la del flujo de gas ocasionado por el ventilador de aire de escape.

En los filtros de aire inverso, el polvo es recolectado en el lado interior de las mangas. Las mangas son abiertas en el fondo y en la parte superior se sostienen mediante tapas metálicas. Las mangas son conectadas por medio de un resorte de tensión a una estructura de soporte.

La tensión en los resortes permite a las bolsas moverse suavemente durante la limpieza. La tensión puede ser ajustada para prevenir que las bolsas no sufran mucho durante limpieza y eventualmente no se desgasten. En el fondo, las bolsas encajan en un recipiente cilíndrico y son atadas mediante abrazaderas o correas.

**Figura 23.**

*Funcionamiento del filtro con limpieza con aire a la inversa*



*Nota.* Ejemplo de la tensión en los resortes permite a las bolsas moverse suavemente durante la limpieza. Obtenido de E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 26). Universidad de Piura.

### 3.4.3. Otros tipos de filtros de mangas

Debido a que la limpieza con aire inverso es un método de baja energía comparado con la limpieza con sacudido mecánico o con aire comprimido, se puede requerir energía adicional para obtener una remoción adecuada del polvo. El sacudido mecánico, tal como se describe con anterioridad, es una de

tales maneras de añadir energía. Los otros tipos de filtros de mangas están en función a otras maneras y diseños de añadir energía a la limpieza de las bolsas.

Los filtros de mangas con limpieza por vibración son parecidos a los de sacudido mecánico. Sin embargo, en la limpieza por vibración, las partes superiores de las bolsas están unidas a una placa, en vez de una serie de barras agitadoras tal como en la limpieza con sacudido mecánico. Para limpiar las bolsas, la placa es oscilada en una dirección horizontal a una alta frecuencia. Esto crea una rasgadura en las bolsas que desprende a la pasta del filtro.

La limpieza por vibración es la más efectiva para las partículas de tamaño mediano a grande con propiedades adhesivas débiles, por lo tanto, ese método de limpieza se limita a aplicaciones donde no se necesita la recolección de partículas finas. Los filtros de mangas de limpieza sónica se usan por lo general para asistir a otro método de limpieza, tal como la limpieza por aire a la inversa. Las bocinas sónicas se encuentran instaladas dentro de los compartimientos del filtro, en donde las bolsas son sacudidas periódicamente con energía sónica. La frecuencia y la amplitud de las ondas sonoras pueden ser ajustadas para maximizar el efecto para un polvo determinado.

El *shock* de la onda sonora causa que se forme una capa delimitadora en la pasta del filtro, esto permite que más partes de la pasta se desprendan durante la limpieza, y así mejora la eficiencia de limpieza. Más de la mitad de los filtros de aire inverso también utilizan bocinas sónicas, ya sea continua o intermitentemente. Las bocinas sónicas (de 1 a varias por compartimiento para filtros de mangas grandes) operan típicamente en el rango de 125 a 550 Hz (con mayor frecuencia en el rango de 125 a 160 Hz) y producen presiones de sonido de 120 a 140 decibeles.

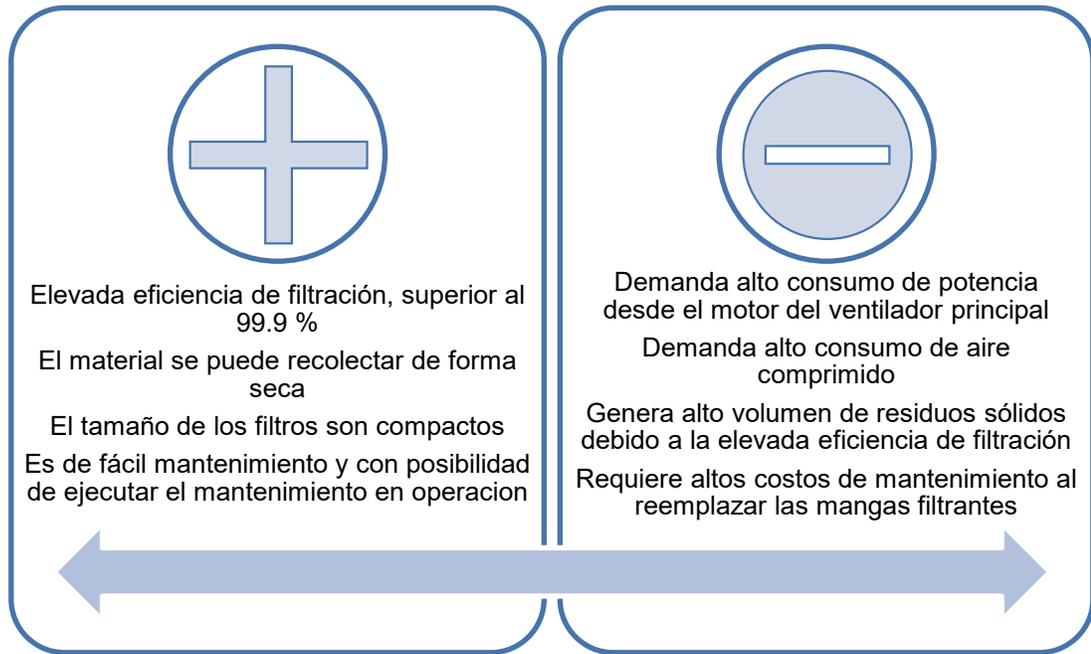
Cuando se aplica correctamente, la energía sónica puede reducir la masa de polvo sobre las bolsas de manera considerable, pero también puede conducir a un aumento en la penetración de polvo a través de la tela. La penetración aumentada reduce la eficiencia del filtro. Las bocinas sónicas son efectivas como equipo suplementario para algunas aplicaciones que requieren energía adicional para una limpieza adecuada. En ocasiones las bocinas sónicas son usadas como la única fuente de energía para la limpieza.

### **3.5. Colector de polvo de succión *jet pulse* con limpieza por chorro de aire comprimido**

Según fabricantes de este tipo de colectores, se obtienen mayores ventajas con estos en comparación con equipos de vibración, emplear aire comprimido y su limpieza por chorro insuflado permite utilizar filtros de menor dimensiones que utilizar otro tipo de tecnologías, por lo que la reducción del filtro de tela a instalar y el costo del equipo incrementan las ventajas en la cantera, al emplear mejor relación de aire-tela se mejoran los costos de operaciones y deja de ser necesario construir compartimientos adicionales para la limpieza de los equipos o de los filtros fuera de línea que puedan interrumpir la trituración de la piedra caliza.

**Figura 24.**

*Ventajas y desventajas de utilizar limpieza por aire comprimido*



*Nota.* Descripción de las ventajas y desventajas de los controles de materia particulada. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

El colector de polvo al emplear aire comprimido permite reducir la dispersión del material particulado al medio ambiente, de esa forma se desearía que en la cantera se reduzcan las descargas al medio ambiente y en su entorno, la propuesta requiere de inversión relativamente alta, las ventajas que se exponen permitirán trabajar con mayores índices de eficiencia y menores oportunidades de cierres de la cantera por el continuo asedio hacia las zonas adyacentes que pueden verse dañadas por el polvo de piedra caliza.

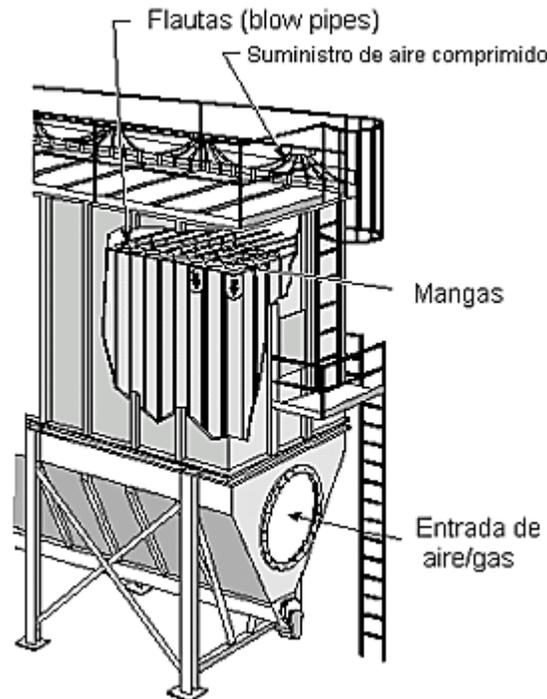
### **3.5.1. Funcionamiento**

El colector utiliza flujo de aire comprimido, este puede oscilar desde 414 kPa hasta 689 kPa, que estaría siendo 60 a 100 psi, con esa presión se fuerza al aire para descender a través de la bolsa y con ello se expanda violentamente, la tela alcanza su límite de extensión y el polvo se separa de la bolsa. Consiguientemente, el aire que ingresa dentro de la bolsa puede llevar el polvo separado del área de contacto de la bolsa. Con el filtro de chorro a presión el flujo de gas de filtración se opone a la dirección a la cual ingresa el material particulado.

El material particulado por la fuerza de presión y por la inyección del aire comprimido estará siendo comprimido hacia las paredes de las mangas, es por eso que el tamiz y el grosor de las mangas son otro principio de configuración especial, a mayores presiones de aire, pero con menor densidad de las mangas, pueden simplemente expandirse hasta romperse, pero la configuración de la presión sobre el tipo de manga permite atrapar ese 99.9 % de material particulado eficientemente, que luego de una jornada de trabajo se retiran las mangas para depositarse en contenedores de desechos especiales, evitando que se contamine el medio ambiente y la zona de trabajo. El suministro de aire comprimido es constante.

**Figura 25.**

*Filtro de manga con limpieza por aire comprimido (jet pulse)*



*Nota.* Ejemplo de funcionamiento de filtro con flujo de aire comprimido. Obtenido de K. Woodard. (1998). *Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias.* (p. 102). Timberlyne Center.

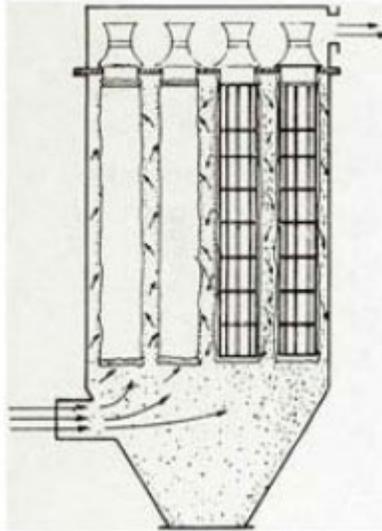
En los filtros de mangas de chorro pulsante, las bolsas son montadas sobre jaulas (o canastillas) de alambre para prevenir su colapso, mientras el gas polvoriento fluye desde el exterior de la bolsa al interior durante la filtración. En vez de unir ambos extremos de la bolsa a la estructura del filtro, en el ensamble de bolsa y canastilla, es por lo general fijada solo en la parte superior. La parte inferior del ensamble tiende a moverse en el flujo de gas turbulento durante la filtración y puede frotar con otras bolsas, lo cual acelera el desgaste.

Por diversos fabricantes se puede coincidir que los filtros de mangas no poseen divisiones en compartimiento, las bolsas pueden ser limpiadas desde su posición de fila en fila en un solo compartimiento, por si su sistema inicia la limpieza con un golpe de aire, este permite que la limpieza pueda generarse a través de una válvula de apertura rápida, puede utilizarse una válvula solenoide.

Posteriormente estará conectado un tubo a través de cada fila de bolsas que hará circular el aire comprimido, dicho tubo posee forma de flauta, posee una boquilla sobre cada bolsa de recolección para que el gas de limpieza pueda salir directamente hacia el interior de la bolsa. Por la continuidad y velocidad del flujo de aire puede depositar el polvo de piedra caliza sobre la bolsa, cuando una de estas bolsas se llena el flujo automáticamente se dirige hacia la siguiente y así continuamente, pero al llegar a un nivel máximo y de no retirar las bolsas, el excedente puede caer sobre la tolva y crearía escarcha de polvo.

## Figura 26.

*Bolsa en funcionamiento con flujo de chorro de aire comprimido*



*Nota.* Ejemplo de funcionamiento de las bolsas montadas sobre jaulas de alambre para prevenir su colapso mientras el gas polvoriento fluye desde el exterior de la bolsa al interior durante la filtración. Obtenido de K. Woodard. (1998). *Documento de Técnicas de Control de Materia Particulada Fina Proveniente de Fuentes Estacionarias*. (p. 103). Timberlyne Center.

### 3.5.2. Componentes

Se deberá disponer de equipo auxiliar interconectado al sistema de filtro de mangas, su configuración permite que esté contiguo al filtro de manga, ese conjunto de componentes estará compuesto por: tubería, campana de ventilación o dispositivo de captura, ventiladores, transportadores tipo tornillo para la remoción de polvo, medidores de presión, motores y chimenea.

Según sea el volumen de procesado y las dimensiones de la trituradora se puede necesitar cámaras de aspersion, recolectores mecánicos o puertos de aire de dilución para preacondicionar el gas antes de que llegue al filtro. La

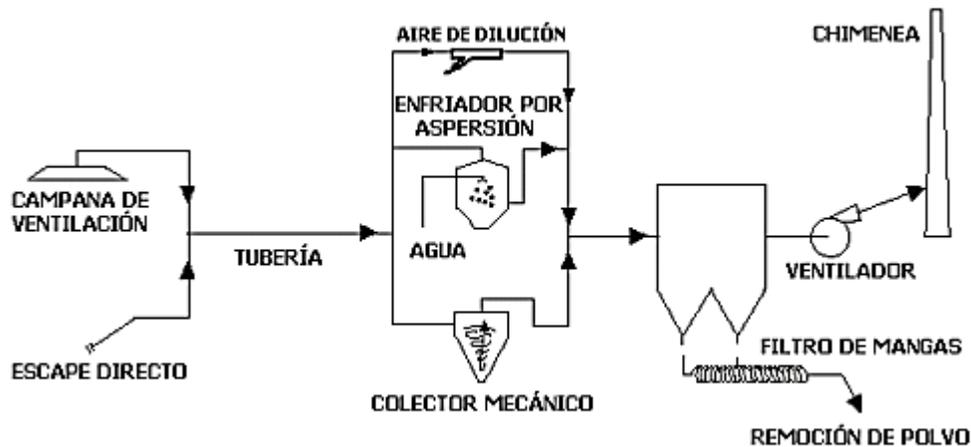
inclinación del terreno, las condiciones atmosféricas, así como otras variables pueden hacer más complejo el diseño. El dispositivo de captura será una campana de ventilación. La tubería será diseñada para contener y regular el flujo de la corriente de escape a medida que se mueva desde la fuente de emisiones hasta el filtro de mangas y la chimenea.

Las cámaras de aspersion y los puertos de aire de dilución disminuirán la temperatura de la corriente de contaminante para proteger al filtro de las temperaturas extremas, ya que se trabajará en condiciones críticas de medio ambiente y de altos valores de temperatura. Cuando alguna carga sustancial del cargamento de contaminante consiste de partículas relativamente grandes (mayores a 20  $\mu\text{m}$ ), se deberán utilizar recolectores mecánicos tales como los ciclones para reducir la carga sobre el filtro. Los ventiladores poseen la configuración de proporcionar potencia motora para el movimiento del aire y podrán ser montados antes del filtro, estos se denominan filtros a presión o después, esos se denominan filtros con succión.

Las chimeneas, al ser utilizadas, ventilarán aire limpio y gas limpio que formó parte durante el proceso de atrapamiento de partículas y que fue limpiado para ser lanzado hacia la atmósfera sin material particulado. Los transportadores de tornillo se emplearán con frecuencia para remover el polvo capturado del fondo de las tolvas por debajo del filtro de tela, de no lograr trasladar y remover todo el volumen procesado será necesario emplear de forma adicional el recolector mecánico.

**Figura 27.**

*Distribución del equipo auxiliar según diseño general*



*Nota.* Ejemplo de equipo auxiliar interconectado al sistema de filtro de mangas. Obtenido de E. Sandoval. (2008). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 50). Universidad de Piura.

Según la distribución del equipo auxiliar, se espera colocar de forma similar en la cantera. El diseño preliminar se ajusta a las necesidades encontradas, la configuración sería similar al diseño de la figura 27, en general se espera que las operaciones no sean interrumpidas, que sus mantenimientos puedan ser de fácil acceso para los mecánicos y que los equipos con mayor probabilidad de fallo puedan quedar con un acceso fácil, por lo demás se esperaría cumplir con los requerimientos básicos y funcionales para contener el material particulado.

### **3.5.3. Teoría de filtración por tela**

Expone Sandoval (2018) que antes de diseñar un filtro de mangas se deberá conocer la velocidad superficial que producirá el equilibrio óptimo entre

la caída de presión y el tamaño del filtro, por lo que el costo de operación puede incrementar si la caída de presión incrementa, y el costo del equipo puede disminuir según la medida a utilizar si el tamaño del filtro se reduce. Por eso el tamaño del filtro es determinante, se reducirá proporcionalmente al valor de la velocidad superficial y con base en eso se origina otro principio denominado relación aire-tela.

Las relaciones aire-tela más altas causan mayores caídas de presión. Los principales factores que afectan la relación aire-tela incluyen las características de las partículas y de las telas, y la temperatura del gas. Un filtro diseñado adecuadamente y operado correctamente tendrá una eficiencia de recolección de MP extremadamente alta (de 99.9 %), los filtros de mangas son particularmente efectivos para recolectar partículas pequeñas. Debido a que se supone una alta eficiencia, el proceso de diseño se enfoca sobre la caída de presión.

Extiende así Sandoval (2018) que la caída de presión ocurrirá desde donde se origina el flujo de aire y que fluye a través de los conductos de entrada y salida, a lo que se le nombró flauta con salidas, por lo que el flujo de aire se dirigirá en diversas regiones de la tolva hacia generar mayor flujo a través de las bolsas. La caída de presión a través de la estructura del filtro (excluyendo la caída de presión a través de las bolsas) depende del diseño del filtro y varía entre 0.25 a 0.5 kPa (25 a 50 milímetros de columna de H<sub>2</sub>O) en diseños convencionales y hasta alrededor de 0.75 kPa (76 milímetros de columna de H<sub>2</sub>O) en diseños que tienen trayectorias complicadas de flujo de gas.

Dicha pérdida puede ser sostenida a un mínimo de 0.25 kPa o 25 milímetros de columna de H<sub>2</sub>O a menos. La caída de presión a través de las

bolsas (llamada también caída de presión de lámina-tubo) puede ser tan alta como de 2.5 kPa (250 milímetros de columna de H<sub>2</sub>O) o más. La caída de presión de lámina-tubo es una función compleja de las propiedades físicas del polvo y de la tela y de la manera en que el filtro es diseñado y operado. Las pérdidas en el conducto y en la tolva para una configuración específica son constantes y pueden ser minimizadas efectivamente cambiando la configuración a través de un diseño apropiado basado en el conocimiento del flujo a través del filtro.

Posteriormente, se reconoce que la filtración con el uso de tela puede ser un proceso adaptado para operaciones continuas, su principio básico es que el filtro opere de forma continua al recolectar polvo o cualquiera de sus similitudes, esto con el uso de bolsas que pueden ser removidas periódicamente. Aquellos denominados filtros mecánicos y que emplean aire a la inversa deberán utilizar bolsas de tela tejida, pueden operar a velocidades superficiales relativamente bajas, y emplean la filtración para captar la mayor concentración de partículas.

