



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

**“Balance de masa y energía para el diseño de una planta de
tratamiento de sílice”**

Trabajo previo a la obtención del grado académico de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

FABIOLA MARIBEL LOJANO QUIROGA

MÓNICA ROSANA PADRÓN ORDOÑEZ

Director

ING. FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA-ECUADOR

2024

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis en primer lugar a DIOS, que siempre ha sido mi soporte, por iluminarme, guiarme siempre hacia el camino correcto, por la fuerza y salud que me ha brindado durante el camino a alcanzar mi sueño.

A mi padre German Lojano, por el apoyo económico que siempre me brindo, por la confianza puesto en mí y nunca dejar de creer que lo iba a lograr.

A mi madre Sofia Quiroga, por el amor, la confianza y el apoyo moral que me han brindado durante mi vida universitaria, a pesar de las duras pruebas que se presentan en el camino logramos cumplir el objetivo.

A mi hijo Matheo, mi mayor motivación enseñándome siempre el lado divertido de la vida, por enseñarme el significado del apoyo y amor incondicional.

A mi hermana Jennifer, mi compañera de vida, por ser parte fundamental de mi formación como persona, por apoyarme con mi hijo y nunca dejarme sola a la distancia.

Al padre de mi hijo Juan, por ser una persona incondicional, de quien nunca me faltó una palabra de aliento para lograr llegar a la meta y nunca dejar de creer en mis capacidades.

Fabiola Lojano Quiroga

Dedico este trabajo a mis padres Cristóbal y Mónica, por haberme enseñado que con sacrificio y esfuerzo se puede conseguir todo lo que uno se propone, que en la vida siempre hay que ponerse límites para sobresalir adelante, por haberme tenido paciencia y ser mi principal apoyo que nunca faltara, todo mi esfuerzo a lo largo de mi vida académica no tendría ningún sentido si no fuera por ellos.

A mi esposo Jamil por ser mi pilar fundamental en mi vida, por enseñarme cosas a diario que me ha enseñado a crecer como persona, por ser mi apoyo incondicional, y compañero de vida.

A mis hijos Martina y Emilio que son mi fortaleza, que por ellos lo hago todo, me llenan de alegría cada día, a mis hermanos, por siempre estar a mi lado.

A mis Abuelitos y a mis ángeles que siempre me cuidan desde el lugar que se encuentre, se alegran de este logro, porque siempre me enseñan y me han enseñado que cada esfuerzo siempre tendrá una recompensa, que no existe pretexto alguno para quedarse estancado y no triunfar en la vida, a mi tía que siempre me ha brindado su apoyo.

Rosana Padrón Ordoñez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios, a toda nuestra familia, por la confianza, por siempre brindarnos la paciencia necesaria para así alcanzar todos los objetivos propuestos durante nuestra formación como profesionales.

A la Universidad del Azuay, la Facultad de Ciencia y Tecnología, especialmente a la Escuela de Ingeniería en Minas, la cual nos brindó el acompañamiento durante nuestra formación académica y a todos los que forman parte de la prestigiosa escuela, por sus conocimientos impartidos.

Al Ingeniero Fernando Valencia director de titulación, por su paciencia, conocimiento y experiencia en la realización de este trabajo con el cual se le brinda un aporte a la formación de futuras profesionales de la Universidad del Azuay.

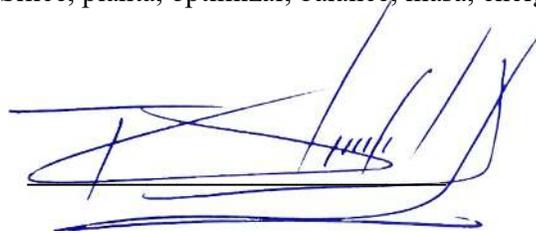
Fabiola Lojano Quiroga; Rosana Padrón Ordoñez

“BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE SÍLICE”

RESUMEN

El presente proyecto tuvo como objetivo realizar el balance de masa y energía para diseñar una planta de tratamiento de sílice, en la parroquia General Plaza, cantón Limón Indanza. Para realizarlo, fue necesario un análisis del material y una revisión bibliográfica; determinando los procesos y maquinaria para que el producto final sea el requerido por los clientes. De esta manera, se determinó procesar en 150 t/día para optimizar tiempo y recursos. Tras un análisis y discusión crítica de los datos y resultados obtenidos, al final del presente trabajo se determinó que el sistema de tratamiento basado en lavado y secado se ajusta correctamente a las necesidades del proceso de producción de sílice, debido a la reducción de pérdidas, calidad del producto, viabilidad económica y consumo mínimo de energía, Todo esto se puede verificar en el diseño realizado.

Palabras clave: Sílice, planta, optimizar, balance, masa, energético, Maquinaria.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

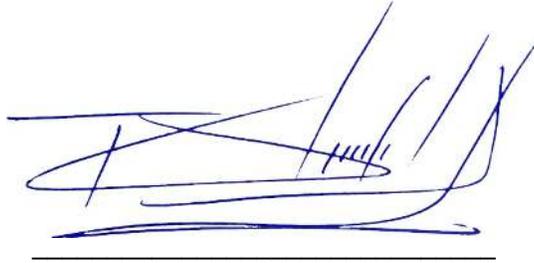
Director del Trabajo de Titulación

“MASS AND ENERGY BALANCE FOR THE DESIGN OF A SILICA TREATMENT PLANT”

ABSTRACT

The aim of this project was to create a balance between mass and energy to design a silica treatment plant in the parish of General Plaza, located in Limón Indanza canton. To achieve this, a material analysis and literature review were necessary, determining the processes and machinery needed to produce the final product required by the clients. Accordingly, it was determined that processing 150 tons per day would optimize time and resources. Following an analysis and critical discussion of the data and results obtained, it was concluded that the treatment system based on washing and drying aligns correctly with the needs of the silica production process, due to reduced losses, product quality, economic viability, and minimal energy consumption. All of this can be verified in the research design implemented.

Keywords: silica, plant, optimize, balance, mass, energy, machinery.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director of the Degree Project

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
ASPECTOS GENERALES Y MARCO TEÓRICO	3
1 Marco teórico	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Minerales no metálicos -sílice.....	4
1.2.1 Características	5
1.2.2 Utilidades del Sílice	7
1.2.3 Procesamiento de la arena de sílice	8
1.2.4 Métodos de caracterización del material	14
1.2.5 Procesos involucrados en una planta de la sílice	15
1.2.6 Cuerpos Moledores	27
1.2.7 Revestimiento o Blindaje.....	28
1.2.8 Molinos de barras	30
1.2.9 Trituración por mandíbulas	35
1.3 Tecnologías de secado	40
1.3.1 Consumo de Energía.....	41
1.4 Diseño y construcción de plantas	42

1.5	Automatización y control.....	44
1.6	Sistemas de seguridad y medio ambiente	44
1.7	Planificación de la producción	46
CAPÍTULO 2		48
2	TRATAMIENTO DE LA SILICE	48
2.1	Tratamiento de la sílice.....	48
2.2	Proceso del material frente de explotación hasta el almacenamiento	48
2.3	Procedimiento para caracterizar el material.....	56
2.4	Ensayos físicos	56
2.4.1	<i>Tamaño de partícula (ASTM C124)</i>	<i>56</i>
2.4.2	Densidad ASTM C204	58
2.4.3	<i>Índice de refracción (ASTM C227).....</i>	<i>59</i>
2.4.4	Dureza (ASTM C137 - Escala de Mohs)	61
2.4.5	<i>Resistencia a la compresión (ASTM C348).....</i>	<i>63</i>
2.5	Ensayos químicos	64
2.5.1	<i>Contenido de sílice (ISO 11266).....</i>	<i>64</i>
2.5.2	<i>Contenido de impurezas (ISO 11267).....</i>	<i>66</i>
2.5.3	Forma cristalina (ISO 11268)	68
Conclusiones:		70
3	CAPÍTULO 3	71
3.1	DISEÑO DE LA PLANTA	71
3.1.1	<i>Descripción de la información obtenida</i>	<i>71</i>
3.2	Requisitos del proceso	72
3.3	Grado de Pureza del Sílice	72
3.4	Capacidad de Procesamiento	73
3.5	Selección del Equipo	74
3.5.1	<i>Retroexcavadora</i>	<i>74</i>

3.5.2	Tolva	74
3.5.3	Chancadora de mandíbulas	74
3.5.4	Trituradora de martillos	74
3.5.5	Bomba	75
3.5.6	Tanque de lavado	75
3.5.7	Cinta transportadora	75
3.5.8	Tubo de secado	75
3.5.9	Zaranda	75
3.6	Diseño de la planta	77
3.6.1	Flujo de Proceso	79
3.6.2	Material a Procesar	81
3.6.3	Tolva (Almacenamiento Temporal)	82
3.6.4	Chancadora de Mandíbulas	83
3.6.5	Trituradora de Martillos	84
3.6.6	Zaranda Vibratoria	85
3.6.7	Bomba	86
3.6.8	Tanque de lavado	86
3.6.9	Retroexcavadora (Segunda Manipulación)	87
3.6.10	Tolva (Almacenamiento temporal)	88
3.6.11	Cinta Transportadora (Transporte interno)	89
3.6.12	Tubo de secado	90
3.6.13	Zaranda (Clasificación)	92
3.6.14	Resultado (Sílice gruesa y Sílice fina)	93
3.7	Balance de Energía	94
3.7.1	Chancadora de mandíbulas:	94
3.7.2	Trituradora de Martillos:	95
3.7.3	Zaranda Vibratoria	96

3.7.4	Bomba	96
3.7.5	Tanque de lavado:	97
3.7.6	Cinta Transportadora (Transporte Interno):	98
3.7.7	Zaranda (Clasificación):	99
3.8	Balance de Masa	100
3.8.2	Control de Polvo y Emisiones	101
3.8.3	Control de la Generación de Polvo	102
3.8.4	Control de Emisiones de Polvo	102
3.8.5	Selección de Dispositivos de Control de Emisiones	102
3.8.6	Evaluación del Control de Emisiones	103
3.8.7	Energía y Utilidades	103
3.8.8	Consumo de energía	104
3.8.9	Eficiencia Energética	105
3.8.10	Consumo de Agua	106
3.8.11	Automatización y control	107
3.8.12	Tecnología	108
3.8.13	Sensores ultrasónicos	109
3.8.14	Analizadores de tamaño de partículas	109
3.8.15	Controladores PID programables	110
3.9	Costos y Presupuesto:	118
3.9.1	Mano de Obra	118
3.9.2	Materiales:	119
3.9.3	Permisos y Licencias:	119
3.9.4	Costos Operativos Anuales:	119
	CONCLUSIONES	127
	RECOMENDACIONES	130
	BIBLIOGRAFÍA	132

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Clasificación del tipo de molienda.....	19
TABLA 2. Otra clasificación del tipo de molienda.....	19
tabla 3. Grado de pureza del sílice.....	72
TABLA 4. Capacidad de procesamiento.....	73
TABLA 5. Clasificación de equipos.....	76
TABLA 6. Consumo de energía.....	104
TABLA 7. Consumo de agua.....	106
TABLA 8. Check list para pruebas de funcionamiento de los sistemas de control.....	112
TABLA 9. Check list pruebas de seguridad..... - +	114
TABLA 10. Check list pruebas de funcionamiento.....	116
TABLA 11. Equipos.....	118
TABLA 12. Costo estimado de la energía anual.....	119
TABLA 13. Costos de combustible anual.....	120
TABLA 14. Costo estimado del cuerpo operativo anual.....	120
TABLA 15. Costo estimado del proyecto.....	121
TABLA 16. Evaluación de riesgos.....	121
TABLA 17. Mantenimiento preventivo.....	124
TABLA 18. Operación continua.....	125
TABLA 19. Capacitación del personal.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Sílice.....	5
FIGURA 2. Equipo de flotación.	10
FIGURA 3. Partes de celdas de flotación.....	11
FIGURA 4. Hidrociclón criba móvil powerscreen commander 1400.	13
FIGURA 5. Molino de 6.5 m x 9.7 m de longitud Y 8.1 MW.	20
FIGURA 6. Molino para trabajo en continuo.	23
FIGURA 7. Molino de barras.	25
FIGURA 8. Diferentes diseños de revestimiento.....	29
FIGURA 9. Molino de barras típico.....	31
FIGURA 10. Trayectoria parabólica de una partícula.....	33
FIGURA 11. Comportamiento de la carga de barras en un molino en carga.	34
FIGURA 12. Horno rotatorio.....	42
FIGURA 13. Chancadora de mandíbulas	49
FIGURA 14. Trituradora de martillo	49
FIGURA 15. Bomba para pulpas y lodos.....	50
FIGURA 16. Tanque de lavado.....	51
FIGURA 17. Retroexcavadora.....	52
FIGURA 18. Tolvas.	53
FIGURA 19. Cintas transportadoras.	54
FIGURA 19. Tubo de secado.....	55
FIGURA 21. Zaranda	55
FIGURA 23. Transportación de material	77
FIGURA 24. Proceso de trituración.....	77
FIGURA 25. Transporte de material al techado	78
FIGURA 26. Proceso de secado del material sílice	78
FIGURA 27. Clasificación del material	78
FIGURA 28. Diagrama de procesos al aire libre.....	80
FIGURA 29. Diagrama de procesos con cubierta.....	80

Fabiola Maribel Lojano Quiroga

Mónica Rosana Padrón Ordoñez

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Marzo, 2024

“Balance de masa y energía para el diseño de una planta de tratamiento de sílice”

INTRODUCCIÓN

La actual operación de plantas de tratamiento mineral en nuestro país, carecen de una adecuada planificación y diseño técnico que considere todos los elementos involucrados en su operación. Uno de los principales problemas se centra en los procesos de trituración y molienda, ya que aquí se necesita implementar una elevada cantidad de energía, por lo que una mala selección de equipos afecta significativamente los costos operativos de la planta.

Adicionalmente cuando se habla del tratamiento de sílice se hace referencia a los procesos térmicos, pues es común el uso de hornos giratorios para el secado del material; por lo que una inadecuada selección de estos o un mal diseño conllevaría también a una ineficiencia energética. La propuesta de este trabajo de tesis propone el diseño y el dimensionamiento de una planta de tratamiento de sílice considerando aspectos técnicos que minimicen las pérdidas energéticas en procura de obtener mejores características del producto final lo que incidiría positivamente en el aspecto financiero del proyecto.

Para ello se establecieron los siguientes objetivos específicos que ayudaron a cumplir el objetivo antes mencionado siendo los siguientes:

- Caracterizar el material a tratar.
- Analizar alternativas de los procesos involucrados como la trituración, molienda y secado.
- Recomendar el sistema de tratamiento que mejor se ajuste al proceso necesario que debe seguir el mineral para su futuro traslado, en base al análisis y discusión crítica.