A diferencia de los filtros *jet pulse* que emplean telas no tejidas o fieltros, operan con relación alta de aire-tela, demandan el doble de la relación de los filtros que utilizan filtros con sacudido mecánico o con aire a la inversa, los fieltros son clave en el proceso de filtración, la mayor ventaja de utilizar los fieltros es que evitan la acumulación tipo plasta en sus paredes, por lo que el material particulado y partículas flotantes que son atrapadas en ellas pueden ser depositadas automáticamente en las bolsas de recolección. Los fieltros pueden cumplir con cierto tiempo efectivo de vida, al retirarse, sacudirse y limpiarse podrían generar que su tamiz pierda la configuración inicial, dejando pasar partículas de menores dimensiones que las que fueron captadas durante el primer ciclo de recolección.

Finalmente, las propiedades eléctricas de la tela, tales como la resistividad y el orden triboeléctrico, que establecen la posición de la tela como altamente electropositiva a altamente electronegativa, pueden ser medidas para ayudar en la selección de la tela. Aunque sus efectos son entendidos deficientemente, los efectos eléctricos o electrostáticos influyen en la porosidad del material particulado captado y la adhesión de las partículas a las telas o a otras partículas. El conocimiento de los efectos puede conducir a la selección de telas que interactúan favorablemente respecto a la recolección de polvo y la limpieza.

#### **3.5.4. Diseño de un filtro**

Es necesario establecer la relación aire-tela, ya que es la cantidad de gas filtrado por unidad de superficie. Se puede emplear la relación de air-tela según el método del fabricante, y posteriormente en la cantera se puede realizar los ajustes necesarios conforme el valor del grano que se está triturando y el valor esperado del material particulado que pueda ser atrapado por la tela, por lo que será necesario emplear la siguiente tabla que posee la distribución general por tipo de polvo, si es necesario emplear aire a la inversa y si se emplea filtro *jet pulse* con tela de felpa. Esos datos son extraídos de una investigación similar a la planteada.

**Tabla 4.**

*Factor para calcular la superficie de tela en grueso a parte del área neta de tela*

| Factor de multiplicación |                     |  |
|--------------------------|---------------------|--|
| Superficie neta de tela  |                     | Para obtener la superficie de tela en grosor |
| Pies cuadrados           | Metros cuadrados    | Pies o metros cuadrados                      |
| 1 – 4000                 | 0.09 – 371.61       | Multiplicar por 2.00                         |
| 4001 – 12000             | 361.71 – 1114.84    | Multiplicar por 1.50                         |
| 12001 – 24000            | 1114.93 – 2229.67   | Multiplicar por 1.25                         |
| 24001 – 36000            | 2229.77 – 3344.51   | Multiplicar por 1.17                         |
| 36001 – 48000            | 3344.60 – 4459.35   | Multiplicar por 1.13                         |
| 48001 – 60000            | 4459.44 – 5574.18   | Multiplicar por 1.11                         |
| 60001 – 72000            | 5574.28 – 6689.02   | Multiplicar por 1.10                         |
| 72001 – 84000            | 6689.11 – 7803.86   | Multiplicar por 1.09                         |
| 84001 – 96000            | 7803.95 – 8918.69   | Multiplicar por 1.08                         |
| 96001 – 108000           | 8918.78 – 10033.53  | Multiplicar por 1.07                         |
| 108001 – 132000          | 10033.62 – 12263.20 | Multiplicar por 1.06                         |
| 132001 – 180000          | 12269.29 – 16722.55 | Multiplicar por 1.05                         |
| Más de 180001            | Más de 16772.64     | Multiplicar por 1.04                         |

*Nota.* Presentación de la distribución general por tipo de polvo. Obtenido de E. Sandoval. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 45). Universidad de Piura.

Para emplear el factor de multiplicación es necesario delimitar el área del diseño que será empleado, según la proporción de la trituradora que posee la cantera se utilizará el rango en metros cuadrados de 3,3344.60 – 4,459.35, los metros cuadrados que se utilizarán son 4,000, por lo que se multiplicará por 1.13, siendo el área neta total de tela de 5,200 metros cuadrados para el diseño a instalarse.

**Tabla 5.**

*Factores para relaciones de aire-tela filtros jet pulse*

| A factor del material   |                                      |                                 |                                   |  |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1.5                     | 1.2                                  | 1.0                             | 9.0                               | 6.0  |
| Mezcla de arcillas      | Asbesto                              | Alúmina, aspirina               | Fertilizante de fosfato de amonio | Carbón activado  |
| Polvo de cartón         | Polvo para pulido                    | Carbón negro                    | Cumulo de polvo                   | Carbón negro (molecular)   |
| Cacao                   | Material fibroso y celulósico        | Cemento                         | Diatomáceas                       | Detergentes  |
| Alimentos               | Residuo del agitado en fundiciones   | Pigmentos de cerámica           | Petroquímicos secos               | Humos y otros productos dispersados directamente de las reacciones |
| Harina                  | Yeso                                 | Polvos de arcilla y de ladrillo | Tintas                            |  |
| Grano                   | Cal (hidratada)                      | Carbón                          | Ceniza flotante                   |  |
| Polvo de cuero          | Perlita                              | Fluorita                        | Polvo metálico                    | Leche en polvo   |
| Aserrín                 | Químicos del hule                    | Goma natural                    | Óxidos metálicos y sintéticos     | Jabón  |
| Tabaco                  | Arena                                | Caolina                         | Plásticos                         |  |
|                         | Polvo de soplado de arena            | Piedra caliza                   | Resinas                           |  |
|                         | Carbonato de sodio                   | Percloratos                     | Silicatos                         |  |
|                         | Sal                                  | Polvo de roca y de minerales    | Almidón, estearatos               |  |
|                         | Talco                                | Silice                          | Acido tánico                      |  |
|                         |                                      | Azúcar                          |                                   |  |
|                         |                                      | Ácido sórbico                   |                                   |  |
| b. factor de aplicación |                                      |                                 |                                   |  |
|                         | Ventilación de emisiones molestas    |                                 |                                   | 1.0  |
|                         | Recolección de producto, ventilación |                                 |                                   | 0.9  |
|                         | Filtración del gas de proceso        |                                 |                                   | 0.8  |

*Nota.* Delimitación del área del diseño que será empleado. Obtenido de E. Sandoval. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 60). Universidad de Piura.

Luego, será necesario calcular la relación de aire-tela para filtro *jet pulse*, para ello se utilizará la siguiente ecuación que requiere los valores de tablas como el factor del material, el factor de aplicación, la temperatura y la carga de polvo.

Ecuación 1 para el cálculo de relación aire-tela:

$$V = 2.878. A. B. T^{-0.2335}. L^{-0.06021}. (0.7471 + 0.0853. \ln(D))$$

En donde:

V: relación aire-tela (pies/minuto)

A: factor del material de tabla 6

B: factor de aplicación de tabla 6

T: temperatura (de 50 a 275 grados Fahrenheit)

L: carga de polvo de entrada (gramos/pie cúbico) de 0.05 y 100.

D: diámetro promedio de la partícula (micras) (entre 3 y 100)

Al sustituir valores en ecuación 1:

$$V = 2.878. (1). (0.8). 95^{-0.2335}. 50^{-0.06021}. (0.7471 + 0.0853. \ln(3))$$

$$V = 0.51 \frac{\text{pies}}{\text{minuto}}$$

Por lo que la tela podrá retener 0.51 pies de material particulado por cada minuto que está en funcionamiento la trituradora, con estos valores la cantera ya puede diseñar la manga del filtro según el grosor de la tela y el área cuadrada necesaria que permita retener la contaminación que ha estado siendo

expuesta al medio ambiente. Será necesario que las mangas y la tela cumplan con las restricciones de las tablas empleadas para que sus resultados sean eficientes.

### 3.5.4.1. Relación aire-tela de aplicaciones similares

Para este aspecto es necesario apoyarse en una nueva tabla de valores preestablecidos que, por aporte de diferentes diseños, pueden emplearse de forma práctica y directa sin la necesidad de realizar los cálculos numéricos, pero trabajar con unidades estandarizadas podría generar mayores complicaciones y menores resultados positivos.

**Tabla 6.**

*Relación aire-tela para diferentes combinaciones de filtros y telas predefinidos*

| Tipo de polvo      | Sacudido mecánico con tela tejida y aplicando aire a la inversa |                       | Utilizando filtro <i>jet pulse</i> con tela de felpa y aplicando aire a la inversa |                       |
|--------------------|---|-----------------------|--|-----------------------|
|                    | Sistema inglés  | Sistema internacional | Sistema inglés   | Sistema internacional |
| Oxido de aluminio  | 2.5   | 0.7620                | 8  | 2.4384                |
| Asbesto            | 3.0   | 0.9144                | 10   | 3.0480                |
| Bauxita            | 2.5   | 0.7620                | 8  | 2.4384                |
| Carbón negro       | 1.5   | 0.4572                | 5  | 1.5240                |
| Carbón             | 2.5   | 0.7620                | 8  | 2.4348                |
| Cacao, chocolate   | 2.8   | 0.8534                | 12   | 3.6576                |
| Arcilla            | 2.5   | 0.7620                | 9  | 2.7432                |
| Cemento            | 2.0   | 0.6096                | 8  | 2.4384                |
| Cosméticos         | 1.5   | 0.4572                | 10   | 3.0480                |
| Residuo de esmalte | 2.5   | 0.7620                | 9  | 2.7432                |
| Semillas, granos   | 3.5   | 1.0668                | 14   | 2.4384                |
| Feldespatos        | 2.2   | 0.6706                | 9  | 3.0480                |
| Fertilizante       | 3.0   | 0.9144                | 8  | 2.7432                |
| Harina             | 3.0   | 0.9144                | 12   | 4.2672                |
| Ceniza flotante    | 2.5   | 0.7620                | 5  | 2.7432                |
| Grafito            | 2.0   | 0.6096                | 5  | 1.5240                |
| Yeso               | 2.0   | 0.6096                | 10   | 1.5240                |

Continuación de la tabla 6.

|                      |    |     |        |    |        |
|----------------------|----|-----|--------|----|--------|
| Mineral de hierro    | de | 3.0 | 0.9144 | 11 | 3.3528 |
| Oxido férrico        |    | 2.5 | 0.7620 | 7  | 2.1336 |
| Oxido de plomo       |    | 2.0 | 0.6096 | 6  | 1.8288 |
| Polvo de cuero       |    | 3.5 | 1.0668 | 12 | 3.6576 |
| Cal                  |    | 2.5 | 0.7620 | 10 | 3.0480 |
| Piedra caliza        |    | 2.7 | 0.8230 | 8  | 2.4384 |
| Mica                 |    | 2.7 | 0.8230 | 9  | 2.7432 |
| Pigmentos de pintura | de | 2.5 | 0.7620 | 7  | 2.1336 |
| Papel                |    | 3.5 | 1.0668 | 10 | 3.0480 |
| Plásticos            |    | 2.5 | 0.7620 | 7  | 2.1336 |
| Cuarzo               |    | 2.8 | 0.8534 | 9  | 2.7432 |

*Nota.* Tabla de valores preestablecidos. Obtenido de E. Sandoval. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 44). Universidad de Piura.

Con base en la tabla anterior se podría emplear la configuración para cal y para piedra caliza, la columna que establece las medidas recomendadas para tela de felpa para filtros *jet pulse* muestra un valor aproximado de 3.0480 metros por segundo, ya que se encuentra en sistema internacional, esa relación establece que 3 metros de material particulado generan contaminación al medio ambiente, esto estará siendo detenido por las felpas por cada segundo

Al evaluar esos valores se ve claramente que el compromiso de la cantera por detener el trabajo a cielo abierto es una acción considerablemente necesaria, los filtros, las mangas y la distribución de los equipos permitirán que el trabajo pueda continuar bajo el mismo ritmo de producción, pero será necesario acondicionar más operarios o agendar nuevas tareas a los operarios existentes para supervisar que los filtros no alcancen su nivel máximo de acumulación.

### 3.5.4.2. Relación aire-tela según el tipo de operación

Nuevamente se debe hacer uso de una tabla de valores que suponen ciertas actividades y cierto volumen de descarga al medio ambiente de distintos procesos. Estos valores han sido construidos por distintos fabricantes de filtros, ya sea por vibración o por inyección de aire o gas a presión, lo importante de la tabla es la guía que sirve a la cantera para basarse en otro supuesto que permita mejorar su diseño de filtros según el material particulado que se pueda estar procesando. Aunque el proyecto en general es sobre piedra caliza, podría darse la explotación de un segundo mineral.

**Tabla 7.**

*Consideraciones en la selección de la relación de aire a tela para el diseño de colectores de polvo para filtros jet pulse*

| Proceso o aplicación  | Concentración de polvo (g/m <sup>2</sup> ) | Relación de aire/tela típica (m <sup>3</sup> /min/m <sup>2</sup> ) | Temperatura de operación típica (°C) | Textiles recomendados                               |
|---|--|--|--------------------------------------|---|
| En hornos de cemento con molinos de crudo en serie                            | 60 a 80                                    | De 1.06 gruesa y 1.22 neta.  | Máxima y continua de 260°C           | Fibra de vidrio y P84                               |
| En enfriadores de Clinker   | 25 a 30                                    | De 1.22 gruesa y 1.37 neta.  | Máxima de 204°C                      | Nómex   |
| Para ventilación de molinos de cemento y separadores de alta eficiencia       | 400 a 600                                  | De 1.06 gruesa y 1.22 neta.  | Máxima de 110°C                      | Poliéster o bien acrílico dependiendo de la humedad |
| En molinos de martillo con tamaño de partícula de 2 a 5 mm                    | De 15 a 20                                 | 1.82   | Máxima de 60°C                       | Poliéster o bien acrílico                           |
| En molinos de martillo de alta velocidad con tamaño de partícula menos a 2 mm | De 20 a 40                                 | 1.52   | Máxima de 80°C                       | Poliéster o bien acrílico                           |
| En molinos de carbón con secado del material                                  | De 100 a 120                               | 1.22   | Variable de acuerdo a la aplicación  | Poliéster o acrílico                                |
| Venteo de transportes neumáticos de fase densa                                | De 150 a 200                               | 1.22   | Máxima de 100°C                      | Poliéster   |

### Continuación de la tabla 7.

|  |             |      |                                     |                                  |
|--|-------------|------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Separadores mecánicos  | De 80 a 120 | 1.52 | Variable                            | Poliéster                        |
| Ventilación de equipos auxiliares                              | De 20 a 30  | 1.82 | Máxima de 60°C                      | Poliéster                        |
| En ventilación de trituradores de cono o quijada               | De 5 a 15   | 1.82 | Máxima de 100°C                     | Poliéster                        |
| Cribas vibratorias   | De 15 a 20  | 1.82 | Máxima de 100°C                     | Poliéster                        |
| Tolvas   | De 15 a 20  | 1.82 | Variable                            | Poliéster                        |
| Secadores de materiales de tipo tambor                         | De 50 a 250 | 1.22 | Variable de acuerdo a la aplicación | Membrana de teflón               |
| En ventilación (presurización de cuartos eléctricos y motores) | De 0.05     | 2.13 | Máxima de 40°C                      | Poliéster con membrana de Teflón |
| En ventilación de cargas a granel de cemento o Clinker         | De 40 a 60  | 1.82 | Máxima de 100°C                     | Poliéster                        |

*Nota.* Tabla de valores con actividades y volumen de descarga al medio ambiente de distintos procesos. Obtenido de E. Sandoval. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 61). Universidad de Piura.

Según la tabla anterior, y por el tipo de operación, sería recomendable utilizar material para los filtros de tipo poliéster para configuración de concentración de polvo de 5 a 15 g/m<sup>2</sup> y relación aire-tela de 1.82 m<sup>3</sup>/minutos.

### 3.6. Forma y características de diseño de equipos

La forma final del equipo estará en discusión y esperará aprobación de las autoridades de la cantera, el diseño final requiere la colaboración del fabricante, quien realizará las visitas necesarias a la cantera para evaluar la forma de cómo acondicionar los equipos, las tuberías y los instrumentos necesarios para generar el aire a presión que deberá ser insuflado a los filtros.

De igual forma con el diseño de los equipos, es necesario conocer mayores datos específicos que poseen en la cantera, la relación del material de

aporte que está siendo ingresado a la trituradora versus el material final procesado, todos esos datos permitirán que el diseño final permita acondicionar los equipos nuevos sobre las operaciones que ya se realizan, pero se desconocen. Los fabricantes poseen programas de computación especialmente para ese tipo de diseños, donde se ingresan variables de temperatura ambiente, condiciones atmosféricas, tipo de región donde estará el proyecto, entre otros aspectos de la naturaleza que pueden afectar directamente o no la forma de cómo construir los equipos.

Las características finales deben ser robustas, con materiales resistentes al calor, resistentes a la exposición a luz solar por largos periodos de tiempo desde que se instalen hasta que sean removidos o renovados, además, que podría mejorar la forma en que está expuesto el equipo con relación a la distribución de la cantera y con relación a los accesos de los bancos de desechos finales para que la distancia sea corta y la ruta sin obstáculos.

### **3.6.1. Cajas a presión**

La localización del filtro con respecto al ventilador en la corriente de gas afecta al costo del equipo, por lo que un filtro tipo succión, con un ventilador tipo aspirador, localizado corriente abajo de la unidad, debe tolerar presiones negativas altas y por lo tanto debe estar construido más pesado y reforzado que un ventilador tipo impulsor localizado corriente arriba del filtro a presión. La presión negativa en filtros por succión puede resultar en condensación, corrosión, o aún explosiones si se están manejando gases combustibles.

En el caso de gases tóxicos, esa fuga hacia adentro puede tener una ventaja sobre filtros del tipo a presión, en donde las fugas son hacia afuera. La ventaja principal del filtro con succión es que el ventilador se localiza en el lado

de gas limpio del filtro. Eso reduce el desgaste y la abrasión en el ventilador y permite el uso de ventiladores más eficientes empleando el diseño de aspa con curva hacia atrás. Sin embargo, debido a que para algunos diseños los gases de escape provenientes de cada compartimiento se combinan en un único compartimiento múltiple de salida al ventilador, los compartimientos con bolsas con fugas disminuyen la eficiencia de filtración y elevan los costos de mantenimiento.

Los filtros del tipo a presión deben tolerar la presión diferencial a través de la tela. En algunos diseños el filtro no tiene caja externa. El mantenimiento también se reduce porque se puede entrar a los compartimientos y observar las bolsas con fugas mientras el compartimiento se encuentra en servicio. Con un filtro a presión, la caja actúa como la chimenea para contener los humos. Esa configuración hace a las bolsas con fugas más fáciles de localizar. La desventaja principal del filtro del tipo a presión es que el ventilador se encuentra expuesto a los gases contaminados, por lo tanto, la abrasión y el desgaste de las aspas del ventilador pueden volverse un problema.

### **3.6.2. Construcción estándar o por pedido**

Según Sandoval (2018), el diseño y la construcción de los filtros se separan en dos grupos: estándar y por pedido. Además, los filtros estándares se separan en categorías de tamaño de baja, mediana y alta capacidad. Los filtros estándares son prediseñados y construidos en la fábrica como unidades completas en serie que son ensambladas en el taller y dotados de bolsas para unidades de baja capacidad (menos de  $30 \text{ m}^3 / \text{min} - 1,000$  por minuto de producto).

Las unidades de mediana capacidad (30 a 2,800 m<sup>3</sup> /min) tienen diseños estándares, son ensamblados en el taller, pueden ser o no dotadas de bolsas, y poseen compartimientos de bolsas separados y secciones de tolvas. Uno de los tipos de filtros de alta capacidad es el módulo enviable (1,400 a 2,800 m<sup>3</sup> /min), el cual requiere solo un ensamble moderado en el campo. Estos módulos pueden tener bolsas instaladas. Pueden ser operados de manera sencilla o combinados para aplicaciones de mayor capacidad.

Debido a que son preensamblados, requieren menos trabajo de campo, los filtros fabricados a pedido, considerados también como de alta capacidad, pero por lo general de 2,800 m<sup>3</sup> /min o mayores, son diseñados para aplicaciones específicas y generalmente son construidos según las especificaciones prescritas por el cliente. Generalmente, estas unidades son mucho más grandes que los filtros estándares.

El costo del filtro por pedido es mucho más alto por metro cuadrado de tela, porque no es un artículo en existencia y requiere arreglos especiales para su manufactura y mano de obra de campo costosa para su ensamble a su llegada. Las ventajas del filtro a pedido son muchas y por lo general se dirigen hacia la facilidad de mantenimiento, la accesibilidad, y otras preferencias del cliente. En algunos filtros estándares, un juego completo de bolsas debe ser reemplazado en un compartimiento a la vez debido a la dificultad en localizar y reemplazar bolsas individuales con fugas, mientras que, en el caso de los filtros por pedido, las bolsas individuales se encuentran accesibles y pueden ser reemplazadas una por una a medida que se desarrollen las fugas.

### **3.7. Mantenimiento y resultados**

Las tareas diarias preventivas sobre el monitoreo del exceso de acumulación de material particulado tienen carácter principal, así como lo describe el fabricante del conjunto de equipos periféricos y, conforme al diseño de las mangas donde la tela atraparé el polvo de cal, se podrán retirar las bolsas que presenten mayor acumulación durante la jornada de trabajo, la tela podría necesitar que sea sacudida con algún instrumento de madera o con cerdas para prevenir que se forme alguna escarcha o costra y mediante eso se obstruya el tamiz.

Las bolsas que se retiran con su volumen máximo de atrapamiento de material particulado deberán ser vaciadas en un nuevo contenedor para que ese desperdicio se pueda vender con empresas que lo emplean para fabricar productos químicos o herbicidas, el mantenimiento consistirá en prevenir que la trituradora se detenga por fallas en la tubería que inyecta el aire a presión. Otro aspecto importante del mantenimiento preventivo es el hecho de disponer de aquellos insumos necesarios para el próximo servicio completo a los equipos.

#### **3.7.1. Sistema de limpieza**

El sistema de limpieza en filtro *jet pulse* emplea el mismo aire comprimido para mantener en todo momento limpias las mangas, por medio de un tanque de aire comprimido que está conectado a una válvula de diafragma hace expulsar aire extra hacia la flauta de aspersion, en cada una de las boquillas sale el aire que es empleado para limpiar las mangas, para controlar las variaciones de esa limpieza se controla con una válvula tipo solenoide, a eso se le sumará un medidor llamado *photohelic*, el cual controlará la suspensión del ciclo de limpieza y el inicio conforme la carga de material

particulado sea procesado, el ajuste se deberá realizar de 1.12 kPa y 1 kPa que es un equivalente a 113 y 100 milímetros de columna de H<sup>2</sup>O.

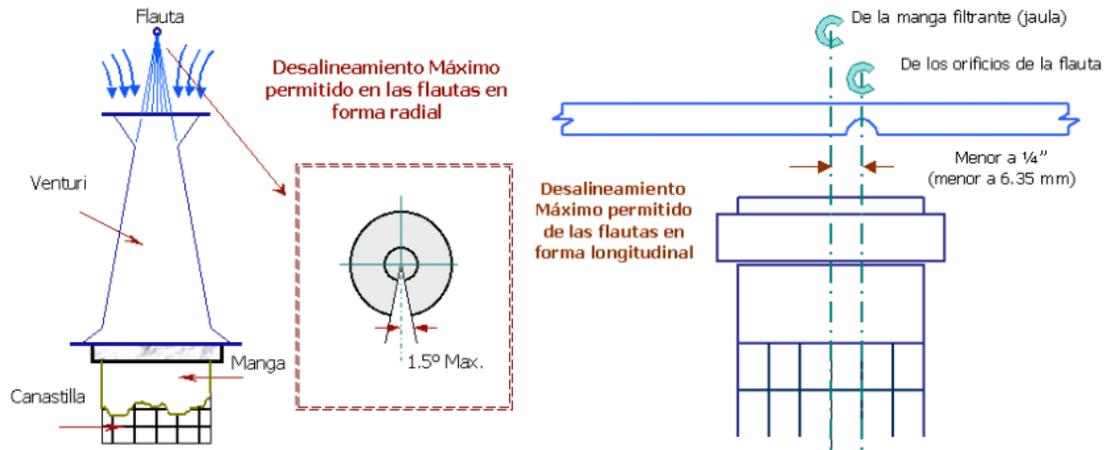
Adicionalmente será necesario colocar un Venturi, que según información del fabricante deberá instalarse en la parte superior de la manga, su función es encauzar el flujo de aire comprimido hacia el centro de la manga, con ello se puede incrementar el efecto de limpieza, el Venturi es de acero dulce o de aluminio. La instalación, configuración y ejecución deben ser cuidadosas, ya que algunos instrumentos Venturi antiguos son frágiles y pueden mostrar desgaste, también pueden provocar abrasión en las mangas.

Con el mal alineamiento de las flautas se podría atacar el Venturi por la mala dirección del aire que se está expulsando, por ello se deberá alinear perfectamente para que dicha presión o corriente de aire ese dirigida hacia el centro de la manga, de persistir el error de instalación se puede crear un agujero en el metal y dañar la manga, con ello se generaría una nueva fuga de material particulado al medio ambiente y se perdería el sentido de la instalación de los equipos.

Es necesario evitar la mala alineación entre la flauta y el Venturi para que existan fugas por sus lados, con la mala configuración el aire comprimido destinado a la limpieza de la bolsa filtrante puede escapar por las uniones, un efecto dominó de la mala limpieza por la mala instalación es que la bolsa que contendrá el material particulado que se está recuperando puede generar bajas en la eficiencia de filtración. El fabricante establece que entre el orificio de la flauta y el Venturi deberá presentarse un ángulo máximo de separación de 1.5°.

**Figura 28.**

*Puntos críticos de desalineamiento a evitar para obtener resultados eficientes en la limpieza de los filtros*



*Nota.* Ejemplo de cómo evitar la mala alineación entre la flauta y el Venturi para que no existan fugas por sus lados. Obtenido de E. Sandoval. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 65). Universidad de Piura.

Otro punto crítico e importante durante la limpieza es visualizar las flautas de dispersión de aire, el polvo, las partículas en general y los minerales generan abrasión por el impulso constante de aire comprimido, las boquillas o sus orificios donde sale el aire a presión incrementan su diámetro por el efecto de abrasión, de tal forma que se deforma y eso permite que escape el aire que es empleado para la limpieza, eso provoca disminución en la eficiencia de filtración.

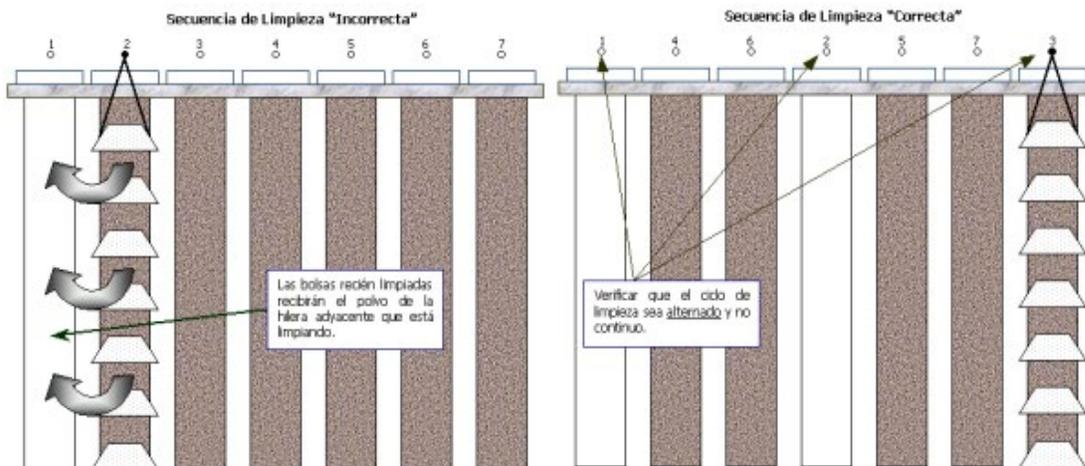
Para evitar problemas relacionados con la abrasión, debe utilizarse siempre aire comprimido de buena calidad, es decir seco, libre de humedad y libre de aceite, con una presión mínima de 5 kg/cm<sup>2</sup> y una máxima de 6 kg/cm<sup>2</sup>. Los secadores industriales comerciales permiten que la línea de aire

comprimido de la planta quede libre de partículas y humedad. Esto no solo ayuda al sistema de filtros de aire de la planta sino también a los diferentes equipos que utilizan aire comprimido. Además, se recomienda una inspección mecánica continua de todos los barrenos de las flautas.

Para la limpieza por chorro de aire es necesario mantener la apertura de la válvula solenoide de 0.15 a 0.20 segundos durante el ciclo de limpieza, esa configuración permitirá recuperar la presión en el cabezal de aire con un mínimo de 5kg/cm<sup>2</sup>. Será necesario alternar la limpieza, de no realizarlo con ese formato se podrá contaminar con la bolsa que se está retirando de las bolsas contiguas.

**Figura 29.**

*Secuencia de limpieza correcta e incorrecta*



*Nota.* Para evitar problemas relacionados con la abrasión, debe de utilizarse siempre aire comprimido de buena calidad. Obtenido de E. Sandoval. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 66). Universidad de Piura.

### 3.7.2. Mangas filtrantes

La limpieza es clave en las mangas filtrantes, se puntualiza que es la pieza crítica de la configuración de recolección de material particulado donde se atrapan los contaminantes que luego son enviados por aire a presión a las bolsas de recolección, si el filtro o la tela han sido expuestos a largos periodos de tiempo de trabajo pueden romperse, la tela tiene un límite de esfuerzo y de atrapamiento, por lo que esas fallas se pueden clasificar en fallas mecánicas, fallas térmicas y fallas químicas.

**Tabla 8.**

*Clasificación de fallas en las mangas filtrantes a causa de mala gestión en la limpieza*

| Tipo de falla   | Origen o causa principal                        | Tipo de daño   |
|---|---|--|
| Por gases a alta temperatura o por acumulación de polvo en la tolva | Contracción                                     | Estas fallas pueden comprometer la circulación del aire comprimido, el material particulado pasaría sin restricción.   |
|   | Elongación                                      |  |
|   | Limitaciones de la fibra                        |  |
|   | Pérdida en el acabado                           |  |
|   | Debilitamiento de material                      |  |
| Fallas mecánicas en las mangas filtrantes                           | Abrasión  | Con la mala configuración de las mangas se pueden contaminar las tuberías, el aire que está siendo insuflado dejará de poseer sus características necesarias para lanzar la cal hacia las telas. |
|   | Flexión excesiva de la fibra                    |  |
|   | Alta presión diferencial de operación           |  |
|   | Fabricación deficiente de la bolsa              |  |
|   | Presión excesiva de aire comprimido de limpieza |  |
| Fallas químicas en mangas filtrantes                                | Ataques por materiales cáusticos                | Con la presencia de fallas químicas se compromete toda la estructura, así sea de metal o tela, se dejará de contener el nivel de contaminación esperado.   |
|   | Ataques por ácidos                              |  |
|   | Selección inadecuada de textil                  |  |
|   | Hidrólisis                                      |  |

*Nota.* Fallas mecánicas, fallas térmicas y fallas químicas. Obtenido de E. Sandoval. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático.* (p. 80). Universidad de Piura.

Según sea el tipo de material que se ha seleccionado para las mangas filtrantes, pueden presentarse roturas en los bordes, así como en su parte frontal o trasera. Es posible remendar la bolsa para no comprar una nueva y que no se incrementen los costos de operación, solamente que la costura deberá quedar en sentido opuesto a la dirección del flujo de aire, para evitar ataque directo que pueda debilitar nuevamente la pieza, el fabricante establece que de tener un filtro con bolsas filtrantes con costuras será necesario orientar la costura de la bolsa hacia un lado, recomienda que se pueda orientar hacia el cabezal de aire de limpieza o con dirección hacia la entrada del colector, de lo contrario, si la costura está orientada hacia el lado opuesto del cabezal de aire de limpieza, el flujo de aire sucio de entrada del colector abrasaría las costuras.

Otros puntos débiles o puntos críticos en las mangas filtrantes son las abrazaderas, que podrían fallar por mala colocación, mala aplicación, por exceso de torsión, por reutilizarse y por corrosión, antes de sustituir una manga será necesario realizar la inspección general, buscar rápidamente puntos de fugas, puntos sueltos y piezas colgantes. De no encontrar problemas durante la inspección se podrá autorizar el arranque de los equipos y la puesta en marcha.

### **3.7.3. Mejoras en materiales filtrantes**

La gestión ambiental es el preámbulo de las mejoras necesarias hacia los materiales filtrantes, algunos fabricantes podrían demostrar que sus materiales y productos finales cumplen con regulaciones nacionales e internacionales, pero luego de ser llevados a la práctica e instalados se podrían obtener datos distintos, es por eso que los materiales filtrantes deberán cumplir con diferentes características especiales que cumplan con el atrapamiento de macropartículas de cal, así como con la posibilidad de trabajar por largos periodos ininterrumpidos.

El material filtrante, por su composición de membranas y microporos, puede expandirse o contraerse, a esa superficie es donde se adhiere el material particulado. El material a base de politetrafluoretileno que también puede conocerse como teflón es un polímero similar al polietileno, ese material puede ser el ideal para la recolección eficiente y extrema en el filtro *jet pulse*, sus fabricantes indican que soporta altas cargas de aire, elementos punzocortantes, sacudido mecánico y otros elementos abrasivos.

**Figura 30.**

*Ventajas de utilizar tela con membrana BHA-TEX*

| Mayor eficiencia de filtración con el mínimo de emisiones, según el fabricante estaría en 99,99% de eficiencia                                |  |  |                            |
|---|--|--|----------------------------|
| Excelente desprendimiento de la escarcha de polvo durante la limpieza, eso mejora el diferencial de presión y mejora la operación del sistema | Reducción de la aglomeración de partículas que favorece el funcionamiento de los filtros de mangas sin problemas | Mayor flujo de aire o menor consumo de energía | Filtración submicrométrica |

*Nota.* Ventaja de utilizar materiales filtrantes que cumplen con diferentes características especiales para el atrapamiento de macropartículas. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Los materiales filtrantes tradicionales utilizan la filtración profunda, en donde el medio de recolección es la escarcha de polvo en el lado sucio de la

manga y no el material en sí mismo. Hasta que se forma una buena escarcha porosa, incluso después de que se haya formado, las partículas pueden pasar hasta el fondo del material. A medida que las partículas quedan atrapadas en las fibras del material, el flujo de aire disminuye y la presión diferencial aumenta. En ese caso puede resultar necesaria una limpieza más frecuente, con la mala limpieza las mangas pueden obstruirse.

Según Energy Company, las mangas que poseen membrana BHA-TEX no permiten que se forme escarcha de polvo de cal, por lo que continuaría filtrando eficientemente, ese tipo de tela puede capturar las micropartículas que están siendo consideradas en las tablas de diseño de las mangas del filtro, agregan que la membrana microporosa retiene inmediatamente el material particulado que estará siendo procesado como desperdicio, ese efecto reducirá el consumo de energía de los ventiladores, incrementará el rendimiento del proceso y disminuirá los costos de aire comprimido.

Otra ventaja de utilizar ese material con membranas es mejorar la atracción entre el flujo de gas que se mezcla con las partículas de cal y se pegará a las bolsas de recolección final. La aglomeración formará una capa densa de polvo de cal que estará cayendo constantemente por las tolvas hacia las bolsas de recolección, solamente se puede ver comprometido el valor del flujo de aire. La superficie resbaladiza y lisa de la membrana permitirá una limpieza eficiente en los filtros, el flujo de presión de aire será regulado y no se necesitarán incrementos de presión, la producción final estará optimizada y los tiempos de limpieza serán agilizados con menores actividades para retirar las bolsas y sacudir los filtros de tela.

El material de membrana que se propone instalar en la cantera es fabricado por sistema de laminación bicomponente, el fabricante de ese

material establece que las fibras son recubiertas individualmente, por lo que se generan diferenciales de puntos de laminación, son puntos pequeños que pueden atrapar partículas microscópicas de cal o de material particulado de cal o polvo de cal, la membrana BHA-TEX será resistente y favorecerá el flujo de aire a presión.

### **3.8. Incorporación de una gestión ambiental**

En la cantera se han implementado protocolos para recolectar la cal que se mantiene en el ambiente, pero no se han diseñado protocolos para retener el material particulado con menor peso que es lanzado hacia la atmósfera, es por eso que se debe colocar el filtro de recolección y los equipos auxiliares para mitigar en ese 99.99 % que ofrecen los tejidos o telares de microfibras. La captación de la ceniza de cal o polvo de cal es una medida reglamentaria para continuar con la explotación minera, de lo contrario se podrán restringir las operaciones por el daño al medio ambiente.

La gestión ambiental se fortalece con el manejo responsable de los desechos de piedra caliza, algunos de esos desechos que no pueden ser triturados son retirados de las líneas de procesamiento, pero se acumulan en distintos puntos dentro de la cantera, la dispersión de esos contaminantes promueve otro fenómeno de contaminación que al final impacta en el medio ambiente por distintas razones.

Todos esos fenómenos que se gestan en la cantera deberán ser sustituidos por nuevas tareas, la conducta de los trabajadores se deberá mejorar hacia sus tareas diarias, pero dentro de esas tareas que se realizan constantemente se deberá crear el compromiso y responsabilidad ambiental, de lo contrario, aun con todos los procesos mejorados y con nueva tecnología,

pero sin el compromiso real de los trabajadores, no servirá mayormente para alcanzar metas conjuntas: la primera: mitigar por completo la descarga de material particulado al medio ambiente; la segunda: contener por completo la nube de cal que se genera por la trituración de tierras, y la tercera: crear espacios y zonas seguras en toda la cantera sin la acumulación de desechos, sin importar su clasificación.

### **3.8.1. Manejo responsable de desechos de piedra caliza**

Todos los desechos que se han generado hasta finales del año 2021 pueden ser recolectados en distintos focos o puntos de concentración en la cantera, pero los desechos no suelen estar empacados, eso genera que diferentes corrientes de aire los muevan del punto donde se están concentrando y se dispersen por toda la cantera y que sean trasladados hacia terrenos aledaños.

De tal forma que ahora los desechos deberán ser empacados y embalados, en sacos con capacidad de 100 libras, los sacos serán de polímeros o plásticos con características similares a los filtros de mangas, la relación entre las fibras y la composición de las fibras será clave para ese proceso, es necesario evitar utilizar cualquier tipo de material que al contrario de contener los desechos pueda dispersarlos en las bodegas, la empresa recolectora de los desechos podrá ser la misma que recolecta los desechos comunes o se puede generar nuevas negociaciones con empresas recicladoras.