Para cumplir estos objetivos planteados se desarrolló una investigación bibliográfica que permitió recolectar información para el desarrollo del proyecto, principalmente las proveniente de libros, revistas científicas, tesis relacionadas al tema y las normativas vigentes. Para la caracterización del material se realizaron recolecciones de muestras, caracterización visual, granulométrica e identificación de la humedad natural del material.

Con estos datos se procedió a analizar las alternativas de los procesos involucrados como la trituración, molienda y secado, con la finalidad de realizar recomendaciones para el sistema de tratamiento que mejor se ajusten al proceso.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES Y MARCO TEÓRICO

1 Marco teórico

1.1 Antecedentes

Una planta de procesamiento y secado de sílice es una instalación para el procesamiento de arena de cuarzo, un material compuesto principalmente por sílice, utilizado en diversas aplicaciones industriales como vidrio, cerámica, cemento y productos químicos. El proceso de procesamiento y secado de sílice en la planta implica varios pasos, incluida la extracción de arena de cuarzo, trituración, lavado, clasificación, secado y almacenamiento.

Bajo este contexto, Panuh *et.al* (2021) en su investigación titulada “Diseño de prensa de moldes para la fabricación de arena de sílice en forma de pellets” menciona que la sílice es una forma de compuesto químico con molécula de SiO_2 , y puede encontrarse en forma de sílice mineral que puede obtenerse de la extracción de arena en diversas regiones. En los últimos años también se han llevado a cabo muchas investigaciones sobre la sílice en forma de nitruro de silicio en nano rodos, nano fibras y nano cables. La investigación de Panuh tuvo como objetivo diseñar y fabricar un molde prensa pellet o molde de arena de sílice y obtener los resultados de los pellets de arena de sílice que se ven afectados por la variación de la presión. Para ello se utilizaron materiales como STM A276, acero tipo 410 y ST60 martensita, además se utilizó acero SS400 para fabricar la placa redonda en posición de molde. Este estudio concluyó con la producción de un molde con dimensiones de 25,45 mm de diámetro, altura de 89 mm, volumen a 45,07 cm^3 con un área de círculo de molde de 5,06 cm^2 y área de sección transversal de punzón de 452,16 mm^2 .

Por su parte Velásquez y Vélez (2016) en su investigación titulada “Diseño conceptual de una planta para la producción de sulfato de aluminio a partir de bauxita” buscaron realizar un diseño conceptual para la producción de cristales de sulfato de aluminio a partir de bauxita. Para ello fue empleado un diseño de experimentos factorial fraccionado para determinar los factores que afectaban la conversión de ácido sulfúrico durante la digestión ácida. Se encontró que los factores más significativos eran el tiempo de reacción, la relación alúmina-ácido y la relación sólido-líquido. A partir de estos resultados, se llevó a cabo un diseño de superficie de respuesta para encontrar la mayor conversión posible, logrando una conversión del 94.8%. Por último, se presentaron las especificaciones de diseño de la planta propuesta, su ubicación y características del entorno, así como el diseño conceptual con diagramas de proceso, hojas de especificación de equipos y análisis económico.

1.2 Minerales no metálicos -sílice

La sílice es un mineral no metálico compuesto por dióxido de silicio (SiO_2). En la que se presenta con una apariencia de grano medio grueso y redondo dando un aspecto muy fino y variable. La sílice pura, es una partícula muy difícil de fundir, es de textura dura llegando incluso a rallar un vidrio (Romero G. , 2020). Es uno de los materiales más comunes en la corteza terrestre y se encuentra en diversas formas, como cuarzo, cristobalita, tridimita y sílice amorfa. La sílice se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales, como en la fabricación de vidrio, cerámica, cemento, abrasivos, pinturas, plásticos y materiales refractarios, entre otros (Valdiviezo, 2012).

El uso industrial de la sílice ha aumentado significativamente en las últimas décadas debido a su amplia disponibilidad y propiedades beneficiosas.

Figura 1.

Sílice



Fuente: Pérez y Gardey, tomado de “Sílice - Qué es, definición y concepto” (Pérez & Gardey, 2020)

En cuanto a la producción de sílice, países como Estados Unidos, China, India y Brasil son los principales productores a nivel mundial. En América Latina, países como Argentina, Chile, México, Perú y Brasil también tienen una importante producción de sílice.

En definitiva, la sílice es un mineral no metálico muy utilizado en diversas industrias, pero su extracción y procesamiento puede generar riesgos para la salud laboral. El diseño de una planta de procesamiento y secado de sílice requiere un enfoque cuidadoso y conocimientos técnicos especiales para garantizar la eficiencia y la seguridad del proceso.

1.2.1 Características

La sílice es un mineral que se encuentra en la naturaleza, siendo uno de los más abundantes en la corteza terrestre. Este compuesto es conocido también como dióxido de silicio y se utiliza en una gran cantidad de aplicaciones industriales debido a sus propiedades únicas (Stewart & Simmons, 2015).

A continuación, se detallan algunas de las características más importantes de la sílice:

- **Composición química:** La sílice es un compuesto químico formado por dos elementos, silicio y oxígeno, representado por la fórmula química SiO_2 .
- **Estructura cristalina:** La sílice tiene una estructura cristalina compleja que puede adoptar varias formas cristalinas, como el cuarzo, la tridimita o la cristobalita. Estas diferentes formas cristalinas tienen diferentes propiedades físicas y químicas.
- **Propiedades físicas:** La sílice es un sólido cristalino inodoro e insípido, con una densidad de alrededor de 2.65 g/cm^3 . Es un material duro y resistente, con una dureza de 7 en la escala de Mohs. Además, es un mal conductor del calor y la electricidad.
- **Propiedades químicas:** La sílice es un compuesto inerte que no reacciona fácilmente con otros compuestos químicos. Sin embargo, puede reaccionar con álcalis y ácidos fuertes, produciendo silicato de sodio y agua o sales de silicio y agua, respectivamente.
- **Usos industriales:** La sílice se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales, como en la fabricación de vidrio, cerámica, refractarios, abrasivos, materiales de construcción, productos químicos, pinturas, tintas, plásticos, caucho y otros productos.
- **Propiedades químicas de superficie:** La sílice es un material con una superficie extremadamente activa debido a sus propiedades de adsorción

y catálisis. Estas propiedades lo hacen útil en la industria de los catalizadores, donde se utiliza para acelerar las reacciones químicas (Andrew, 2015).

En resumen, la sílice es un compuesto químico muy versátil y útil en la industria debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. Se utiliza en muchas aplicaciones industriales y su compleja estructura cristalina lo convierte en un material interesante para la investigación científica

1.2.2 Utilidades del Sílice

La sílice es un mineral ampliamente utilizado en la industria debido a sus diversas propiedades y beneficios. Algunas de las principales utilidades de la sílice son:

- **Industria del vidrio:** La sílice se utiliza en la producción de vidrio debido a su alta capacidad para fundirse y formar una estructura sólida. Además, el vidrio hecho de sílice es altamente resistente al calor y al impacto (SME, 2020).
- **Industria de la construcción:** La sílice se utiliza en la producción de materiales de construcción como el cemento, el mortero y el concreto. La sílice ayuda a aumentar la resistencia y la durabilidad de estos materiales (Martin, 2007).
- **Industria química:** La sílice se utiliza como un agente de secado en la producción de productos químicos y farmacéuticos. También se utiliza como un agente de refuerzo en la fabricación de plásticos y cauchos.
- **Industria electrónica:** La sílice se utiliza en la fabricación de componentes electrónicos, como chips de computadora y paneles solares. La alta pureza de la sílice es esencial para garantizar la eficiencia y confiabilidad de estos componentes (Stuar, 2021).