Algunas empresas fabricantes de químicos que emplean como producto base la piedra caliza podrían utilizar estos desechos, otros fabricantes de productos químicos también pueden necesitar de ese material, lo importante es

evitar que continúen con la exposición a cielo abierto y que sean desechados sin protocolos de contención a vehículos tipo *pickup* para su traslado final. Desde que los desechos son entregados a la empresa recolectora se desconoce el destino final, eso ha sido responsabilidad de quienes realizan dicha actividad por una remuneración económica mensual. Se evitará por completo que los desechos se trasladen sin un empaque de contención, tampoco se podrá seguir utilizando zonas comunes para acumular desechos por la cantera.

### **3.8.2. Aprovechamiento de los desechos**

En la cantera los desechos generados por los bancos de tierras pueden ser comercializados como abonos para siembras, los desechos de piedra caliza se pueden vender a fabricantes de *blocks*, otros desechos como arcillas y minerales pueden venderse a proyectos de compactación de tierras, en general los desechos que se generan constantemente pueden generar una ventaja distinta a solamente ser entregados a los recolectores de basura.

Los caminos y aquellos espacios donde se ha extraído material para ser procesado en bancos de tierras se podrían rellenar con las tierras que no fueron útiles durante la explotación de piedra caliza, esas tierras son sueltas, con cierto contenido de humedad, por lo que su colocación y dispersión no podría generar mayores dificultades.

### **3.8.3. Manejo responsable de los desechos finales**

Esto representara hacia la cantera el compromiso con el cuidado al medio ambiente, todos sus desechos son recolectados por una empresa privada por dos veces a la semana, los desechos provenientes exclusivamente

de la cantera han sido vendidos a diferentes empresas que tienen interés en ese material, anteriormente se entregaba el material tal y como se encontraba en montículos por diferentes puntos de la cantera.

Ahora se deberán entregar en bolsas tipo costal, se hace más práctico para los recolectores y se evita la dispersión de contaminantes en su entorno para la cantera, evitando así que la contaminación se continúe gestando por no contener el material particulado desde la trituración hasta el vaciado y la acumulación en distintos puntos.

#### **3.8.4. Requisitos mínimos del Ministerio de Ambiente**

Según la legislación del Ministerio de Ambiente, es necesario que se clasifiquen los desechos, no se podrán mezclar desechos comunes de las oficinas administrativas con desechos resultantes de la trituración de piedra caliza, el polvo de cal que ha sido extraído de los filtros se puede mezclar con la cal que ya fue procesada.

El cuidado al medio ambiente no solamente consistirá en contener la dispersión de material particulado hacia la capa de ozono, consistirá también en contener las tierras que fueron removidas en los bancos de explotación, así como reducir la dispersión de contaminantes en toda la cantera colocando puntos de concentración de desechos, iniciar a embalar las tierras, arcillas u otros materiales que anteriormente se despachaban sin controles permitirá evitar sanciones del MARN.

Evitar contaminar ríos, riachuelos o cualquier tipo de embalse de agua es otra limitante para la cantera, no desechar fluidos químicos contaminantes hacia las aguas negras también es una restricción que se deberá respetar, en

general, evitar contaminar las fuentes de agua es una tarea básica y fundamental para la cantera, aunque sea o no legislado se puede entender que es un compromiso hacia el cuidado del medio ambiente, la cantera ha impulsado como desarrollo institucional diferentes reglamentos internos que han causado mayores aspectos benéficos hacia la reducción de emisión de contaminantes en su zona de incidencia.

Los desechos comunes han sido separados de los materiales procesados, han sido constantes en contratar los servicios de empresas externas para recolectar sus desechos y que su disposición final sea amigable al entorno.

### **3.9. Capacitaciones**

De instalarse el filtro y sus equipos debe ser necesario capacitar al personal que trabajará directamente con la trituradora, los otros trabajadores que tienen otras actividades asignadas no serán tan indispensables a la hora de capacitarse acerca del funcionamiento y mantenimiento, a diferencia de los mecánicos de la empresa, quienes deberán conocer la operatividad del equipo.

Se ha presentado que los filtros con sus equipos demandan pocas tareas de mantenimiento, el trabajador que monitorea la acumulación y llenado de las bolsas de material particulado que se recupera en los filtros es quien tendrá mayores tareas por ejecutar, el fabricante establece que las mangas pueden ser golpeadas levemente con algún objeto de madera, las bolsas que están conectadas a la tolva donde las mangas captan la cal en polvo caen por la presión del aire insuflado, entonces será necesario que ese trabajador conozca los valores y alertas que emitirán los equipos cuando se está llegando a un nivel óptimo o nivel máximo de recolección.

Las capacitaciones se deberán compartir por medio de personal de la empresa que instalará el equipo y personal de la empresa que deberá aprender a realizar los mantenimientos, los trabajadores que por clasificación y rotación especial puedan ser reemplazados en el trituradora deben participar activamente, ellos serán piezas clave para el buen funcionamiento, si las mangas y los filtros se obstruyen se genera caída de presión en las flautas que inyectan el aire, de eso se generaría que el material particulado pasaría en las tolvas siguientes mezclándose con material de desecho, con lo que la producción se contaminaría con cal procesada, arcillas, tierras y material particulado.

**Tabla 9.**

*Temas a desarrollar en la capacitación*

| <b>Tema de capacitación</b>                            | <b>Tiempo estimado</b> | <b>Medio de capacitación</b>   |
|--|------------------------|--|
| <i>Filtro jet pulse</i>                                | 90 minutos             | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Audiovisual</li> <li>○ Impreso</li> </ul> |
| <i>Normas generales de operación</i>                   | 90 minutos             |  |
| <i>Limpieza de filtros</i>                             | 60 minutos             |  |
| <i>Presión de aire y su flujo constante de presión</i> | 45 minutos             |  |
| <i>Puesto de trabajo</i>                               | 45 minutos             |  |
| <i>Medio ambiente</i>                                  | 45 minutos             |  |
| <i>Electricidad y riesgo de choque eléctrico</i>       | 60 minutos             |  |
| <i>Señalización</i>                                    | 30 minutos             |  |
| <i>Orden y limpieza</i>                                | 60 minutos             |  |
| <i>Documentación de</i>                                | 90 minutos             |  |

Continuación de la tabla 9.

|   |            |
|---|------------|
| <i>seguridad industrial</i>   |            |
| <i>Ventas de material recuperado</i>                                    | 45 minutos |
| <i>Clasificación de desechos</i>  | 90 minutos |
| <i>Aprovechamiento de tierras derivadas de los bancos de extracción</i> | 60 minutos |

*Nota.* Presentación de listado de temas a desarrollar en la capacitación. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Los temas que se presentan en la tabla anterior son los más relevantes para la cantera y para los trabajadores que estarán en contacto directo con los equipos y los desechos de cal procesados diariamente, el personal ya reconoce algunas de esas actividades, pero se deberán mejorar los protocolos de trabajo y extender los temas de capacitación.

**Tabla 10.**

*Programa de capacitación para trabajar con filtro jet pulse*

Posterior a la identificación de las necesidades de capacitación, se llevará a cabo la realización del diseño del programa de capacitación que servirá de orientación a los jefes de la cantera en cuanto a los puntos específicos a tratar en el programa mismo, con la finalidad de conocer las necesidades de operación con el filtro *jet pulse*.

Duración: un mes.

Módulos: 2.

Tiempo: 2 horas por cada módulo.

Personal: conforme las presentes.

|             |  |
|-------------|--|
| Metodología | Dos empleados participarán por día y por tipo de actividad asociados con la trituración.                   |
|             | Se empleará por cada módulo dos horas por las mañanas.   |
|             | La primera hora se destinará en la introducción y descripción breve de los temas a capacitar.              |
|             | La segunda hora se utilizará para planteamiento de casos prácticos y reproducción de material audiovisual. |

Continuación de la tabla 10.

|  |  |  |
|--|--|--|
|  | Interacción luego de concluir cada módulo se necesitará debatir sobre los temas abordados, realizar autoevaluación y establecer las conclusiones por cada módulo.  |  |
| Alcances generales   | Capacitar a los trabajadores de la cantera con temas referentes a: trabajo seguro, prevención de incendios en el trabajo, acciones contra una fuente incendio, clasificación y manejo de extintores, ventas de material particulado, medio ambiente. |  |
| <b>Temas del programa</b>                                      | <b>Módulo uno</b>  | <b>Módulo dos</b>  |
| Filtro <i>jet pulse</i>  | Que es el filtro <i>jet pulse</i> y su funcionamiento  | Uso y aprovechamiento del filtro para recolectar material particulado de cal             |
| Mangas de filtro y bolsas de recolección                       | Tareas diarias de limpieza en los filtros, niveles óptimos de acumulación de material particulado  | Limpieza de las telas del filtro, acciones preventivas y acciones correctivas.           |
| Medio ambiente   | Tareas de recolección en el lugar de trabajo   | Tareas de prevención para evitar fugas de material particulado                           |
| Equipos periféricos, tuberías, manómetros y otros instrumentos | Verificación y monitoreo de los equipos periféricos en la trituradora y el filtro <i>jet pulse</i>   | Señales de abrasión, señales de desgaste, señales primarias de fallas en los equipos.    |
| Fuego<br>Extintores  | Causas de fuego en los filtros y mangas  | Manejo de emergencias por fuego.<br>Clasificación y uso de los extintores.               |
| Charlas médicas de prevención y reacción ante emergencias      | Primeros auxilios  | Alcoholismo y causas de accidentes.<br>Drogadicción y causas de accidentes.<br>Incendios |

*Nota.* Programa de capacitación que servirá de orientación a los jefes de la cantera Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Las capacitaciones estarán condicionadas por la autorización de instalar o no el filtro *jet pulse*, se deberá dividir las tareas de capacitación en los supervisores de la cantera, los jefes de área muy difícilmente podrán ejecutar esas tareas, la empresa, aunque posea oficinas administrativas en la ciudad capital, no podrá disponer de tiempo, espacio y oportunidad de los trabajadores para que puedan llegar a recibir su capacitación y luego se retiren a sus actividades.

Debido a lo anterior, se deberá cumplir con la programación en las instalaciones de la cantera, se puede utilizar el salón de reuniones, para ello se debe solicitar equipo audiovisual y avanzar de esa forma con las capacitaciones, el personal que no esté en contacto directo o con trabajo directo asignado a la trituradora como al equipo general que conforma el filtro *jet pulse*

podría capacitarse voluntariamente, de ser necesario y con mayor ventaja a la empresa se pueden capacitar todos los trabajadores de la cantera.

### **3.9.1. Uso y aprovechamiento del equipo *jet pulse***

Para su máximo aprovechamiento se deberá cumplir con los protocolos de monitoreo y de mantenimientos para optimizar así el equipo, de lo contrario se podrán cubrir los filtros con escarcha de cal que impediría captar más partículas de cal y esto afectaría la presión del flujo de aire insuflado constantemente, no se podrá utilizar otro tipo de material que no sea piedra caliza en la trituradora, eso estará definido por el tipo de manga a instalar, para ello se tomó como base diseños ya establecidos de fabricantes de dichos equipos, donde se configura el tamaño del tamiz para el material particulado que se estará captando.

Las bolsas deberán ser removidas en el orden que se presentó con una imagen, en dicha imagen indica el fabricante que es necesario retirar la primera bolsa y en continuidad las siguientes, de lo contrario se podrá retirar una bolsa que se encuentre en fase intermedia, pero podría contaminar las otras áreas del filtro. En sí, el máximo aprovechamiento permitirá recuperar la mayor cantidad posible de material particulado de cal que ha sido descargado al medio ambiente, pero luego de su instalación de los equipos se mejorarán las condiciones generales en la cantera y en su zona de incidencia.

### **3.9.2. Capacitación para operaciones y manejo del equipo**

Las capacitaciones que se definieron para los trabajadores de la cantera pueden ser llevadas a cabo en horarios de labores o como horas extras luego de concluir la jornada de trabajo, el equipo deberá ser operado y manipulado

exclusivamente por dos o tres trabajadores competentes y que destacan de los ciclos de capacitación, las mejoras notas pueden servir como referencia, aunque todos los trabajadores conozcan cómo funciona el filtro *jet pulse* y sus equipos no se podrán asignar para que trabajen en el diariamente.

### **3.9.3. Capacitación para los trabajadores de cantera**

En la cantera pueden permanecer hasta quince trabajadores por día, pero ellos poseen diferentes roles, puestos y atributos, es importante reconocer quienes de estos quince trabajadores deberán capacitarse con el uso y mantenimiento de los filtros *jet pulse*, tal como los trabajadores que se dedican a la extracción de tierras y de piedra caliza no sería tan necesario que se capaciten con el funcionamiento de esos equipos.

Posiblemente puedan formar parte de una sesión informativa general para hablarles sobre el equipo que se está instalando, cuáles deberán ser sus limitaciones con la integración del mismo y qué es lo que sí pueden hacer conforme a sus puestos de trabajo, lo cual requeriría algún tipo de interacción especial, pero, ya que el equipo es en su mayoría automatizado, puede necesitar la presencia de una persona durante las operaciones del día.

Para el mantenimiento diario, esa misma persona que lo monitorea puede retirar las bolsas que se utilizan para recolectar el polvo de piedra caliza, dichas tareas serán monitoreadas conforme las cargas de piedra caliza procesada, aunque las bolsas estarán a la vista y no en cuartos o espacios confinados, se debe monitorear por lo menos cada 45 minutos si ya están alcanzando su nivel óptimo de llenado.

La decisión final la poseen las autoridades de la cantera, son ellos quienes establecerán si todo el personal de la cantera deberá formar parte de la capacitación o solamente el personal que trabaja con la trituradora y otras áreas próximas a donde se instalarán los equipos de aire a presión y los filtros de mangas *jet pulse*. La capacitación general sobre salud y seguridad ocupacional acerca del nuevo equipo sí es necesario que se comparta con todo el personal.

### **3.10. Costos de implementar la gestión**

Se incluyen los costos de comprar el filtro *jet pulse*, costos del programa de capacitación, los costos asociados a los nuevos procesos administrativos que deberán mejorarse, costos por remodelaciones y mejoras esperadas, costos por uso de equipo de protección personal, costos por implementar el programa de capacitación, costo por instalar el equipo, costos por mantenimiento y costos de operación. Todos estos se presentan en la tabla de las siguientes páginas:

**Tabla 11.***Costos de implementar la gestión*

| <b>Programa de capacitación</b>                                |                                  |                         |                       |                  |
|--|----------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|
| Área de refuerzo   | Cantidad de personal involucrado | Horas por sesión        | Costo unitario        | Costo total Q    |
| Filtro <i>jet pulse</i>  | 15                               | 3                       | 375,00                | 1 125,00         |
| Mangas de filtro y bolsas de recolección                       | 15                               | 3                       | 450,00                | 1 350,00         |
| Medio ambiente   | 15                               | 3                       | 375,00                | 1 125,00         |
| Equipos periféricos, tuberías, manómetros y otros instrumentos | 15                               | 3                       | 375,00                | 1 125,00         |
| Fuego y extintores   | 15                               | 3                       | 450,00                | 1 350,00         |
| Charlas médicas de prevención y reacción ante emergencias      | 15                               | 3                       | 450,00                | 1 350,00         |
| Costo del programa de capacitación                             |                                  |                         |                       | <b>7 425,00</b>  |
| <b>Procesos administrativos a mejorar</b>                      |                                  |                         |                       |                  |
| Área de refuerzo   | Cantidad de personal involucrado | Horas hombre requeridas | Costo unitario / hora | Costo total      |
| Manejo responsable de desechos finales                         | 15                               | 25                      | 95,00                 | 2 375,00         |
| Desarrollo de estrategias de producción mas limpia             | 15                               | 25                      | 95,00                 | 2 375,00         |
| Gestión responsable de los desechos finales                    | 15                               | 25                      | 95,00                 | 2 375,00         |
| Costo de mejorar los procesos administrativos                  |                                  |                         |                       | <b>7 125,00</b>  |
| <b>Remodelaciones y mejoras esperadas</b>                      |                                  |                         |                       |                  |
| Área de refuerzo   | Cantidad                         | Horas hombre requeridas | Costo unitario / hora | Costo total      |
| Sustitución de paneles del techo de bodegas                    | 120 mts <sup>2</sup>             | 25                      | 95,00                 | 2 375,00         |
| Paneles para remodelación                                      | 120 mts <sup>2</sup>             |                         |                       | 2 400,00         |
| Pintura de las instalaciones                                   | 120 mts <sup>2</sup>             | 25                      | 95,00                 | 2 375,00         |
| Mejora del sistema de iluminación                              | 120 mts <sup>2</sup>             | 25                      | 95,00                 | 2 375,00         |
| Mejora del sistema de ventilación                              | 120 mts <sup>2</sup>             |                         | 95,00                 | 2 375,00         |
| Mejora al sistema de ruido                                     | 120 mts <sup>2</sup>             |                         | 95,00                 | 2 375,00         |
| Costo de remodelaciones  |                                  |                         |                       | <b>11 900,00</b> |

Continuación de la tabla 11.

| <b>Equipo de protección personal</b>                      |                           |                    |                       |                   |
|---|---------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Gafas   | Exclusivo para la cantera | 15                 | 85,00                 | 1 275,00          |
|   |                           | 15                 | 155,00                | 2 325,00          |
| Guantes de caucho y piel                                  |                           |                    |                       |                   |
| Costo para la dotación del equipo de protección personal  |                           |                    |                       | <b>3 600,00</b>   |
| <b>Costo de implementar el programa de capacitación</b>   |                           |                    |                       |                   |
| Actividad   | Personal involucrado      | Área de influencia | Costo unitario / hora | Costo total       |
| Evaluación de puntos débiles                              | 15                        | Todas las áreas    | 7,50                  | 112,50            |
| Delimitación del problema                                 | 15                        | Todas las áreas    | 7,50                  | 112,50            |
| Diseño de procesos amigables con medio ambiente           | 15                        | Todas las áreas    | 7,50                  | 112,50            |
| Estrategias para manejo de los desechos finales           | 15                        | Todas las áreas    | 1,25                  | 18,75             |
| Costo de implementar el plan                              |                           |                    |                       | <b>356,25</b>     |
| <b>Resumen de los costos involucrados en la propuesta</b> |                           |                    |                       |                   |
| Costo del programa de capacitación                        |                           |                    |                       | <b>7 425,00</b>   |
| Costo de mejorar los procesos administrativos             |                           |                    |                       | <b>7 125,00</b>   |
| Costo de remodelaciones                                   |                           |                    |                       | <b>11 900,00</b>  |
| Equipo de protección personal                             |                           |                    |                       | <b>3 600,00</b>   |
| Costo de implementar el programa de capacitación          |                           |                    |                       | <b>1 500,00</b>   |
| Costo de comprar el equipo <i>jet pulse</i> y sus filtros |                           |                    |                       | <b>75 000,00</b>  |
| <b>Costo total de la propuesta</b>                        |                           |                    |                       | <b>106 550,00</b> |

*Nota.* Presentación de esquema con costos para realizar la gestión. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

### 3.10.1. Costos por instalar el equipo

Eso representará un solo gasto que se cubrirá con los Q 75,000.00, ya que es la empresa que vende el equipo la responsable de instalarlo, configurarlo, afinarlo y hacer pruebas para que la graduación entre el aire-tela y la corriente de aire necesario tenga el nivel óptimo. El personal que asistirá a la cantera para la instalación del filtro y sus equipos auxiliares también se incluye dentro del mismo pago de la factura de compra, por lo que la cantera no cubrirá

gastos adicionales, con ello podrá garantizarse que el equipo se instale y se coloque en funcionamiento.

### **3.10.2. Costos por mantenimiento**

El diseño original permitirá que el mantenimiento sea un conjunto de acciones y actividades menores, así como la información que se presentó de los filtros *jet pulse* donde el fabricante indica que el mantenimiento de mayor necesidad es retirar las bolsas que capturan la cal que está siendo filtrada por las mangas, que son otros puntos críticos del mantenimiento, si ese tamiz presenta daños dejaría circular materiales contaminantes por las flautas y tuberías, con ello causarían abrasión a telas, tuberías, empaques, juntas y otras partes de la red de paso de aire a presión.

El costo de mantenimiento se fija en Q 275.00 por cada bolsa, que se retira desde las tolvas de recepción, pero si es necesario intercambiar las mangas incrementará a Q 2,800.00 cada manga, que sea reemplazada por completo. Si una manga presenta rotura o su lienzo en malas condiciones, pero esta misma se puede zurcir, se estimaría que de no exceder un trabajo de reparación de una hora, podría establecerse un costo de Q 900.00 por la reparación, esos valores son parámetros establecidos por el vendedor del equipo.

### **3.10.3. Costos de operación**

Luego de que se inicien labores con los filtros *jet pulse* y los equipos de aire a presión, para las mangas y las bolsas de recuperación de material particulado de la cal se podrían estimar costos de operación por hora útil y por material particulado procesado, la complejidad de dividir un solo costo de

operación radica en el tipo de proceso. Luego de que se extrae del banco de tierra la piedra caliza que será procesada, pasará por una banda transportadora donde otros equipos interactúan para molerla y reducirla a menores dimensiones.

Ya con el equipo en funcionamiento directamente en la trituradora se podría subdividir el costo de operación para la trituradora y el filtro *jet pulse*, pero se desconocen diferentes variables que influyen en la determinación del mismo.



## **4. IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA**

### **4.1. Método de control de partículas**

La fuente de propagación de material particulado es la trituradora, de instalar el filtro de mangas y los equipos auxiliares se dará como punto de partida para gestionar el control y retención de las partículas de cal hacia la atmósfera, el circuito de los equipos permitirá atrapar el 99.99 % de las partículas, pero durante ese proceso se deberá monitorear que las bolsas colocadas bajo la tolva de los filtros de mangas no exceden su volumen, de lo contrario la misma contaminación podría mezclarse nuevamente con el medio ambiente y su entorno.

La piedra caliza, después de ser triturada, genera el material final llamado cal, que será depositada en silos o contenedores de tamaño regular, se ha propuesto también que se utilicen sacos de polímeros o de materiales similares, pero sin tamiz para evitar fugas entre sus cerdas o membranas. El material particulado deberá ser contenido en su totalidad por el sistema de atrapamiento en las mangas de tela, todo el excedente que no pueda filtrarse estará siendo recolectado, ya que ese material no posee la calidad de trituración y grado esperado de cal se deberá separar del material final para poder ser vendido como material de segunda o material de aporte en otros procesos constructivos rústicos o materiales químicos.

El trabajador asignado a la estación de la trituradora monitoreará constantemente para evaluar la presencia de fugas en bridas, uniones, acoples, juntas, mangas y las bolsas del sistema completo de filtración.

#### **4.1.1. Técnicas de monitoreo de descargas al medio ambiente**

Es necesario que los trabajadores asignados a la trituradora, como los que trabajan en diferentes puntos de la cantera, puedan evaluar su entorno tres veces al día, lo cual permitirá que se evalúen desde distintos puntos físicos si existen fugas o descargas al medio ambiente que no han logrado ser controladas. Para eso se podrá realizar las siguientes técnicas de monitoreo, de existir alguna de ellas se deberá informar al superior inmediato, de no encontrar un superior inmediato se deberá enviar correo indicando en el asunto el problema encontrado:

- Cada uno de los trabajadores de la cantera, al llegar a sus labores, deberá verificar que su zona o área de trabajo no presente residuos de material particulado de cal o polvo de cal.
- Luego de iniciar labores podrán verificar si sus unidades de trabajo, equipos y área física asignada presenta material particulado o polvo de cal.
- Durante las labores, y aprovechando sus traslados internos dentro de la cantera, los trabajadores podrán verificar que el sistema de filtración y sus equipos periféricos no presente fugas, desgaste o abrasión por donde escape el material particulado.
- Siendo el punto crítico la trituradora, será necesario que se monitoreen los equipos de medición, instrumentos, bridas, uniones, flauta de inyección de aire, bolsas de recuperación de material particulado, así como otros puntos críticos.

#### **4.1.2. Acciones reactivas por fugas al medio ambiente de piedra caliza**

De presentarse alguna fuga material particulado o residuos de cal, se deberán detener las operaciones para identificar el punto o lugar donde se están dando las expulsiones de contaminantes al medio ambiente, diferentes puntos o lugares pueden fallar, por lo que la observación será la primera técnica a emplear. El sistema posee presión interna, al detener las operaciones aún se podrá detectar la fuga hasta que se pierda la presión del sistema, es ahí donde se pueden localizar el o los puntos para ser reparados.

La tubería, tolvas u otros puntos de metal que presenten fugas por abrasión deberán ser removidos y sustituidos, las bridas o juntas deberán ser apretadas conforme el torque que indique el fabricante, la flauta de dispersión podría ser otra zona vulnerable, de ser esa pieza se podrá sustituir, solamente que la empresa evaluará si es necesario poseer *stock* de repuestos, por los costos que representa tenerlo en bodega o esperar a que falle algún equipo o pieza y pedirlo contra muestra de no ser posible repararlo.

Los filtros, al presentar fugas o daños en su estructura, serán reemplazados, de ser posible se podrán reparar, si el daño es mayor al 50 % de su sección transversal o daño lineal es preferible sustituirlo por un nuevo filtro, para evitar retrasos en la trituración y posibles puntos de fugas de contaminantes hacia el medio ambiente. Estas acciones son las de mayor relevancia durante las operaciones diarias, los equipos nuevos y sus tuberías muy difícilmente puedan generar fugas al medio ambiente, cada tres meses será necesario realizar pruebas de inyección de aire a presión empleando gas con colorante para identificar caídas de presión y puntos de fugas que puedan imperceptibles a la vista por ser polvo de cal.

## 4.2. Monitoreo y control de torres de limpieza

El filtro *jet pulse* a instalar poseerá una torre de limpieza, el diseño propone emplear una torre de aspersion con limpieza húmeda, por su simpleza y eficiencia es la de mayor adaptabilidad al proyecto de la cantera, esa torre emplea aire cargado de material particulado que se mezclará con vapor de agua expulsado por las boquillas de aspersion. Los puntos críticos para monitorear son los puntos donde se puedan presentar fugas de agua, fugas de vapor, entrada de agua limpia, entrada de gas, salida de gas sucio y la flauta de rociador. Las acciones de monitoreo serán las siguientes:

- Verificar que no se presenten fugas de gas y de agua en las entradas y salidas del sistema de limpieza en la torre.
- Verificar que los instrumentos de medición de presión de gas y de agua se encuentre en sus límites mínimos y máximos permisibles durante la jornada de trabajo.
- Las torres deberán limpiarse de cualquier concentración de polvos, tierras u otros agentes en su exterior, de presentar dicha acumulación deberá limpiarse.
- Se anotará en una bitácora de todas las supervisiones diarias, consignando la hora, nombre de la persona responsable y las observaciones finales anotadas.
- Todo lo relevante al monitoreo e inspección que conlleve generar orden de mantenimiento u orden de limpieza deberá ser enviado por correo a las diferentes autoridades responsables en la cantera.

#### **4.2.1. Capacidad de procesamiento esperado por jornada diaria de procesamiento**

Los requerimientos del fabricante establecen que el filtro posee capacidad compartida por los equipos auxiliares a instalar y la capacidad de trituración operando a temperatura máxima de 60 °C hasta 8 toneladas por hora, el flujo de aire necesario será de 1.54 metros cúbicos por segundo (1.52 m<sup>3</sup>/s), por lo que su recuperación en las mangas y posteriormente a las bolsas de recolección será del 10 % del material triturado.

La recuperación esperada de polvo de cal en las mangas es de 0.8 gramos por pie cúbico (0.8 gr/ft<sup>3</sup>) para una jornada de 8 horas trabajando de forma ininterrumpida, y bajo condiciones ideales se esperaría recuperar 1 tonelada por día. Estos valores se fijan por la proyección del fabricante, los datos reales podrían variar por diferentes variables, tales como el material de aporte, las condiciones atmosféricas del lugar, la experiencia del personal y los ritmos de trabajo en general del personal de la cantera.

#### **4.2.2. Monitoreo y supervisión de las torres**

De instalar más de una torre de limpieza se deberán duplicar las acciones de monitoreo ya descritas, una sola persona tendrá la asignación de dichas tareas, pero de ser necesario se podrá complementar el trabajo de supervisión con personal de mandos medios, quienes monitorean constantemente los puestos de trabajo y las acciones que se realizan a diario. Es importante verificar los manómetros de presión, las mangas, las conexiones de las válvulas, los solenoides, las uniones y las bridas, las líneas de aire en los tubos o dentro de las flautas, la forma correcta de operación de las mangas, en

general, todas esas acciones y lista de tareas se deberán realizar durante la jornada de trabajo sin excepción.

### **4.3. Selección de torre de limpieza húmeda**

La selección puede variar según las necesidades especiales de la cantera, a ello se puede sumar la capacidad de procesamiento y la demanda de material particulado por día que requieran los clientes especiales de la cantera, pero las limitantes mayormente especiales son por los costos de operación y el costo total de adquisición.

#### **4.3.1. Beneficios de las torres de aspersión**

Según datos del fabricante, la torre de aspersión depende principalmente de la recolección de partículas por impacto, por ello tendrá altas eficiencias en recolección de material particulado grueso, sus eficiencias de remoción típica pueden ser de 90 % con partículas no mayores a 5  $\mu\text{m}$ . Las eficiencias de remoción para partículas de 3 a 5  $\mu\text{m}$  de diámetro varían de 60 a 80 %, por debajo de 3  $\mu\text{m}$ , las eficiencias de remoción declinan a menos de 50 %.

Las aplicaciones de las torres de aspersión incluyen el control de emisiones de material particulado de operaciones de molienda, operaciones con pigmentos y control de polvo en plantas de piedra caliza, también pueden ser empleadas para el control de material particulado en secadores de agregados en las plantas de asfalto. Poseen costos de compra más bajos que las otras torres de limpieza húmedas. Además, tienen un consumo menor de electricidad y no son propensas a la acumulación de escarchas, de manera que su costo de operación también será más bajo. Los costos de operación de las torres de aspersión aumentan en aplicaciones para material particulado fino, porque

dichos sistemas requieren de una razón de líquido a gas (más de 20 galones por 1000 pies cúbicos). Los flujos de gas típicos para torres de aspersion son de 1 a 47 m<sup>3</sup> /segundo estándar.

#### **4.3.2. Beneficios de la torre de aspersion ciclónica**

La torre de aspersion ciclónica difiere del diseño de la torre de aspersion, la corriente del gas residual fluye a través de la cámara en un movimiento ciclónico. Su funcionamiento es similar al del ciclón, pero difieren en que, en la torre de aspersion ciclónica, existe un rociador. El movimiento ciclónico es producido al posicionar la entrada del gas tangencial a la pared de la cámara limpiadora o al colocar aspas giratorias dentro de la cámara de limpieza. La entrada del gas es ahusada, de manera que su velocidad aumenta a medida que entra en la torre.

El líquido limpiador es rociado desde unas boquillas en una tubería central (de entrada, tangencial) o desde la parte superior de la torre (aspas giratorias). Las gotas de líquido atrapadas en la corriente de gas experimentan una fuerza centrífuga que resulta del movimiento rotatorio de la corriente de gas, causando que migren hacia las paredes de la torre. Las gotas se impactan contra la pared de la torre y caen al fondo de esta. Las gotas que permanecen atrapadas en el gas residual pueden ser removidas con un eliminador de rocío.

#### **4.3.3. Beneficios de la torre dinámica**

Las torres de limpieza dinámica se conocen también como torres de limpieza asistidas mecánicamente o desintegradores. Ese tipo de torre de limpieza es similar a las torres de aspersion, pero con la adición de un rotor impulsado por electricidad que corta el líquido limpiador en gotas finamente

dispersas. El rotor puede colocarse dentro o fuera de la torre, conectado por un conducto. Un eliminador de rocío o un separador ciclónico remueven el líquido y el material particulado capturado. La mayoría de los sistemas de limpieza dinámicos humidifican el gas residual corriente arriba del rotor para reducir la evaporación y la deposición de partículas en el área del rotor.

Las torres de aspersión dinámicas remueven eficientemente la cal fina, pero la adición de un rotor al sistema de limpieza aumenta los costos de mantenimiento. El material particulado grande desgasta los rotores y la corriente de gas húmeda los corroe. En ocasiones un ciclón precede a una torre dinámica para remover el material particulado grande del flujo de gas residual. El consumo de electricidad también es alto en ese tipo de torres, de 4 a 10 kW por  $0.5 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Las torres dinámicas pueden tratar razones de flujo de gas entre  $0.5$  y  $24 \text{ m}^3 / \text{s}$ . Las eficiencias de recolección para las torres dinámicas son similares a aquellas de las torres de aspersión ciclónica. Los costos de compra, de operación y mantenimiento, son moderadamente más altos que los costos de las torres de aspersión sencillas debido al rotor.

#### **4.3.4. Beneficios de la torre de orificio**

En la torre de limpieza de orificio, también conocida como torre de limpieza por impacto, la corriente de gas fluye sobre la superficie de un líquido de limpieza, a medida que el gas se impacta sobre la superficie del agua, arrastra pequeñas gotas de líquido. El gas residual fluye entonces hacia arriba y entra en un orificio con una abertura más angosta que la del conducto. El orificio induce turbulencia en el flujo, lo cual atomiza las gotas arrastradas. Las gotas atomizadas capturan el material particulado de la corriente del gas. Una serie de deflectores remueven entonces a las gotas, las cuales caen en la superficie del líquido que está abajo.

Algunas torres de limpieza de orificio poseen orificios ajustables para controlar la velocidad del gas. Las torres de limpieza de orificio pueden maniobrar razones de flujo de gas de hasta  $1.42 \text{ m}^3 / \text{min}$  y cargas de partículas de hasta  $23 \text{ g/m}^3$  (10 granos por pie cúbico estándar).

La ventaja principal de ese tipo de torres de limpieza es la eliminación de una bomba de recirculación para el líquido limpiador, la cual contribuye bastante a los costos operacionales en la mayoría de los diseños de torres de limpieza. La desventaja principal es la dificultad de remover el lodo residual. En la mayoría de los diseños de torres de limpieza, el residuo se descarga continuamente por el fondo de la torre. Las torres de limpieza de orificio emplean una superficie estática de líquido limpiador, de manera que el lodo residual es removido con un eyector de lodos, el que opera como una banda transportadora. El lodo se sedimenta en el eyector, el cual lo transporta hacia afuera de la torre de limpieza.

Las torres de limpieza de orificio no se emplean ampliamente, pero se han utilizado en secadores, recipientes de cocción, operaciones de molienda y trituración, operaciones de recubrimientos (recubrimiento de píldoras, vidriado de cerámicas), ventilación (ventilación de silos, operaciones de descarga) y manejo de material (estaciones de transferencia, mezcla, descarga y empaque). Ese tipo de torres de limpieza puede remover efectivamente el material particulado de más de  $2 \mu\text{m}$  de diámetro, con eficiencias de control fluctuando del 80 al 99 %. Aunque las torres de limpieza de orificio pueden ser diseñadas como unidades de alta energía, la mayoría pueden ser construidas para servicio de baja energía. Los costos de compra, de operación y mantenimiento son significativamente más altos que los costos para torres de aspersion sencillas.

#### **4.4. Monitoreo y control de los filtros mangas**

Conforme avance la jornada de trabajo y el material procesado, se deben monitorear los tamices internos de los filtros de mangas, para así evitar que se concentre escarcha de polvo de cal o de material particulado en el pabellón y que eso interrumpa el flujo de aire a presión. El monitoreo permanente servirá para que no sobrepase los niveles de captación las bolsas de recolección que estarán bajo la tolva de descenso, en sus filtros o telares esto permitirá que no sea sobrecargado el volumen de presión interna ante un bajo flujo de corriente de aire.

Antes de arrancar los equipos se deberá sacudir y golpear levemente los telares de las mangas, se podrá utilizar algún instrumento de madera, para la cara interna y externa se podrá utilizar alguna mota o trapo de cerda fina para retirar el exceso. Aunque las mangas se pueden desmontar, puede ser menos contaminante sacudirlas desde su posición original para no esparcir polvo de cal en suelo y áreas comunes.

##### **4.4.1. Actividades propias del monitoreo**

El encargado de monitoreo deberá observar, durante el tiempo que los filtros se encuentren en operaciones, si se puedan percibir fugas de aire y fuga de material particulado. La elevada presión del sistema puede generar que eso sea expulsado hacia el medio ambiente, las uniones son puntos débiles para los filtros, los telares se pueden monitorear justo antes de que concluya la media jornada cuando se pone el equipo en reposo, será necesario que veinte minutos antes de eso se monitoree las condiciones internas, de presentarse alguna falla se deberá notificar y avisar al superior inmediato.

Posteriormente, al reiniciar la jornada laboral del medio día, se deberá arrancar el equipo y antes de triturar se puede monitorear externamente si se encuentra en óptimas condiciones y sin fugas para continuar trabajando, al concluir la jornada se repetirán las acciones que se realizan a media jornada.

#### **4.4.2. Limpieza de los colectores**

Para el colector se podrá utilizar el sistema de limpieza por agitación, para ello se deberá impartir energía a la tela para superar las fuerzas de adhesión que sostienen partículas de cal. Es necesario utilizar flujo de gas del interior hacia el exterior, la transferencia de energía se logrará con la suspensión de la bolsa desde un gancho o sobre una estructura que oscilaría por otro mecanismo de sujeción, el movimiento será impartido a la bolsa de diferentes formas, por lo que se creará efecto de onza sinusoidal sobre su extensión y área superficial.

Luego de eso se podrá aplicar el sistema de limpieza de aire a la inversa, ya que los telares o filtros de los colectores poseen fibra de vidrios y membranas microscópicas, pueden verse dañados con malas prácticas de los trabajadores que empleen instrumentos punzocortantes al limpiar los filtros. Es por eso que será necesario emplear ese medio suave para prevenir la degradación y la abrasión, el flujo de gas hacia las bolsas es interrumpido en el compartimiento que está siendo limpiado y un flujo a la inversa (de afuera hacia adentro) es dirigido a través de las bolsas.