- **Industria alimentaria:** La sílice se utiliza en la producción de aditivos alimentarios, como anti aglomerantes y agentes espesantes. También se utiliza como un absorbente de humedad en alimentos y bebidas.
- **Industria textil:** La sílice se utiliza como un agente de acabado en la producción de telas, para mejorar la resistencia al desgaste y la apariencia de las prendas.
- **Industria del petróleo y gas:** La sílice se utiliza en la fracturación hidráulica para ayudar a mantener abiertas las fisuras en las rocas, lo que permite que el gas y el petróleo fluyan hacia la superficie (GWP, 2010).

En resumen, la sílice es un mineral muy versátil que tiene múltiples utilidades en una amplia gama de industrias. Su capacidad para mejorar la resistencia, durabilidad y eficiencia de los productos lo convierte en un componente clave en muchos procesos industriales.

1.2.3 Procesamiento de la arena de sílice

La selección de la arena de sílice se ejecuta en una planta que cuenta con etapas de lavado, cribado, clasificación hidráulica, filtrado y secado (Susunaga, Garrido, Ortíz, & Susunaga, 2021). La arenisca o materia prima que contiene sílice debe minarse o extraerse en la forma en que se manipula la roca dura. El mineral extraído se reduce mediante un triturador de mandíbula a un tamaño de aproximadamente de 1 pulgada para una operación promedio de pequeño tonelaje.

Para operaciones a mayor escala, es aconsejable la trituración en dos etapas. La arena de tales depósitos generalmente se carga en camiones y se transporta seca a la tolva de recepción del molino. Luego se alimenta a una criba vibratoria con suficiente agua para lavar la arena a través de un tamiz de acero inoxidable de malla 20. Si el depósito de arena está por debajo del nivel freático y se encuentra generalmente húmedo, lo mejor es

extraerlo hidráulicamente. Los métodos con el empleo de una bomba de dragado son ampliamente utilizados para tales depósitos (Geominsal, 2018).

A la arena y el lodo se le clasifica o se le quita el agua. Esto se puede hacer mediante ciclones o mediante clasificadores mecánicos de concentración con eliminación de agua, como los clasificadores de arrastre, tornillo o rastrillo. El mineral triturado es reducido a un tamaño de partícula de arena natural mediante un molino de rodillos. La molienda se realiza en medio húmedo a diluciones superiores a la molienda normal, una malla o trómel con un espiral instalado en la descarga del molino elimina el material con sobre tamaño a la malla 20, el cual se descarta o se devuelve por medio de fajas transportadoras a la alimentación del molino para su remolienda (Martínez, 2020).

El producto de las colas de flotación con 25 a 30% de sólidos contiene arena de sílice limpia; seguidamente una bomba entrega la pulpa a un clasificador. Adicionalmente es necesario contar con un clasificador mecánico, ya que la arena puede deshidratarse hasta con un contenido de humedad del 15 al 20% para luego transportarse por fajas a la pila de almacenamiento o a las tolvas de drenaje. En algunos casos, la arena es bombeada directamente a las tolvas de drenaje, pero en tales casos sería preferible colocar un ciclón en el circuito para eliminar la mayor parte del agua (Metallurgist, 2022).

Figura 2.

Equipo de Flotación.

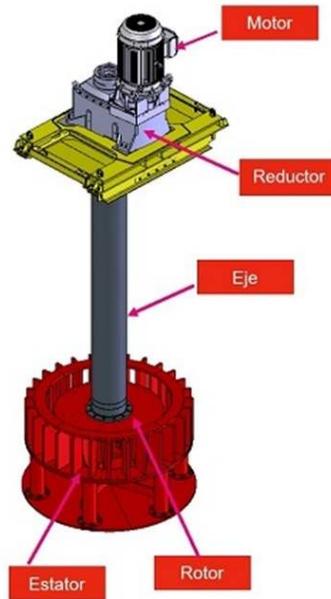


Fuente: (Plastigen, 2019)

En una celda de flotación deben coexistir partículas de mineral, agua, espuma, burbujas y un sistema adecuado de agitación y homogenización de estos a través de los componentes mecánicos / eléctricos existentes en la celda. El corazón de la celda de flotación está constituido por el mecanismo de mezclado (rotor y estator). Además, algunos componentes fundamentales son: eje (lower shaft), reductor y motor; si alguno de estos componentes presenta algún desperfecto es necesario detener la celda con la consiguiente pérdida de producción. (Outotec., s.f.)

Figura 3.

Partes de Celdas de Flotación.



Fuente: (MundoMinero, 2023)

En las plantas donde se debe producir sílice en polvo, a menudo es necesario el proceso de secado, también la molienda seca se debe brindar un producto menor a malla 100 o menor a malla 200, para ello se utiliza molinos con revestimiento de sílice o de cerámica con bolas de cerámica en referencia a los medios moledores, evitando la contaminación por hierro de los medios de molienda.

En algunos casos, puede ser necesario colocar separadores magnéticos de alta intensidad en el circuito antes del molino triturador, además el separador elimina las partículas de hierro que provienen del exterior. La arena de sílice para hacer vidrio, porcelana y cerámica debe cumplir con especificaciones determinadas y en general los esquemas de lavado estándar son inadecuados para cumplir con estos requerimientos. La

arena para la industria del vidrio no debe contener más de 0.03% de Fe_2O_3 . (Metallurgist, 2022).

1.2.3.1 Etapas de una planta de procesamiento

El proceso productivo se inicia en la tolva de alimentación, de la criba móvil con material de granulometría definida. Normalmente, el mismo recae sobre la cinta transportadora y se deposita en un hidrociclón lavándose el material clasificándose en el interior de este. Luego el material de fracción fina ya está lavado y por lo tanto sin polvo, que sale del Hidrociclón es dirigido a través de dos cintas de acopio, la primera para arena de granulometría de (0,075-1,8) mm, la segunda para arena de granulometría de (0,075-5) mm. (Mular, 1982)

El cribado de la arena de sílice es el proceso mediante el cual se separa el todo-uno en distintas granulometrías. Las cribas son parte vital en las plantas de arena de sílice y su correcto funcionamiento y mantenimiento son imprescindibles para la obtención de un producto final de calidad.

Los hidrociclones utilizados en este proceso se dotan de unas balsas de decantación a fin de reaprovechar toda el agua del proceso y poder secar los lodos resultantes para volverlos a depositar en la cantera de donde proceden, como se muestra en la figura 4. El agua utilizada para la limpieza de las arenas es reciclada progresivamente en estas balsas de decantación, lo cual supone un porcentaje de reutilización de hasta el 90%.

Figura 4.

Hidrociclón criba móvil Powerscreen Commander 1400.



Fuente: (Minngland, 2020).

La conminución es uno de los procesos más importantes en la industria minera y se refiere a la reducción del tamaño de los materiales para su posterior procesamiento. (Tromans, 2008)

El lavado por desgaste con la máquina de atricción tiene un efecto vital en el procesamiento de sílice. Hay diferentes tipos de depuradores que fueron introducidos por proveedores como Floatex, Metso y Westpro Machinery y empresas investigadas (Craddock, 2005).