Ese revés del flujo de gas plegará la bolsa suavemente hacia sus líneas centrales, lo que causará que la escarcha de cal se desprenda del área de tela. El desprendimiento es causado por fuerzas tipo tijera desarrolladas entre el polvo y la tela a medida que esta última cambia su forma. Las tapas metálicas

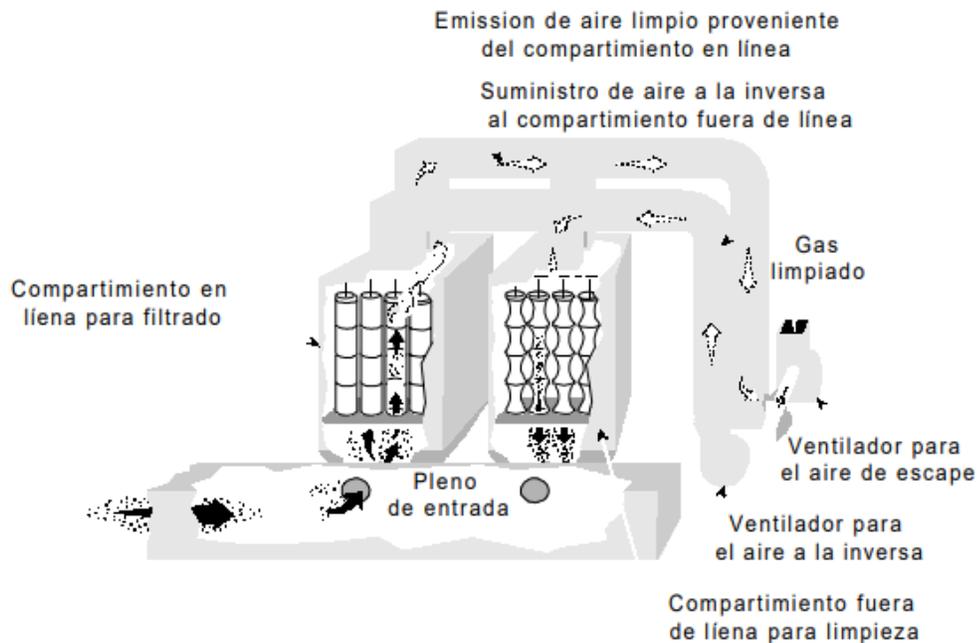
para sostener la parte superior de las bolsas son una parte integral de la bolsa, tanto como lo son varios anillos cosidos que rodean las bolsas para prevenir su colapso completo durante la limpieza.

Sin esos anillos, el polvo que cae y se acumula tenderá a obstruir la bolsa a medida que la tela se pliega sobre sí misma mientras es limpiada. Tal como con las casas de bolsas con agitación con compartimientos múltiples, en las casas de bolsas con aire a la inversa ocurrirá un ciclo similar que consiste en interrumpir el flujo de gas y permitir que el polvo se asiente antes de que empiece la acción limpiadora. Se debe añadir una capacidad adicional de filtración a las casas de bolsas con aire a la inversa para compensar por la porción que se encuentre fuera de servicio por limpieza en cualquier tiempo.

La fuente de aire a la inversa será un ventilador, ese equipo será instalado por separado y será necesario para suministrar el aire limpio y seco para los compartimientos.

### Figura 31.

*Ejemplo del sistema de aire a la inversa*



Nota. Sistema de limpieza por agitación. Obtenido de K. Woodard. (1998). *Documento de técnicas de control de materia particulada fina proveniente de fuentes estacionarias*. p. 8. Timberlyne Center.

#### 4.4.3. Otros tipos de limpiezas

Según Woodard (1998), puede emplearse como un modelo de limpieza sustituto el modelo de limpieza sónica, por medio de la agitación se puede añadir energía, pero también se puede añadir energía vibraciones con espectro acústico, para ello es necesario instalar bocinas sónicas accionadas por aire comprimido, esas bocinas pueden instalarse como mínimo 1 por compartimiento de cada filtro o tamiz, de ser necesario se pueden instalar dos o tres, su rango de operación es de 125 a 550 Hz, su mayor rango o rango

eficiente se puede percibir en el rango de 125 a 160 Hz, por lo que producirán presiones de sonido de 120 a 140 decibeles.

La energía sónica podrá reducir la masa de polvo sobre las bolsas de manera considerable, pero también puede conducir a un aumento en la penetración de polvo a través de la tela. La penetración aumentada reduce la eficiencia de la casa de bolsas. Las bocinas sónicas son efectivas como equipo suplementario para algunas aplicaciones que requieren energía adicional para una limpieza adecuada. En ocasiones las bocinas sónicas son usadas como la única fuente de energía para la limpieza.

Según los datos de Woodard (1998), al instalar una bocina por compartimiento deberán limpiarse según el volumen de material procesado por lapsos de 30 a 45 minutos por un minuto de acción de la bocina, esta podrá impactar 75 psi de aire comprimido a los colectores, las medidas óptimas de los filtros o mangas a limpiar son de 12 pulgadas de diámetro y 35 pies de longitud, por lo que la bocina deberá estar instalada en una esquina superior. El valor de instalación de ese sistema podría ascender a \$ 14,000.00, las bocinas operarían a 125 Hertz empleando 75 psi de aire comprimido, por lo que cada bocina podría limpiar 8 500 pies cuadrados de tela.

#### **4.5. Instalación del filtro *jet pulse***

Luego de conocer el área de trabajo donde está la trituradora instalada se puede iniciar con la instalación del filtro, estas tareas y acciones son responsabilidad de la empresa que venderá el equipo a la cantera, estos equipos, por sus complejidades y magnitudes en volumen, deben ser trasladados con maquinaria especial y de la misma forma será necesario utilizar maquinaria de carga especializada para poder montarse la campana de

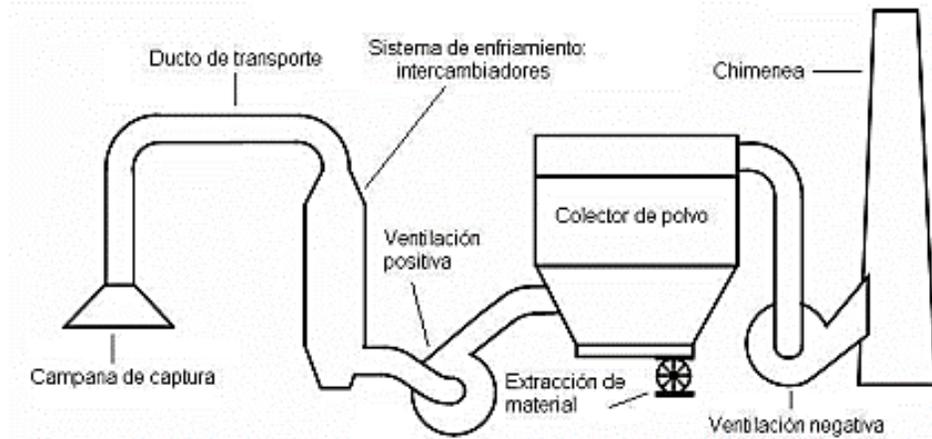
aspiración, ese punto es el principal y el de mayor criticidad, por el hecho de captar el gas contaminado con sedimentos de cal.

Las tuberías son los siguientes accesorios a instalar, no podrán ser colocados directamente en el suelo, por lo que es necesario colocar bases y pilones donde descansarán, la tubería en su interior puede alcanzar elevadas temperaturas, es por ello que necesitará sistemas de enfriamiento, el gas puede diluirse con aire ambiente, con la dilución de aire se puede incrementar el volumen del gas considerablemente, luego de ello será necesario instalar los intercambiadores, serpentines, compuertas de aire de dilución, torres de acondicionamiento.

La instalación será responsabilidad total de la empresa distribuidora y vendedora del filtro, ellos son quienes configuran los equipos a medida según las necesidades de la cantera, su personal es quien posee la capacidad y conocimiento de conectar los equipos generales, es por ello que el personal de la cantera podrá dar algún acompañamiento pero solamente para observar las acciones que se realizan, la garantía es el principal factor a cubrir con ello, por lo que el fabricante gira la garantía extendida al vendedor del equipo y el vendedor otorga la garantía final a la cantera, de tal forma que no se incorporará recurso humano, maquinaria o costos adicionales al valor de compra total del equipo.

**Figura 32.**

*Distribución general de la instalación*



*Nota.* Ejemplo de la instalación del filtro. Obtenido de A. Orrala. (2010). *Diseño de un sistema de extracción de material particulado de una planta de arena (tritución y clasificación de polvo)*. (p. 42). Universidad Politecnica Salesiana, Sede Cuenca.

#### **4.5.1. Selección del filtro eficiente**

Según la información presentada en las tablas 6 y 7, donde se identifica el material particulado de piedra caliza y polvo de cal, según el tipo operación presente en la cantera sería recomendable utilizar material para los filtros de tipo poliéster para configuración de concentración de polvo de 5 a 15 g/m<sup>2</sup> y relación aire tela de 1.82 m<sup>3</sup>/minutos. Ya que su volumen de procesamiento no supera las dos o tres toneladas al día, se puede instalar filtro de cuatro mangas o de cuatro compartimientos, con ellos sería suficiente el volumen de captación de material particulado.

Las bolsas que estarán bajo la tolva de recolección serán cuatro, según la configuración de los equipos se pueden llenar dos veces por día, el área de

acumulación de desechos finales deberá poseer una distancia relativamente corta para trasladar las bolsas y no desatender el trabajo en ejecución de la trituradora.

#### **4.5.2. Verificación de la instalación**

El personal de la cantera podrá acompañar todo el proceso de instalación, no será necesario otorgar personal propio de la cantera para trabajar en el proceso de instalación, esas tareas estarán bajo la responsabilidad total de la empresa que venderá el filtro *jet pulse*, la verificación será por fases y etapas según el proceso de instalación, tanto el personal de la cantera como el personal administrativo desconocen de la ejecución de tal instalación, por lo que será necesario recibir la inducción formal de lo que consistirá ese proceso por la empresa vendedora.

De no otorgarse la capacitación por la empresa vendedora se podrá asesorar con ingenieros profesionales y con experiencia en ese tema para que les otorguen el acompañamiento necesario y validar así en cada una de las etapas del proceso de instalación que se han cumplido los parámetros requeridos por la cantera conforme al material que será procesado. Finalmente, se podrá verificar que la instalación final cumpla con la oferta hecha por la empresa vendedora y que según sus manuales de equipos sean tal y como se requerían que fuera.

#### **4.5.3. Programación de los componentes**

Posteriormente a que ya se posee el equipo instalado se podrá proceder a la programación, configuración y pruebas primarias de todo el equipo, aunque la cantera no puede estar mucho tiempo detenida será necesario programar por

lo menos quince o veinte días desde que da inicio la instalación hasta que se cumplan por lo menos 48 horas de pruebas. La programación también será responsabilidad de la empresa que instaló todo el equipo, de lo contrario se podrían incumplir los contratos de compra y las cláusulas de garantías.

Para la programación sí puede participar personal de la cantera, ya que ellos son los que tienen los valores del procesamiento de material que estará siendo procesado en la trituradora. Al concluir el proceso de programación se dejará un tiempo mínimo necesario para que las pruebas sean positivas, de obtener valores negativos en función de la presión de aire interna, de mala instalación de tuberías o cualquier otro desperfecto, será obligación de los que instalaron los equipos reparar dichas fugas para que posteriormente se pueda generar el visto bueno e iniciar las operaciones generales de trituración y captura de material particulado.

#### **4.6. Instalación de los equipos auxiliares**

La instalación de los equipos auxiliares, como el equipo completo del filtro *jet pulse*, estará siendo diseñado, coordinado y ejecutado por la empresa que realice la venta a la cantera, no se podrá utilizar el personal de la cantera para esas tareas, ya que ellos desconocen ese campo de trabajo, sus funciones en la cantera conllevan extraer piedra caliza, remover los bancos de trabajo, colocar el material en las bandas transportadoras y generar constantemente material de aporte a la trituradora.

Los equipos auxiliares más conocidos para el filtro *jet pulse* son los sistemas de conductos o tuberías, el ventilador que podrá ser empleado para la limpieza inversa, el motor que tendrá en movimiento el compresor de aire, los arrancadores, los amortiguadores del sistema de distribución de tuberías, el

compresor, el transportador de tornillo que servirá para trasladar el polvo de cal que ya ha sido procesado y la chimenea, por lo que una completa instalación donde se requieren soldaduras para aluminio o soldaduras para otros materiales compuestos no puede ser ejecutada por el personal de la cantera, la configuración e instalación general serán responsabilidad limitada para el vendedor de los equipos.

#### **4.6.1. Verificación de las cajas a presión**

Por el tipo de filtro y por la configuración, la caja puede actuar como chimenea para contener los sedimentos, partículas y contaminantes que están siendo dispersos al medio ambiente, por lo que las cajas pueden ser instaladas de dos formas: la primera y le da mayor eficiencia es la que ya estaría siendo llevada a medida a la cantera y la segunda es la fabricación de la caja por el tipo de configuración final que se disponga, también podrá ser fabricada en la cantera.

La verificación consistirá que durante el arranque de los equipos y el periodo de prueba la caja no se deforma, puede expandirse, contraerse y presentar fugas en uniones, soldaduras u otros puntos débiles de su construcción. Tanto el personal de la cantera como el personal de la empresa que ha instalado los equipos deberán verificar conjuntamente que luego de las primeras horas de puesta en marcha las cajas mantienen la misma forma física y que no poseen fugas.

#### **4.6.2. Capacitación del personal responsable**

La capacitación para los responsables de la cantera es mínima, ellos no realizarán el diseño de los equipos, tampoco ejecutarán las instalaciones,

soldaduras ni la puesta en marcha, para ellos quedará esperar a que los equipos se instalen y se pongan en marcha, el personal que instalará los equipos debe poseer cierto nivel de capacitación. No será necesario capacitar al personal de la cantera sobre aspectos propios de instalación de las cajas a presión o de instalación de sus componentes, la capacitación sí podrá estar en función de las operaciones diarias con esos equipos, es importante que conozcan las alarmas, fugas o incidentes que se puedan dar durante la trituración de piedra caliza.

#### **4.7. Acciones de mantenimiento**

El monitoreo y la revisión constante es la principal herramienta del mantenimiento en el filtro y sus equipos auxiliares, mantenimiento en los equipos como tal será brindado por la empresa que instalará el filtro *jet pulse*, acciones típicas de limpieza superficial, retirar excesos de concentración de ceniza de cal u otros elementos que puedan bloquear salidas y accesos de aire deben ser algunas de varias tareas a ejecutar diariamente.

Las tareas de mantenimiento preventivo para el personal que labora en la cantera no podrán interrumpir sus labores diarias, es por ello que la cantera podrá definir si personal adicional puede ejecutar las acciones de lubricación, reparación, configuración de equipos y sustitución de piezas cuando sea necesario. Es necesario que se separen estas funciones, porque un empleado que ha sido contratado para trabajar con la trituradora para procesar N cantidad de material al día no podrá hacerse responsable de reparaciones en tuberías, equipos auxiliares u otros dispositivos de medición en el filtro.

El fabricante del filtro *jet pulse* propone ciertas tareas cada cierto tiempo de trabajo, pero la estimación de esas tareas con las tareas a realizar deberán

recibirse al momento de instalar los equipos, mientras se desconozca el sentido real de cómo se operara con el filtro *jet pulse* se podrán desconocer las actividades específicas del mantenimiento, se puede agregar al listado de tareas diarias al personal actividades como monitoreo, limpieza y reportes de fallas que se originen en el día a día, luego de eso será oportuno por la administración de la cantera asignar a su propio personal el realizar dichas operaciones.

#### **4.7.1. Acciones preventivas de limpieza**

Los accesos y salidas del sistema de aire son puntos críticos, por lo que será importante que se encuentren libres en todo momento, la tubería por ser metal debe ser limpiada con aire a presión o con paños libres de químicos y libres de humedad, otras partes externas del filtro son libres de mantenimiento, las carcasas de todo el sistema de tuberías, equipos auxiliares y dispositivos de medición pueden ser limpiados una vez al día, pero no podrán utilizarse detergentes, agentes químicos o solventes, ya que eso podría comprometer la integridad de los mismos.

Toda acción preventiva con uso de limpieza servirá para que los filtros puedan trabajar eficientemente, los motores que impulsarán otros dispositivos pueden limpiarse superficialmente, tareas propias del mantenimiento como lubricación, engrases o sustitución de piezas quedarán en espera de ser autorizadas por las autoridades de la cantera. Los trabajadores participarán en capacitaciones para mejorar sus tareas diarias que incrementen sus índices de limpieza, tanto en sus estaciones de trabajo, en acciones de monitoreo y acciones reactivas, de ser necesario al presentarse acumulación de ceniza de cal u material particulado.

#### **4.7.2. Monitoreo de mangas filtrantes**

El área de las mangas filtrantes poseerá un sistema cerrado, es por ello que se le ha nombrado como la caja a presión, dentro de esa área las mangas estarán colocadas en serie con cuatro compartimientos, según los datos del fabricante se pueden monitorear dos a tres veces al día, eso requerirá que se abra el compartimiento y se verifique que las mangas están en su posición, que no presentan daños en su estructura como roturas, agujeros u otros daños que comprometan el tamizado del material particulado. Para retirar el exceso de escarcha de cal se utilizará la inyección inversa de aire con un ventilador.

Estas acciones pueden realizarse dos a tres veces al día, ya que monitorear esas áreas requerirá de un tiempo estimado de 10 a 15 minutos, por tres veces al día puede representar 45 minutos a una hora improductiva del equipo. La configuración final de esas actividades puede ser programada al estar el equipo en ejecución, los equipos nuevos y sus elementos difícilmente necesiten altos índices de monitoreo, luego de seis meses de trabajo constante ya se podrán incorporar nuevos ciclos de monitoreo, para que el tiempo de producción semanal no se vea afectado con esos paros durante la jornada laboral.

#### **4.7.3. Seguimiento en las mejoras de materiales filtrantes**

De utilizar mangas a base de fibras de vidrio será necesario ver los índices y volumen de producción, para realizar una comparación real se deberá sustituir el material de las mangas en tiempo futuro, de lo contrario solamente se tendrán los valores reales por emplear materiales filtrantes de fibra de vidrio. El fabricante del filtro *jet pulse* dispone de posibles combinaciones de mangas que se puedan ajustar a la necesidad de la cantera, los costos y valores de compra

son los que pueden variar, si el material posee mayores tecnologías para capturar el material particulado así será el costo de compra.

Utilizar materiales con mayores ventajas de retención de ceniza de cal permitirá a la cantera recuperar más material que estaría siendo lanzado al medio ambiente, con ello se limita el porcentaje de contaminación y de descargas, pero se incrementa el volumen de recuperación. Ese material se podrá comercializar como material de segunda para obtener un retorno económico.

#### **4.8. Gestión ambiental y su implementación**

Mitigar por completo las descargas hacia el medio ambiente es la tarea clave de la gestión ambiental, evitar que desechos comunes se mezclen con desechos provenientes de la trituración es la siguiente tarea, que el personal se comprometa a trabajar con respeto al medio ambiente y haciendo eficientes las normas de gestión ambiental es la tercera tarea en la cantera. La administración como tal no puede llegar a sus metas de preservación del medio ambiente sin el compromiso de todo el personal en la cantera, para ello el trabajo en equipo será el principal objetivo.

En la cantera se han clasificado y separado los desechos según el destino final, la implementación de las nuevas acciones consistirá en el manejo responsable de las bolsas de material particulado recuperado de las mangas de los filtros, ese material estará siendo resguardado en una bodega donde no estará en contacto con el medio ambiente y donde sus desechos se puedan entregar a una empresa responsable para su disposición final, pero se ha presentado la iniciativa de que esos desechos pueden ser comercializados con otros sectores industriales, empresas que fabrican *block* pueden comprar el

material, así como areneras y viveros, las areneras lo pueden emplear como material de aporte a su producto base y los viveros lo podrán utilizar como agregados para sus abonos.

Para el sector de agroquímicos también puede servir en el uso de productos que erradican plagas y vegetaciones en campos de cultivos. En general, la gestión ambiental consiste en aprovechar los recursos que antes estaban siendo expulsados al medio ambiente, la captación de ellos implicará la inversión de los equipos, pero su retorno se podrá validar con las cero emisiones al medio ambiente y con las ventas de ese producto que está siendo capturado, concentrado y embalado.

#### **4.8.1. Tareas diarias para el manejo de los desechos de piedra caliza**

El operario responsable de la trituradora, y quien posiblemente sea el responsable de los desechos que se recolectarán en el filtro *jet pulse*, deberá verificar que las bolsas de captación no sobrepasen su nivel máximo, evitar caídas y fugas en la zona o tolva de captación, de llegar a su nivel óptimo será retirada la bolsa, podrían emplearse bolsas con capacidad de cincuenta a cien libras, dependerá de cuánto se pueda procesar al día, luego se trasladará a la bodega de productos terminados.

Los lotes que se procesen diariamente deberán ser registrados con fecha y número de correlativo, esa información se trasladará vía correo o con material impreso a la administración de la cantera para que se actualice el inventario constantemente, si el día presenta lluvias se deberá cubrir la bolsa del material recuperado para que no se comprometan sus propiedades físicas y químicas. Cuando el material en cuestión ya sea vendido se despachará desde la bodega

al vehículo del comprador, la cantera no se responsabilizará en trasladar esa mercadería.

#### **4.8.2. Monitoreo y aprovechamiento de los desechos generales de la cantera**

Los desechos minerales y desechos de ceniza de cal o desechos de material particulado pueden generar retornos a la cantera, los bancos de tierras poseen diversos beneficios químicos y minerales que podrán ser explotados en beneficio del aprovechamiento general, los bancos de tierras que han sido removidos y que sus desechos sean tierras fértiles se pueden vender a otros sectores agrícolas.

El monitoreo constante por los trabajadores de todas las áreas de trabajo permitirá que la administración en si posea informes diarios y actualizados sobre las diversas acciones que se realizan, cuando alguno de los trabajadores posea alguna queja sobre otra estación de trabajo podrá realizar su observación por medio de correo interno. El monitoreo como una acción preventiva impulsará las acciones comunes en la cantera hacia un nuevo modelo administrativo, preservando el medio ambiente y cumpliendo con los protocolos exigidos por el MARN.

#### **4.8.3. Tareas mensuales de los desechos finales**

Los desechos finales que no puedan ser comercializados podrán venderse como material de tercera categoría a otras empresas que sí lo puedan utilizar. Luego de permanecer un mes en las bodegas y que no se puedan vender se deberá contratar alguna empresa que deseche estos materiales responsablemente, ya no se podrá utilizar el servicio de recolección municipal

ya que ellos no poseen protocolos de incineración o compostaje con el material particulado que fue recuperado.

Por eso las tareas mensuales estarán condicionadas al buen manejo de los desechos recuperados, las buenas prácticas para el traslado interno entre áreas comunes, el buen resguardo en las bodega de la cantera y el despacho final donde se verifique que las bolsas no poseen agujeros, cortes o puntos de fugas. Quedará prohibido que los trabajadores sean los responsable de trasladar los desechos hacia otros lugares que no sean las propias instalaciones de la cantera, aunque se reconozcan como desechos finales derivados del procesamiento de piedra caliza no podrán ser mezclados o desechados en otras áreas de la cantera, ante acciones negativas sobre estos protocolos se podrá sancionar internamente a los trabajadores.

#### **4.8.4. Verificación mensual según los requisitos del Ministerio de Ambiente**

La bitácora de recolección de las empresas que han retirado los desechos finales será una herramienta básica para la cantera, el MARN podrá realizar visitas de inspección sin previo aviso, por lo que los puntos débiles a verificar serán el área de la trituradora, las zonas de recolección de los desechos y la bodega donde se agruparán las bolsas con polvo de ceniza. El MARN no ha establecido otros requisitos especiales o específicos más que mejorar las acciones de procesamiento de piedra caliza, con la instalación del filtro *jet pulse* se contendrá por completo le emisión de partículas contaminantes al medio ambiente, la permanencia y perfecta ejecución de ese modelo evitará cualquier tipo de sanción.

#### 4.9. Actividades de evaluación de las capacitaciones

Para la medición del desempeño se diseñaron dos boletas de evaluación, una de ellas se centrará hacia la evaluación del programa de capacitación en general y la segunda servirá para evaluar el contenido del curso. Las boletas deberán llenarse al concluir cada ciclo de capacitación, si no se presentan los participantes se podrá capacitar por grupos mayores a tres personas, pero no excediendo cinco participantes.

La intención de la evaluación es construir un juicio crítico acerca del programa, de los alcances y de las actividades que se están desarrollando para conocer sobre el filtro *jet pulse* y sus tareas preventivas diarias. Los resultados podrán ser analizados por los jefes de área y los supervisores de estaciones de trabajo.

**Tabla 12.**

*Boleta para evaluar el contenido del curso*

| <b>Evaluación del contenido del curso</b>  |                    |          |
|--|--------------------|----------|
| Nombre del participante:   |                    | Fecha:   |
| Responda a los siguientes cuestionamientos   |                    |          |
| ¿Considera que el contenido del curso le creó un conocimiento básico y general del filtro <i>jet pulse</i> ? |                    |          |
| En gran parte  | Hasta cierto punto | Muy poco |
| ¿Considera que el contenido del curso es de su aplicación en su labor diaria?                                |                    |          |
| Si   | No                 |          |
| ¿Considera que los temas de medio ambiente son importantes?  |                    |          |
| Si   | No                 |          |

*Nota.* Presentación de boleta de evaluación del contenido del curso. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

Por medio de la boleta de evaluación del curso se medirá el grado de conocimiento adquirido por los participantes conforme las expectativas del desarrollo del programa de capacitación, es necesario indicar que no hay respuestas malas o indicadores negativos, la generación de esos valores servirá a los participantes y sus autoridades para mejorar todas aquellas acciones necesarias para trabajar con mayor eficiencia en sus puestos de trabajo. Los datos finales se compartirán en los resultados de las capacitaciones con un conjunto de gráficas que representarán el comportamiento general del clima que logró alcanzar con resultados positivos.

**Tabla 13.**

*Evaluación hacia el capacitador y manejo del tema*

| <b>Evaluación del instructor</b>   |         |      |
|--|---------|------|
| Nombre del participante:   | Fecha:  |      |
| Responda a los siguientes cuestionamientos   |         |      |
| ¿Considera que el instructor domina los temas relacionados con el <i>jet pulse</i> ? |         |      |
| Excelente  | Medio   | Nada |
| ¿Cómo considera la presentación de la capacitación?                                  |         |      |
| Buena  | Regular | Mala |
| ¿Cómo evalúa las técnicas de presentación y desarrollo del tema por el instructor?   |         |      |
| Buena  | Regular | Mala |

*Nota.* Presentación de boleta de evaluación del instructor. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

La intención de evaluar al capacitador permitirá diseñar estrategias para que los temas puedan ser trasladados con mejores técnicas y herramientas, los participantes que evalúan negativamente al capacitador deben abordarse individualmente para identificar cuál es su perspectiva acerca de lo que se vivió en el periodo de capacitaciones y de eso diseñar soluciones hacia los siguientes ciclos de capacitación. El instructor podrá ser algún profesional de la empresa que instale el filtro *jet pulse* o utilizar a algunos de sus supervisores

para que se capacite en los temas generales para luego capacitar a sus compañeros de trabajo.

#### **4.9.1. Evaluación del aprovechamiento de equipo *jet pulse***

Consistirá en evaluar dos escenarios post instalación del equipo *jet pulse*, las descargas que actualmente se generan al medio ambiente no pueden ser cuantificadas, posiblemente se puedan identificar valores estimados de ceniza de cal suspendida en el medio ambiente, luego de su instalación y generar la acumulación de los desechos de ceniza de cal con las mangas y los filtros se pueden traducir a volúmenes reales, por medio del pesaje de los desechos que fueron captados diariamente se obtendrán los primeros valores del aprovechamiento de instalar el equipo.

Las ventas de esos materiales serán el segundo índice de interés para la cantera, transformar los desechos al medio ambiente en retorno económico a la cantera será uno de sus verdaderos aprovechamientos.

#### **4.9.2. Evaluación de operaciones y manejo del equipo**

El trabajador responsable del monitoreo y las operaciones del filtro es quien deberá ser evaluado periódicamente, con malas acciones o ineficiencia en el control de los instrumentos se podrá comprometer todo el equipo, las lecturas, aunque poco complejas, de los medidores de presión y de los niveles de llenado de bolsas, pueden ser rutinarias, aunque la mala ejecución de esas tareas podría generar retrasos en la producción, contaminación por fugas de material particulado o exceder los niveles de presión dentro de las tuberías.

El manejo de los equipos puede asignarse al personal que demuestre mayor capacidad operativa, pero si un trabajador no conoce las acciones que se realizan en la trituradora, en especial, no podrá quedar como el responsable del filtro *jet pulse* y sus equipos auxiliares, colocar a la persona con mayor capacidad será uno de los retos en la cantera, sus evaluaciones podrán ser programadas por día, semana y mensualmente.

#### **4.9.3. Evaluación de los trabajadores de cantera**

Los trabajadores de la cantera ya son evaluados con protocolos internos de la empresa, el registro histórico de sus resultados es resguardado mensualmente, aquellos trabajadores que presentan nuevas tareas con la instalación del filtro *jet pulse* deberán evaluarse conforme a sus nuevas funciones a ejecutar, es importante reconocer que las tareas a evaluar serán sobre la ejecución eficiente de sus nuevas funciones, las mismas que se relacionan con la operatividad de los equipos y la reducción de emisiones contaminantes al medio ambiente. Los trabajadores, conforme a sus actuales tareas, no han sido calificados negativamente según informes internos de la empresa, el mismo comportamiento y resultados se esperarían en función de sus nuevas actividades.

#### **4.10. Costos a analizar de implementar la gestión**

El costo de mayor impacto hacia la cantera es el valor del filtro *jet pulse* y los equipos auxiliares, es por ello que la cantera por medio de la representación general de la empresa podrá solicitar cotizaciones de diferentes ofertantes, fijando como requerimientos especiales que la empresa vendedora sea quien instale el equipo, además de ello que realice las configuraciones necesarias

para procesar la piedra caliza y sea quien realice los mantenimientos primarios en el próximo año de su instalación.

La finalidad es que que la cantera pueda reducir otros costos asociados a la puesta en marcha de los equipos, de lo contrario deberá capacitar a su personal para que instale los equipos y sea su personal quien realice la configuración, arranque y puesta en marcha, pero se estaría exponiendo a su propio personal a correr con toda la responsabilidad por una mala configuración de los equipos y cualquier desperfecto, error involuntario, pérdidas de equipos, malas configuraciones y retrasos con las pruebas piloto, lo cual será exclusivamente absorbido por la cantera.

Esos costos impactarán negativamente en los índices productivos anuales de la cantera, por ello, la administración debe ser exigente al adquirir un equipo que pueda estar valorado en Q75,000.00 hasta alcanzar los Q 100,000.00, los costos o pérdidas por retrasos de producción serán absorbidos por la cantera. Durante la instalación, que en promedio de tiempo puede ser 10 a 12 días, no podrá estarse produciendo cal, pero la planilla de trabajadores seguirá corriendo en pagos, esos costos son pérdidas directas, ese panorama en general es lo que se deberá evaluar con la implementación de la gestión, es necesario abordar el problema para asignar tareas paralelas a las que ya tienen programadas los trabajadores y así aprovechar su tiempo de trabajo diario.

#### **4.10.1. Costos por instalar el equipo seleccionado**

La instalación no será responsabilidad de la cantera, el personal operativo desconoce sobre los procesos de unión, soldadura y puesta en marcha de esos equipos de filtro *jet pulse*, por ello sus costos reales serán mutados hacia las pérdidas por tener detenida la trituradora. La explotación de

los bancos de tierras puede continuar normalmente, solo que será necesario acumular la piedra caliza que está siendo extraída en puntos cercanos a la trituradora. Durante la instalación de los equipos el personal no podrá interrumpir sus labores, pero los trabajadores que son asignados a la trituración en especial podrán formar parte del equipo de monitoreo provisto por la cantera en la supervisión de la instalación de los equipos.

#### **4.10.2. Costos del mantenimiento programado**

El mantenimiento programado deberá ser diseñado y establecido por el fabricante, la empresa que instala el equipo tiene como responsabilidad otorgar manuales de acciones a realizar bajo una programación preestablecida, con esos equipos no se pueden realizar tareas de mantenimiento por conocimiento propio ya que se pueden ver dañados los equipos, tuberías, piezas móviles, instrumentos de medición y la configuración general del sistema de presión.

Los costos podrán ser fijados luego de que se conozca el programa de mantenimiento del fabricante, además, se esperaría que la empresa que instala el equipo realice una propuesta de costos adicionales para que ellos sean quienes se presenten a darle los mantenimientos al filtro *jet pulse*. Nuevamente se recalca que los trabajadores de la cantera han sido contratados para el procesamiento de la cal, no para ejecutar actividades de mantenimiento correctivo y preventivo al nuevo equipo.

#### **4.10.3. Costos de operación según el equipo seleccionado**

Según los valores del fabricante del equipo *jet pulse* y su configuración de la tela a emplear pueden generarse costos de operación por hora de Q 750.00. La relación de ese costo está distribuido en función de los equipos en

operación y la cantidad de material que se estará procesando, no se incluye en ello el costo de mano de obra de la persona a cargo y responsable del buen funcionamiento de la trituradora.

El filtro *jet pulse* con las mangas de tela seleccionadas permitirá que la cantera mejore sus índices de procesamiento de piedra caliza. Se estima que la emisión de pérdidas por material disuelto que podría salir expulsado durante la trituración será una recuperación valiosa al sistema de procesamiento, esas pérdidas que aún no tenía estimadas la administración marcarán nuevos valores en sus ventas.

Las operaciones al día pueden mejorar, según el volumen de material de aporte a procesar y la configuración final que se otorgue al sistema de filtración con sus equipos auxiliares, lo cual permitirá que sus costos de operación disminuyan al incrementar el volumen de material procesado. Todo incremento en material recuperado y material procesado será una ventaja para la cantera, pero si el sistema presenta fugas de partículas, caídas de presión u otros desperfectos se reconocerán como pérdidas.



## 5. SEGUIMIENTO

### 5.1. Beneficios de instalar los filtros de succión *jet pulse*

Dentro de infinitos escenarios, la cantera obtendrá beneficios inmediatos ante su zona de incidencia de explotación de minerales, la reducción total de descargas hacia el medio ambiente permitirá evitar cualquier tipo de sanción por el MARN o por otras oficinas administrativas legales del área de donde se está trabajando con el procesamiento de cal. La recuperación del material que es expulsado al medio ambiente promete ser retorno económico, el aprovechamiento de los equipos y la perfecta configuración podría incrementar el volumen de procesamiento de piedra caliza en un periodo determinado.

Los filtros *jet pulse* otorgarán una nueva carta de presentación de la cantera hacia sus clientes ya establecidos, pero mejorará su imagen productiva ante diferentes sectores comerciales que podrán estar interesados en generar nuevos contratos y proyectos de procesamiento de cal, esos escenarios y sus variables permitirá mejorar el sistema productivo en general, y para el perfecto funcionamiento el monitoreo será algo vital.

Mejorar el volumen de procesamiento de piedra caliza, pero incorporar un nuevo segmento de producto procesado como lo será la ceniza de cal recuperada por las mangas, es una ventaja, ese beneficio podría expandir sus inversiones y sus relaciones comerciales. Se estimaría que semanalmente pueden llegar a comercializar hasta 2 toneladas de ceniza de cal que antes solamente era descargada el medio ambiente.

### **5.1.1. Reducción de contaminantes al medio ambiente**

Los beneficios por la reducción de emisión de contaminantes en la zona de trituración y en general en la cantera serán inmediatos desde que se instale el filtro *jet pulse*, la intención general del proyecto es trabajar con cero emisiones. Aquellas bajas emisiones que puedan aún persistir se podrán controlar con limpieza diaria, algunas de las ventajas del nuevo sistema de contención de partículas incluyen que las de mayor peso y densidad quedarán disipadas sobre los equipos.

La zona adyacente a la cantera será la de mayores beneficios obtenidos, el medio ambiente en general dejará de percibir esas descargas de ceniza de cal que se vertían a diario, la vegetación que podría ser afectada por la reacción química volverá a crecer con menores complicaciones, los afluentes, ríos y otras fuentes hídricas mejorarán sus condiciones, esas ventajas representarán la reducción de contaminantes en un 99.99 % teórico, según los datos del fabricante del filtro *jet pulse* y la configuración en las fibras de las mangas a emplear.

### **5.1.2. Reducción de contaminación por partículas suspendidas**

Otro de los beneficios para el medio ambiente en general es la reducción total por emisión de partículas suspendidas, el hecho de instalar los filtros permitirá que se evite por completo continuar con las descargas al medio ambiente desde la zona de trituración. La cantera posee otros puntos que puedan generar contaminación por partículas de piedra caliza, pero esos desechos son de mayor volumen y peso, por lo que su dispersión hacia la

atmósfera puede ser considerada de bajo impacto. Las partículas suspendidas estarán siendo atrapadas por los filtros, ya no se trabajará hacia el cielo abierto.

## 5.2. Análisis de reportes semanales

Cada reporte deberá contener información acerca del monitoreo de los equipos, acciones que se presentaron en cada estación de trabajo, cantidad de material que se procesó, cantidad de material que se recuperó por el filtro, cantidad de bolsas que fueron recolectadas desde la tolva de llenado, los reportes se podrán llevar a mano o con dispositivos digitales, la empresa adoptará el que represente mayores ventajas.

**Tabla 14.**

*Formato de reportes semanales propuesto*

|   |   |             |                                   |   |   |   |  |
|---|---|-------------|-----------------------------------|---|---|---|--|
| Nombre del responsable:   |   | Fecha:      |                                   |   |   |   |  |
| Estación de trabajo:  |   | Supervisor: |                                   |   |   |   |  |
| ITEM  | L | M           | M                                 | J | V | S |  |
| Fugas   |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Reparaciones  |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Exceso de material  |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Uniones   |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Juntas  |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Instrumentos de medición  |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Puntos de lubricación   |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Sustitución de piezas   |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Observaciones: el presente instrumento servirá a la cantera para anotar con un cheke si durante la semana si fue necesario realizar algún tipo de reparación por día, o si alguno de los ítems colocados presentó irregularidades, en este espacio se deberá anotar brevemente que fue lo que se realizó o sucedió. |   |             |                                   |   |   |   |  |
| Realizado por Marvin Castillo   |   |             | Firma de quien realiza el reporte |   |   |   |  |

*Nota.* Ejemplo de boleta de reportes semanales. Elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

En cada área de trabajo de la cantera se puede emplear el formato de reportes, es importante asignar a una persona de la cantera que ejecute dicha acción sin opción a perjudicar la evaluación de su compañero de trabajo. También se podría optar para que cada uno de los trabajadores de cada estación lo puedan realizar, pero tienen que desempeñarse objetivamente. El análisis de los reportes semanales podrá delimitar si existen fallas en el sistema completo, también servirá para identificar zonas que comprometan la reducción de emisiones de ceniza de cal hacia el medio ambiente.