La arena depurada que se obtiene de la máquina de atricción que es diluida con agua hasta un 25-30% de sólidos y se bombea a un segundo conjunto de ciclones para una posterior eliminación de finos y de los lodos liberados en el depurador. En algunos casos, la arena en este punto cumple con las especificaciones requeridas para los límites del óxido de hierro obtenido por lavado únicamente.

En este caso, el producto de arena por clasificación se convierte en producto final. Algunas de las arenas más difíciles de tratar pueden requerir dos etapas de lavado por atricción con clasificación y remoción de lodo entre las etapas.

En las plantas donde se debe producir sílice en polvo, a menudo es necesario el proceso de secado. El secado se realiza en secadores rotatorios, de petróleo o de gas. La molienda con revestimiento de sílice o de cerámica y el uso de guijarros de piedra o bolas de cerámica o de porcelana de alta densidad como medio de molienda. Esto evita la contaminación por hierro de los medios de molienda.

1.2.4 Métodos de caracterización del material

La caracterización del material es esencial para comprender sus propiedades y determinar su aplicabilidad en diferentes procesos industriales. Para la sílice, se utilizan diversos métodos de caracterización, algunos de los cuales se describen a continuación:

- **Granulometría:** La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas en un material sólido. Se puede medir utilizando tamices, sedimentación, láser de dispersión de luz, entre otros (Gabriels & Lobo, 2011). Conocer la distribución del tamaño de las partículas es fundamental para el diseño y selección de equipos en procesos de trituración, molienda y secado.
- **Espectroscopía infrarroja (FTIR):** La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica que permite identificar y cuantificar los grupos funcionales presentes en el sílice, proporcionando información sobre su estructura química (Piqué & Vázquez, 2012). Esta información puede ser útil para predecir el comportamiento del material en diferentes condiciones de proceso.

- **Difracción de rayos X (XRD):** La difracción de rayos X es una técnica que permite determinar la estructura cristalina de un material, identificar las fases presentes y cuantificar su concentración (Moreira, 2016). Este método es especialmente relevante para la caracterización de sílice, ya que puede existir en diferentes formas cristalinas, como cuarzo, cristobalita y tridimita, que tienen propiedades y aplicaciones distintas.
- **Análisis termogravimétrico (TGA):** El análisis termogravimétrico mide la pérdida de masa de una muestra en función de la temperatura y/o el tiempo en un ambiente controlado. Esta técnica puede utilizarse para determinar la cantidad de agua y otros compuestos volátiles presentes en el sílice, así como para estudiar la estabilidad térmica del material (Uribe et al., 2021)
- **Microscopía electrónica de barrido (SEM):** La microscopía electrónica de barrido permite obtener imágenes de alta resolución y en 3D de la superficie de una muestra. Este método es útil para estudiar la morfología y la textura de las partículas de sílice, lo que puede afectar su reactividad y comportamiento en diferentes procesos (Sierra et al., 2021).

1.2.5 Procesos involucrados en una planta de la sílice

- **Trituración**

La trituración es un proceso esencial en la planta de tratamiento y secado de sílice, es el primer paso en el procesamiento de este mineral. En su estado natural, la sílice puede presentarse en grandes bloques o formaciones rocosas que no son prácticas para la mayoría de los usos industriales. Por lo tanto, es necesario reducir el tamaño de estas formaciones a un estado más manejable.

Este proceso de reducción de tamaño se logra mediante la trituración. La sílice es sometida a fuerzas mecánicas aplicadas por maquinaria pesada, diseñada para manejar grandes cantidades de material. El objetivo es romper las grandes formaciones de sílice en piezas más pequeñas, incrementando la superficie expuesta de cada partícula y facilitando los procesos posteriores.

- **Tipos de Trituración**

La trituración puede dividirse en dos categorías principales, cada una de las cuales cumple un propósito específico en la reducción general del tamaño del material.

- ✓ **Trituración primaria:** En esta etapa inicial, el objetivo es manejar las grandes formaciones de sílice y romperlas en trozos más pequeños. Para ello, se utilizan máquinas como las trituradoras de mandíbula o las trituradoras giratorias, que son capaces de manejar las grandes formaciones de sílice. La trituración primaria generalmente no reduce el material a su tamaño final, pero prepara el material para la trituración secundaria.
- ✓ **Trituración secundaria:** Después de que el material ha sido procesado por la trituración primaria, se somete a la trituración secundaria. Esta etapa busca reducir aún más el tamaño de las partículas de sílice. Las trituradoras de cono son comúnmente usadas en la trituración secundaria. Estos dispositivos funcionan por compresión y permiten un mayor control sobre el tamaño de las partículas resultantes.

- **Equipos de Trituración**

El tipo de equipo utilizado para la trituración puede variar dependiendo del tamaño de las formaciones de sílice y las necesidades específicas de la operación.

- ✓ **Trituradoras de mandíbula:** Estas máquinas operan por compresión, utilizando dos superficies de mandíbula, una fija y una móvil, para aplastar el material. Son una opción común para la trituración primaria debido a su capacidad para manejar grandes formaciones de sílice.
- ✓ **Trituradoras giratorias:** Similar a la trituradora de mandíbula, la trituradora giratoria también opera por compresión. Sin embargo, en lugar de tener dos superficies de mandíbula, tienen una mandíbula fija y un cono de trituración que gira para aplastar el material contra la mandíbula fija. Este tipo de trituradora puede manejar materiales de mayor tamaño y es comúnmente usada como trituradora primaria en operaciones de minería de gran escala.
- ✓ **Trituradoras de cono:** Funcionan de manera similar a las trituradoras giratorias, pero tienen un diseño que les permite un mayor control sobre el tamaño de las partículas resultantes. Su diseño consta de un cono de trituración que se mueve de forma excéntrica dentro de una cámara de trituración. La sílice se introduce en la cámara y se aplasta entre el cono y las paredes de la cámara.
- **Características y razones principales para la trituración**

La trituración es un proceso físico que emplea fuerzas de compresión y cizallamiento para romper las formaciones de sílice. Es una operación de alta energía que puede ser costosa en términos de consumo de energía. Sin embargo, es esencial para la eficiencia de los procesos posteriores, ya que reduce el tamaño del material y aumenta la superficie total expuesta de las partículas de sílice, lo que facilita la liberación y separación de impurezas durante las etapas de lavado y molienda.

La trituración es una etapa esencial en la preparación de la sílice para su procesamiento y uso posterior. Reducir el tamaño del material permite que se maneje, se transporte y se procese de manera más eficiente. Además, al aumentar la superficie total de las partículas de sílice, la trituración facilita la liberación y separación de impurezas durante las etapas de lavado y molienda.

- **Molienda**

La molienda es la última etapa del proceso de conminución o fragmentación para la reducción del tamaño de las partículas. Los tamaños de salida de los productos de esta etapa, según Hukki (ETSIMV, 1996), pueden variar dependiendo de varios factores. En la molienda, es común obtener un producto grueso o material sobre tamaño, que consiste en partículas más grandes que el tamaño objetivo y que se separan del producto final para ser sometidas a un nuevo ciclo de molienda o ser procesadas de otra manera.

Por otro lado, el producto fino, también conocido como material submalla, es el producto principal deseado en la mayoría de los procesos de molienda. Estas partículas finas tienen un tamaño más pequeño que el objetivo y se utilizan en diversas aplicaciones industriales, como la producción de cemento, la fabricación de pinturas o la obtención de productos químicos, entre otros. Los tamaños de salida específicos pueden variar dependiendo del tipo de material a moler, el equipo utilizado y el objetivo final del proceso.

Tabla 1.*Clasificación del tipo de molienda.*

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	$\cong 1\text{mm}$
Molienda fina	$\cong 100\ \mu\text{m}$
Molienda ultrafina	$\cong 10\ \mu\text{m}$

Fuente: Hukki (ETSIMV, 1996)

Se puede encontrar también la siguiente clasificación según el tamaño de salida del producto.

Tabla 2.*Otra clasificación del tipo de molienda.*

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	1-2 mm
Molienda media	200-500 μm
Molienda fina	50-100 μm

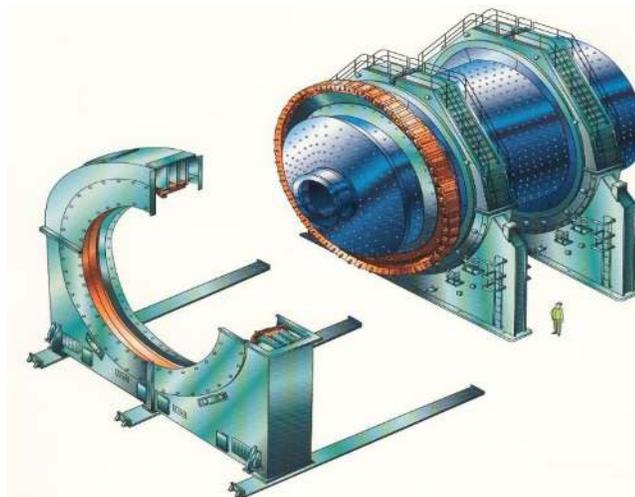
Fuente: Hukki (ETSIMV, 1996)

La fragmentación de las partículas durante el proceso de molienda se logra mediante la combinación de fuerzas de compresión, cizalladura y abrasión. Estas fuerzas actúan sobre el material a medida que se somete a la acción de equipos cilíndricos rotatorios de acero conocidos como molinos de rodamiento de carga o simplemente molinos. Estos molinos son estructuras robustas diseñadas para soportar el impacto y la fuerza generada durante la molienda. En su interior, cuentan con cuerpos moledores, como bolas de acero o barras, que son impulsados a rotar mediante un sistema de accionamiento. A medida que el material es introducido en el molino, las partículas son

sometidas a la acción de los cuerpos moledores y las fuerzas mencionadas anteriormente. El resultado es la fragmentación del mineral en tamaños más pequeños y una distribución de tamaños que cumple con los requisitos específicos del proceso industrial. Los molinos de rodamiento de carga son ampliamente utilizados en la industria minera, cerámica, química y otras industrias que requieren la reducción de tamaño de los materiales.

Figura 5.

Molino de 6.5 m x 9.7 m de longitud y 8.1 MW.



Fuente: (Fuller, Traylor, 2019).

- **Características y razones principales para la molienda**

La molienda es un proceso de reducción de tamaño que utiliza fuerzas de compresión y cizallamiento para romper el material de sílice en partículas más pequeñas. Este proceso también aumenta la superficie total de las partículas de sílice, lo que puede mejorar la eficiencia de los procesos posteriores de lavado y secado. La molienda es un proceso intensivo en energía, y el tipo y tamaño del equipo de molienda utilizado puede tener un impacto significativo en el costo total de la operación. La molienda es una etapa esencial en el procesamiento de la sílice porque reduce aún más el tamaño de las partículas de sílice y aumenta la superficie total de estas partículas. Este aumento en la superficie

de las partículas puede mejorar la eficiencia de los procesos posteriores de lavado y secado al permitir una mayor interacción entre las partículas de sílice y los agentes de lavado o el aire de secado. Además, la molienda puede ayudar a liberar impurezas atrapadas dentro de las partículas de sílice, lo que puede mejorar la calidad del producto final.

Estos molinos contienen en su interior una mezcla de mineral a fragmentar junto con cuerpos molturantes o moledores que pueden ser barras, bolas, guijarros de sílex o incluso fragmentos gruesos del propio mineral. Esta combinación de materiales en el molino permite generar las fuerzas necesarias para la fragmentación de las partículas. Dependiendo del tipo de cuerpos molturantes que emplean, podemos realizar una primera clasificación de los diferentes tipos de molinos:

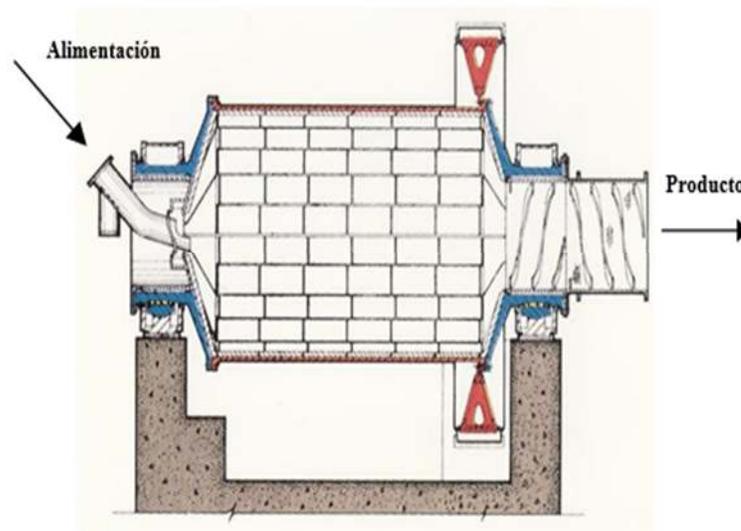
- **Molinos de barras:** Utilizan barras de acero como cuerpos molturantes. Estas barras son más largas que el molino y se encargan de romper el material mediante el impacto y la fricción.
- **Molinos de bolas:** Emplean bolas de acero de diferentes tamaños como cuerpos molturantes. Las bolas son arrojadas dentro del molino y al chocar con el material, lo fragmentan mediante el impacto y la abrasión.
- **Molinos autógenos (AG) o Semiautógenos (SAG):** Estos molinos utilizan como cuerpos molturantes fragmentos gruesos del propio mineral, además de bolas de acero. El impacto entre los fragmentos y el material produce la fragmentación, y las bolas ayudan a moler aún más el material.
- **Molinos de pebbles:** En este caso, los cuerpos molturantes son materiales no metálicos, como guijarros naturales o fabricados. Estos guijarros son

arrojados dentro del molino y contribuyen a la fragmentación del material mediante el impacto y la abrasión.

Cada tipo de molino tiene características específicas y se utiliza en diferentes aplicaciones industriales según las propiedades del material a moler y los requisitos del producto final. La elección del tipo de molino adecuado es crucial para garantizar una molienda eficiente y obtener los tamaños de salida deseados.

Además de la clasificación de los tipos de molinos según los cuerpos molturantes, es importante destacar que estos equipos pueden trabajar de dos formas diferentes: de forma discontinua y de forma continua.

- **Forma discontinua:** En este caso, el molino se recarga con el material a moler y se cierra para hacerlo girar. Una vez finalizada esta operación, el molino se abre para separar el mineral de los cuerpos molturantes. Esta forma de trabajar es común en molinos pequeños de laboratorio, donde se realizan pruebas o análisis de muestras en lotes.
- **Forma continua:** En la operación continua, el molino se alimenta de manera constante por un extremo, mientras simultáneamente se descarga el mineral molido por el otro extremo (o por el centro, dependiendo del diseño del molino). El proceso de molienda se mantiene en funcionamiento sin interrupciones, a menos que sea necesario detenerlo para realizar tareas de mantenimiento o recarga de los cuerpos molturantes. Esta forma de trabajo es ampliamente utilizada en la industria minera y en la producción de áridos, donde se requiere un flujo constante de material procesado para cumplir con las demandas de producción.