#### **5.2.1. Reporte de contención en filtros manga**

El trabajador o los trabajadores que asignen para trabajar en la estación de la trituradora y que sean los responsables de las operaciones que se realizarán en los filtros de mangas deberá ingresar su bitácora diaria, el reporte debe consignar los datos más importantes. Las fugas serán las principales observaciones a anotar, el volumen de material recuperado desde los filtros de mangas hacia las bolsas será el siguiente ítem, verificar que los instrumentos de control de presión se encuentren en los rangos para los que fueron configurados es otro punto importante a reportar.

Los reportes se trasladarán a diario, ya que esa área es una de las más críticas, en los filtros es donde se concentrará la mayor presión del sistema, la acumulación de escarcha de cal, así como la posibilidad de que las mangas puedan corromperse por diferentes motivos. Por ello estos reportes servirán de análisis para que la empresa anote su tiempo de uso, tiempo de recolección de material particulado, cantidad de material que fue retenido y condiciones propias de los telares. La autoridad inmediata superior de la persona que se encuentre responsable del área de filtros deberá generar el acompañamiento

necesario para discutir cualquier tipo de inconveniente o alarma que haya sido reportada.

### **5.2.2. Pesaje de desechos recolectados en los filtros**

En la cantera disponen de básculas de pesaje, cada bolsa que estará siendo captada desde el filtro se deberá llevar a pesar, ese valor se anotará en los registros de la zona de pesaje y en los registros de la zona de filtros. Es importante que al final de un ciclo de acumulación los valores coincidan, no se podrán obtener diferentes mediciones de peso porque el personal de ambos puestos estará presente al momento del pesaje.

Los valores del pesaje servirán a la administración para diferentes análisis, el primer análisis es para obtener un dato exacto de la reducción y contención de emisiones contaminantes que fueron procesadas en un cierto periodo de tiempo, el segundo análisis es por obtener los valores económicos sobre las ventas de esas cargas que fueron procesadas y que anteriormente simplemente se perdían como material particulado hacia la atmósfera, y el tercer valor servirá para analizar la eficiencia de procesamiento y eficiencia de captura de ceniza de cal por las mangas del filtro.

### **5.3. Verificación de la gestión ambiental**

El personal de la cantera, sin importar cuál sea su puesto, sus atribuciones y su cargo, deberá velar y garantizar por el cumplimiento de la gestión ambiental en la cantera. Todas aquellas actividades que representen daños al medio ambiente deberán evitarse, lanzar desechos en puestos y zonas de trabajo estará prohibido, así como mezclar desechos comunes con desechos contaminantes. De conocerse una mala práctica se deberá reportar al inmediato

superior para su debido seguimiento, la gestión ambiental no podrá llevarse a cabo sin el trabajo en equipo. Aunque la cantera evite continuar con las descargas al medio ambiente, pero sin el compromiso correcto, todo seguirá igual.

Antes de iniciar labores, el personal, sin importar su puesto o zona de trabajo, tendrá como tarea validar en su recorrido que no se presenten desechos de cualquier tipo, de ser necesario podrá levantar y movilizar los desechos y trasladarlos hacia la zona de acumulación final, si alguno de los trabajadores monitorea y visualiza fugas en tuberías, uniones, juntas, filtros o cualquier área del sistema de filtro deberá reportarlo inmediatamente con la finalidad de contener la fuga.

### **5.3.1. Desechos recolectados**

Todos los desechos que se recolecten de las estaciones de trabajo, pero que no sean material de aporte de piedra caliza, ceniza o polvo de cal, deberán ser colocados en las zonas de desechos comunes, pero es necesario verificar y validar que no son desechos contaminantes como químicos, desechos inorgánicos o desechos derivados de los plásticos. La cantera ya posee un eficiente sistema de recolección de desechos, sobre ese mismo modelo se continuará operando diariamente.

Los desechos que se recolecten, pero que en esencia sean derivados de la piedra caliza o resultados de la trituración, deben ser acumulados con los materiales que se recolectan en las bolsas de los filtros de mangas. Si los desechos se mezclan con tierras de la cantera se deberán separar, la disposición final para esos desechos puede ser por medio de la contratación de una empresa externa que sea la responsable de incinerarlos o adicionarlos a

otros procesos industriales como materiales de aporte. La cantera solamente estará actuando con la venta de la cal procesada y los sedimentos recuperados desde los filtros como material de cal de segunda, otros tipos de desechos sí deberán ser recolectados por profesionales en su materia.

### **5.3.2. Materiales contaminantes recolectados**

Los materiales contaminantes en su mayoría pueden procesarse con la explotación de los bancos de tierras, la trituración de la piedra caliza no demanda material de aporte o agregados para su procesamiento, otras áreas de la cantera podrán acumular recipientes con lubricantes y grasas, pero sus desechos son acumulados con los residuos que se envían con una empresa externa que visita la cantera dos veces por semana y retira esos desechos.

Es importante que se embalen correctamente todos los depósitos que contengan materiales contaminantes para evitar contaminación cruzada con suelos y zonas de trabajo, con la ejecución responsable de esas tareas se evitará dispersión de materiales contaminantes por las instalaciones generales de la cantera.

### **5.4. Costos por mantenimiento a los filtros de succión *jet pulse***

La empresa que instalará el filtro *jet pulse* será la responsable de otorgar los mantenimientos, esto dependerá de las acciones a realizar. El vendedor establece que, si el mantenimiento preventivo requiere de tareas propias de ajustes, engrases, cambios de uniones, soldaduras o sustitución de piezas móviles pequeñas, puede estimarse un rango de Q 7,500.00 a Q 12,000.00.

Pero si el mantenimiento requiere sustitución de equipos auxiliares, los costos no pueden ser cuantificados hasta que se establezca claramente qué tipo de tareas se deberán realizar y qué cantidad de equipos es necesario que se sustituyan. Si los equipos aún pueden ser reparados, sus costos de mantenimiento pueden descender, ese panorama es incierto por el tipo de equipo y por la ausencia de valores históricos.

#### **5.4.1. Mano de obra**

La cantera no colocará a su personal a realizar actividades de mantenimiento o reparaciones en los equipos, por lo que el costo de mano de obra correrá exclusivamente hacia la empresa que realizó la venta del equipo. La mano de obra para la cantera será la misma, solamente que se deberá buscar actividades sustitutas durante el tiempo que se encuentre detenido el equipo. Si la administración de la cantera evalúa y considera que es necesario colocar a su recurso humano como apoyo a las actividades que se realizan en los mantenimientos se podrá asignar uno o dos trabajadores.

#### **5.4.2. Materiales**

En la cantera se contendrán materiales de intercambio rápido para los equipos auxiliares y el sistema completo del filtro *jet pulse*, el inventario estará delimitado según previo análisis que permita identificar tuberías, juntas, uniones y los propios filtros que representen poseer vulnerabilidad ante daños por abrasión, aplastamiento, cortes o separación. Esos materiales pueden estimarse hasta que el equipo sea instalado y mediante intercambio de ideas el equipo que instale el equipo brinde mayor información sobre ese equipo y sus fallas comunes.

Los materiales que se desea disponer en bodega de repuestos deberán ser resguardados con las medidas óptimas de preservación, al poseer esos materiales quedará hacia la cantera un valor de resguardo que se sumará constantemente hasta que sean colocados conforme las necesidades que se presenten. En su mayor necesidad por el tipo de daño que puedan sufrir por el desgaste diario, se posicionarán otros filtros de mangas, el fabricante establece que el tipo de fibra puede ser de alto beneficio o complejo por fallas constantes.

### **5.5. Estadísticas**

Los informes generados de los desechos y del material particulado servirán para crear estadísticas descriptivas, con fórmulas de media aritmética, percentiles y cuartiles, así se podrán estudiar los comportamientos de la producción de la trituradora, con el material recolectado que servirá como un nuevo indicador a los análisis de la empresa, para obtener nuevos criterios acerca de ese retorno con la venta de la ceniza de cal a otras empresas. Las estadísticas permiten a la cantera apoyar con sus estados de resultados el porcentaje de ganancia por cada año laborado.

Las estadísticas pueden evidenciar si el filtro *jet pulse* estará cumpliendo con su diseño especial el de contener las partículas y evitar que esas descargas continúen en el ambiente, es viable que se analice por trimestres todos los valores generados por acciones de monitoreo, total de bolsas utilizadas para recuperar material, cantidad de filtros de manga sustituidos, como sus índices de mantenimientos, fallas, reparaciones o sustituciones de piezas en equipos auxiliares. Con el análisis gráfico de los valores generados se genera un nuevo escenario para determinar cuáles valores son bajos sobre la producción estimada y cuáles lograron sobrepasar la meta fijada.

### **5.5.1. Estadística descriptiva de los valores recolectados**

La importancia de describir con exactitud cuáles valores y datos fueron recuperados desde los filtros con el uso de bolsas permite a la cantera trasladar el valor de los desechos a valores monetarios, ya que los materiales recolectados dejarán de perderse en el medio ambiente podrán ser parte de una nueva cartera de clientes.

La estadística descriptiva permitirá que la administración de la cantera evalúe si los datos del material recuperado han generado ganancias después de las actividades, es decir, si la inversión con su retorno sobre las ventas aumenta el porcentaje de ganancias o quedará más como un punto de equilibrio, o también si terminaría siendo un valor de pérdidas por el uso de todos los equipos del filtro más la mano de obra y la asignación de nuevas tareas a los trabajadores.

### **5.6. Auditorías**

Es necesario que el uso y aprovechamiento del filtro *jet pulse* sea monitoreado, evaluado, acondicionado y que genere datos históricos, por lo que las auditorías son acciones fundamentales en el aprovechamiento de los recursos disponibles, pero especialmente en el aprovechamiento y control de los recursos asignados, ya sea recurso humano, económico, de tiempo, de maquinaria y equipo.

Cada auditoría podrá estar fijada en un solo objetivo o en varios objetivos, si la auditoría se desarrolla para establecer si el filtro *jet pulse* ha sido aprovechado en su máxima capacidad o si los desechos recolectados son cantidades óptimas, permitirá diseñar nuevas estrategias y soluciones para

mejorar sus índices de trituración, recolección, mitigación en descargas de contaminantes y acumulación de volumen de desechos.

Es determinante y crítico asignar el rol de la figura responsable para realizar las auditorías, desconociendo si la administración de la cantera optaría por apearse al proyecto o no, se debería coordinar con los supervisores de área para ejecutar el levantado de información, inspección y control de lo que se desea monitorear. La o las personas que realicen las actividades propias de la auditoría deberán realizar dichas actividades sin sesgos y con el mayor profesionalismo, no se podrán ocultar malas prácticas de sus compañeros de trabajo, tampoco se podrán generar informes que sean intencionales para dañar la imagen y las competencias de alguien, las auditorías serán objetivas y específicas.

#### **5.6.1. Auditoría interna**

Evaluar los procesos internos por personal de la cantera es una de las metas luego de instalar el filtro *jet pulse*, las auditorías internas consistirán en utilizar los mismos instrumentos de monitoreo y de medición que utilizan los trabajadores por cada estación asignada, pero se levantará la información por parte de las personas que fueron asignadas a realizar esas tareas. Cada auditoría interna puede llevarse a cabo una vez por semana, se definirá conforme el tráfico de trabajo y la cantidad de movimiento que se presente luego de incorporar los nuevos equipos, eso representa mayores áreas de monitoreo y mayores actividades para verificar.

### **5.6.2. Auditoría externa**

La auditoría externa deberá realizarse por medio de empresas externas, por lo que representa otros costos adicionales a la cantera. La figura de una empresa externa es para monitorear, evaluar y generar un informe total sobre los puntos evaluados, a diferencia de la auditoría interna que podría generar informes sesgados por el grado de compañerismo, por lo que al utilizar personal externo a los trabajadores de la cantera se podría garantizar que ellos no evaluarían con afán de perjudicar a los trabajadores ahí presentes.

La auditoría externa también podría ser llevada a cabo por la empresa que instaló el filtro *jet pulse* y los equipos, ya que son ellos quienes conocen de mejor forma la operatividad, funcionamiento y errores comunes que se puedan crear con malas operaciones de trabajo. El resultado final se deberá trasladar por medio de informe detallado sobre las apreciaciones generales de lo que se logró evidenciar, como debilidades, errores y tareas que sí son ejecutadas conforme lo establecido en el programa de actividades para cada trabajador.

## CONCLUSIONES

1. Se redujo en 90 % el impacto ambiental de la emisión del material particulado de tamaño igual o mayor a 2.5 micras (PM 2.5), en las áreas cercanas a la planta de trituración en el municipio de Escuintla, debido a la instalación del filtro *jet pulse* en la planta de trituración de piedra caliza y la alta eficiencia de este filtro.
2. El diseño y la implementación de los filtros de succión *jet pulse* fueron fundamentales para alcanzar el objetivo de incrementar el volumen de piedra caliza recolectado en la planta de trituración.
3. La mayor emisión de material particulado hacia el medio ambiente se da en la fase de trituración, proceso de transformación de piedra caliza a polvo de cal. Las partículas salen expulsadas en la parte superior de la trituradora por donde cae el material de aporte desde la banda de alimentación. Con la estrategia de identificar las zonas de expulsión de material particulado, y la configuración adecuada de los equipos de contención, se logró maximizar la recolección de piedra caliza triturada de manera efectiva.
4. Al implementar una ruta de trabajo diaria estandarizada y una clasificación efectiva de los desechos y contaminantes provenientes de la trituración de piedra caliza, se logró optimizar de manera significativa la recolección de los residuos captados por los filtros. Por lo tanto, esto permitió una gestión más eficiente de los desechos.

5. El conjunto de tareas mínimas para el manejo eficiente de los desechos recuperados en los filtros logró minimizar los costos de recolección de piedra caliza. Al implementar prácticas responsables y sostenibles, se redujo los impactos económicos y ambientales, consolidando el objetivo de protección del entorno natural. Aunado a lo anterior, los desechos pueden ser aprovechados como material de segunda y ser comercializados.
6. Se redujo de manera significativa los costos de mantenimiento de los filtros de succión *jet pulse*, por medio de la implementación del programa de inspección, dado que se evitó que los desechos obstruyeran los accesos y los equipos se mantienen en óptimas condiciones operativas.
7. El empleo de la propuesta minimizó los gastos de reparación, solicitando el programa de mantenimiento de los filtros al soporte técnico de la empresa proveedora de filtros, para garantizar la adecuada limpieza, reparación y operación del sistema de filtros con mano de obra calificada. Asimismo, se fortaleció la operación, se mejoró la disponibilidad de los equipos y se optimizaron los recursos financieros, lo cual permitió a la empresa ser más competitiva y sostenible en el mercado.
8. La distribución de la bodega y las zonas donde se colocan los desechos son del diseño original de la cantera, por lo tanto, la distribución a empresas interesadas en esos productos es de fácil acceso, por lo que continuaría siendo una buena opción para acumular los nuevos residuos recuperados por los filtros *jet pulse* y esto permitirá el aumento de la rentabilidad.

## RECOMENDACIONES

1. Instalar el filtro *jet pulse* con la configuración de filtros tipo manga para cal y piedra caliza, para que pueda procesar 2 toneladas de material diariamente y mejorar sus índices de material recolectado.
2. Colocar el filtro *jet pulse* con sus equipos auxiliares con la caja de vacío como chimenea sobre la trituradora, pues esto permitirá capturar el 99.99 % de las partículas que eran lanzadas al medio ambiente.
3. Diseñar el manual de operaciones de los filtros para optimizar la recolección de los desechos por medio del filtro *jet pulse*.
4. Realizar las pruebas de configuración y ajustes necesarios en la velocidad de trituración, cantidad de presión de aire, insuflado a las mangas de los colectores y capacidad de recuperación del material particulado en las bolsas finales.
5. Reducir los costos de recolección de desechos, mediante la configuración de los equipos de la cantera con los equipos auxiliares del filtro *jet pulse*, con distancias cortas entre la zona de recuperación de ceniza de cal y la ruta de traslado de los desechos hacia la bodega.
6. Fortalecer la administración de la cantera con el uso de las acciones de monitoreo y de reportes diarios para evitar obstrucciones en accesos al sistema de inyección de aire.

7. Solicitar, a la empresa vendedora del filtro *jet pulse* y de los equipos auxiliares, la guía de revisión diaria antes de iniciar operaciones.
8. Utilizar el área de la bodega prediseñada por el bosquejo original de la cantera, debido a que la distancia entre los equipos de recolección contenida en el prediseño es la recomendada.

## REFERENCIAS

- Andritz, J. (2012). *Manual de operación y mantenimiento para turbina Pelton en Hidroeléctrica El Recreo*. Prentice Hall.
- Andritz, M. (2017). *Calidad del aire y algunas reglas mínimas para la vigilancia del aire en asentamientos humanos*. Sapaldia.
- Arciniegas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable. *EciELO*, 34, 195-213.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1909-24742012000100012](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012)
- Arciniegas, C. (2016). *Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable*. Luna Azul.
- Arroyave, H. (2018). *Calidad del aire, contaminantes, concentraciones máximas admisibles y valores guías en zonas habitables*. Prentice Hall.
- Bustos, C. (2019). *Aplicación de modelos de dispersión atmosféricos en la evaluación del impacto ambiental: análisis del proceso*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Archivo digital.  
<https://www.virtualpro.co/biblioteca/aplicacion-de-modelos-de-dispersion-atmosferica-en-la-evaluacion-de-impacto-ambiental-analisis-del-proceso>

Cuesta, J. (2012). *Caracterización del medio ambiente atmosférico en la ribera este de la bahía de la La Habana*. INSMET.

Herrera, J. y Sobenes, A. (s.f.). *Manual de legislación ambiental de Guatemala*. Instituto de Derecho Ambiental y Desarrollo Sustentable.

López, L. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementara para mejorar su confiabilidad*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]. Archivo digital. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c67a0427-b346-4d7a-8ffd-c13e3691b727/content>

López, J. (2012). *Diseño, construcción y evaluación de un filtro intermitente de arena pómez*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.

Narciso, R. (2014). *Caracterización departamental Escuintla 2013*. Ministerio de Economía.

Orrala, A. (2010). *Diseño de un sistema de extracción de material particulado de una planta de arena (trituration y clasificación de polvo)*. [Tesis de licenciatura, Universidad Politecnica Salesiana, Sede Cuenca]. Archivo digital. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4856/6/UPS-CT001898.pdf>

Sandoval, E. (2018). *Mejoras en la eficiencia de los colectores de polvo tipo jet pulse y precipitador electrostático*. [Tesis de licenciatura, Universidad de Piura]. Archivo digital [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1274/IME\\_123.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1274/IME_123.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Woodard, K. (1998). *Documento de técnicas de control de materia particulada fina proveniente de fuentes estacionarias*. Timberlyne Center.

Yanez, C. (2019). *Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Prentice Hall.



## ANEXOS

### Anexo 1.

*Filtro de mangas en planta de piedra caliza*



*Nota.* Fotografía de filtro de mangas en planta de piedra caliza. Obtenido de L. López. (2018). *Aplicación de la metodología RCM en colectores de polvo en una empresa cementera para mejorar su confiabilidad.* (p. 55). Universidad Nacional de San Agustín.