Figura 6.*Molino para trabajo en continuo.***Fuente:** (Fuller, Traylor, 2019).

Los equipos mencionados tienen la capacidad de operar en dos configuraciones distintas: circuito abierto o circuito cerrado. En ambos casos, se utiliza una criba o clasificador al final del proceso para separar los fragmentos de mayor tamaño. El circuito cerrado se utiliza principalmente en procesos de molienda con bolas o autógena, donde el material triturado se recircula dentro del sistema para obtener una mayor eficiencia en la reducción del tamaño de partícula. Por otro lado, en la molienda con barras, se suele emplear el circuito abierto, permitiendo que el producto final salga del sistema sin ser recirculado.

En tal sentido, el circuito cerrado en la molienda con bolas o autógena puede ser beneficioso para obtener una mayor finura en el producto final y un mejor control del tamaño de partícula. Sin embargo, el circuito abierto en la molienda con barras puede resultar más adecuado en ciertos casos donde se busca una mayor capacidad de producción y una menor generación de material fino. Es importante evaluar las

características específicas de cada proceso y ajustar la configuración en consecuencia para lograr los mejores resultados.

La elección entre trabajar de forma discontinua o continua depende de diversos factores, como el tipo de material, la capacidad requerida, los recursos disponibles y los objetivos del proceso industrial. Cada método tiene sus ventajas y desventajas, y es importante seleccionar la modalidad más adecuada para optimizar la eficiencia y la productividad del proceso de molienda.

Existen dos métodos distintos para llevar a cabo el proceso de molienda: vía seca y vía húmeda.

En la molienda por vía seca, se trituran materiales que están prácticamente secos, con un contenido de agua muy bajo, alrededor del 2%. También es posible realizar la molienda con una humedad específica, donde los materiales contienen aproximadamente un 30% de agua. Este enfoque se utiliza en situaciones donde es necesario controlar la humedad de los materiales durante el proceso.

Por otro lado, en la molienda por vía húmeda, se trituran materiales que forman una pulpa al mezclarse con agua. En este caso, los materiales pueden contener un porcentaje de agua mucho más elevado, que oscila entre el 30% y el 300%. La adición de agua facilita la dispersión de los materiales y permite obtener suspensiones acuosas, lo que resulta beneficioso para ciertos tipos de productos o procesos.

La elección entre la molienda vía seca o vía húmeda depende de diversos factores. La molienda en seco puede ser preferible cuando se busca una mayor eficiencia energética, una menor generación de polvo y una mayor facilidad de manipulación y almacenamiento de los materiales. Por otro lado, la molienda en húmedo puede ser más adecuada cuando se requiere una mejor dispersión de los materiales, una reducción del

desgaste de las herramientas de molienda y una mayor capacidad de producción. Es esencial considerar las características específicas de los materiales y los objetivos del proceso para determinar la mejor opción de molienda en cada caso. (Cajamarca León, Cuenca León,2010)

Figura 7.

Molino de barras.



Fuente: (Fuller, Traylor, 2019).

Diversos factores influyen en la elección del tipo de molienda, ya sea molienda húmeda o molienda seca. Estos factores son los siguientes:

- El tipo de etapa siguiente: Dependiendo de si la etapa siguiente al proceso de molienda es húmeda o seca, se puede determinar el tipo de molienda más adecuado. Se busca una integración eficiente y coherente entre las etapas del proceso.
- La disponibilidad de agua: La presencia y accesibilidad al agua juegan un papel importante en la selección del método de molienda. La molienda

húmeda requiere una mayor cantidad de agua en comparación con la molienda seca, por lo que la disponibilidad de agua puede influir en la elección.

- La eficiencia energética: La molienda húmeda suele requerir menos energía por tonelada de mineral tratado. La humedad presente en el proceso disminuye la resistencia de los fragmentos, lo que facilita la reducción del tamaño de partícula con un menor consumo de energía.
- Espacio y equipos: La clasificación en medio húmedo ocupa menos espacio físico que la clasificación en seco, ya que no se requieren sistemas de transporte de polvo como bombas y tuberías. Además, la molienda húmeda puede generar menos calentamiento en los equipos en comparación con la molienda seca.
- Desgaste de equipos: La molienda húmeda puede ocasionar un mayor desgaste de cuerpos molidores y blindajes en comparación con la molienda seca, especialmente debido a la corrosión. El desgaste en la molienda húmeda puede ser hasta 6 u 8 veces superior.
- Reacciones químicas: Algunas sustancias presentes en el material a moler pueden reaccionar con el agua, lo que resulta en cambios fisicoquímicos. Por ejemplo, en la producción de clinker de cemento, la molienda húmeda puede ser necesaria debido a las reacciones que ocurren con el agua.

Todos estos factores deben ser considerados de manera integral para determinar el tipo de molienda más adecuado en cada situación. La disponibilidad de recursos, la eficiencia energética, el desgaste de equipos y las características específicas del material a procesar son elementos clave a evaluar para tomar una decisión informada.

1.2.6 Cuerpos Moledores

En el proceso de molienda, es necesario utilizar cuerpos moledores que faciliten la tarea de trituración. Estos cuerpos moledores pueden ser de diferentes tipos:

- **Barras:** Están fabricadas con acero de alto contenido de carbono. Poseen un límite elástico elevado para evitar que se deformen o rompan, evitando así posibles obstrucciones o daños en el equipo. Los molinos de barras se utilizan para moliendas de mayor tamaño de partícula.
- **Bolas:** Pueden fabricarse con acero fundido, acero forjado o incluso aleaciones especiales como el Cr-Mo para resistir el desgaste por impacto, o aleaciones para resistir la abrasión (bolas de acero muy duro). A veces, estas bolas no tienen forma esférica, sino que adoptan formas cilíndricas, troncocónicas, entre otras. Los molinos de bolas se emplean en moliendas más finas.
- **Propio mineral:** En algunos casos, los cuerpos moledores pueden ser el propio mineral para moler, lo que se conoce como molienda autógena (AG). También se puede utilizar una combinación de mineral y bolas u otros tipos de cuerpos moledores, lo que se denomina molienda semiautógena (SAG). En ciertas situaciones, se han utilizado guijarros de sílex o porcelana como cuerpos moledores para evitar la contaminación del mineral debido al desgaste del acero.

La selección adecuada de los cuerpos moledores es crucial para lograr una eficiente operación de molienda. Es necesario considerar las características del material a moler, el tamaño de partícula deseado, las propiedades de resistencia al desgaste y la contaminación del producto final. Además, el correcto mantenimiento y control del

desgaste de los cuerpos molidores son fundamentales para garantizar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil del equipo.

1.2.7 Revestimiento o Blindaje

En el interior del tambor del molino, se encuentran piezas intercambiables que conforman el blindaje del molino. Estas piezas desempeñan varias funciones esenciales:

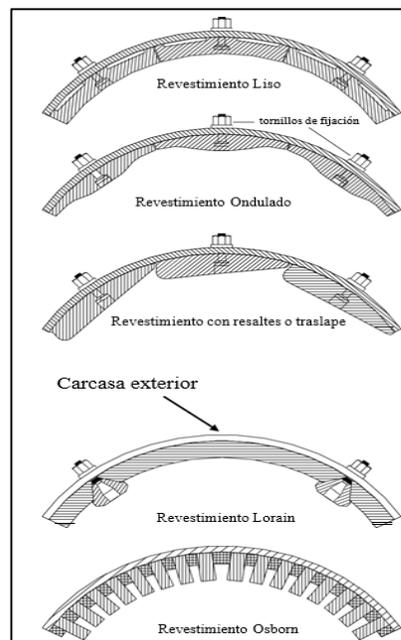
- **Resistencia a impactos y abrasión:** El blindaje del molino debe ser capaz de soportar los impactos y la abrasión generados durante el proceso de molienda. Estas piezas deben ser lo suficientemente duras y resistentes para resistir el desgaste provocado por la fricción y la colisión entre los cuerpos molidores y el material a moler.
- **Protección contra corrosión y desgaste:** El blindaje del molino también cumple un papel crucial al proteger la carcasa del molino contra la corrosión y el desgaste. Dado que el interior del molino está expuesto a condiciones adversas, como la presencia de minerales y agentes corrosivos, es importante contar con un revestimiento resistente que evite el deterioro prematuro del equipo.
- **Promoción del adecuado volteo del mineral:** El blindaje del molino está diseñado de manera que minimice el deslizamiento entre los cuerpos molidores y el tambor. Esto favorece un movimiento adecuado de la carga del molino, permitiendo un volteo efectivo del mineral y una distribución más uniforme de las partículas dentro del tambor.

Además, los blindajes suelen presentar resaltes o nervios que ayudan a facilitar el movimiento de la carga del molino, promoviendo una mayor eficiencia en el proceso de molienda.

El diseño y la selección adecuada de los blindajes del molino son fundamentales para garantizar un funcionamiento eficiente y prolongar la vida útil del equipo. Es esencial utilizar materiales de alta calidad que cumplan con los requisitos de resistencia, durabilidad y protección contra la corrosión. Asimismo, el monitoreo regular del desgaste de los blindajes y su reemplazo oportuno son aspectos clave para mantener un rendimiento óptimo del molino.

Figura 8.

Diferentes diseños de revestimiento.



Fuente: (Fuller, Traylor, 2019).

Los revestimientos utilizados en los molinos pueden estar fabricados de diferentes materiales, aunque lo más común es que sean de acero fundido o acero laminado debido a sus propiedades resistentes. En algunas ocasiones, se emplea cerámica como material de revestimiento. Sin embargo, el acero fundido o laminado se prefiere debido a su capacidad para resistir las condiciones rigurosas de la molienda.

En ciertos casos, también se utiliza caucho como material de revestimiento, especialmente en molinos de bolas que tratan minerales muy duros. Es importante destacar que el caucho es más adecuado en situaciones donde la temperatura no supere los 80°C y donde no haya contacto con reactivos de flotación. Estas condiciones específicas son necesarias para garantizar la durabilidad y el rendimiento adecuado del revestimiento de caucho.

La selección del material de revestimiento adecuado es esencial para garantizar la protección y el rendimiento óptimo del molino. Se deben considerar factores como la resistencia requerida, la abrasión, la corrosión y la temperatura de operación. Cada material tiene sus propias ventajas y limitaciones, por lo que es crucial evaluar las condiciones de trabajo y los requisitos del proceso antes de tomar una decisión informada sobre el tipo de revestimiento a utilizar. Además, el monitoreo regular del desgaste y el mantenimiento adecuado del revestimiento son cruciales para asegurar una operación eficiente y prolongar la vida útil del molino.

1.2.8 Molinos de barras

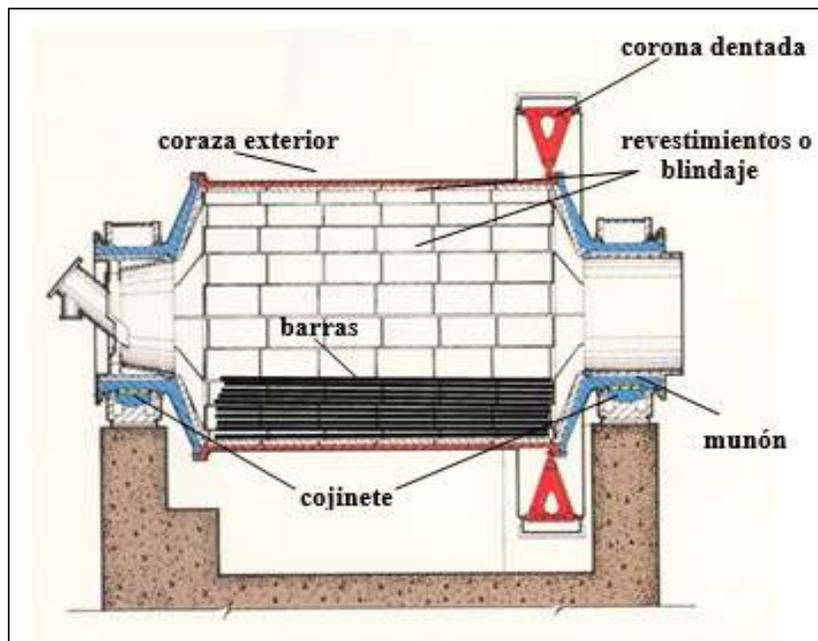
Los molinos de barras, como se mencionó anteriormente, son equipos cilíndricos de gran tamaño que se disponen horizontalmente. Estos molinos están contruidos utilizando planchas de acero y cuentan con revestimientos metálicos intercambiables para protegerlos contra el desgaste y la corrosión.

La estructura principal del molino de barras consiste en un tubo cilíndrico de acero que actúa como carcasa. Para proteger esta carcasa contra el desgaste y la corrosión, se utilizan revestimientos metálicos intercambiables. Estos revestimientos están diseñados para resistir las condiciones adversas de la molienda, incluyendo el impacto y la fricción generados por los cuerpos molidores y el material a moler.

La capacidad de intercambiar los revestimientos metálicos es una ventaja significativa, ya que permite reemplazar las piezas desgastadas o dañadas sin necesidad de cambiar todo el molino. Esto facilita el mantenimiento y prolonga la vida útil del equipo.

Figura 9.

Molino de barras típico.



Fuente: (Fuller, Traylor, 2019).

La cámara cilíndrica del molino gira alrededor de su eje horizontal y se apoya en los extremos mediante cojinetes cilíndricos que descansan sobre soportes.

La rotación del molino es posible gracias a la presencia de cojinetes cilíndricos ubicados en los extremos de la cámara cilíndrica. Estos cojinetes proporcionan un soporte estable y permiten que el molino gire suavemente alrededor de su eje horizontal.

Los cojinetes cilíndricos descansan sobre soportes diseñados específicamente para mantener la estabilidad del molino durante su funcionamiento. Estos soportes brindan un

punto de apoyo firme y seguro para los cojinetes y ayudan a distribuir adecuadamente las cargas generadas por la rotación.

El diseño y la calidad de los cojinetes y soportes son de suma importancia para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable del molino. Es esencial llevar a cabo un mantenimiento regular, como la lubricación adecuada de los cojinetes, para asegurar su rendimiento óptimo y prolongar la vida útil del equipo. (Baquero Beltrán, 2021)

1.2.8.1 Parámetros que caracterizan a un molino de barras

Uno de los parámetros técnicos importantes que caracterizan a un molino de barras es la velocidad crítica. Esta velocidad se refiere a la velocidad de giro mínima necesaria para que la fuerza centrífuga generada sea suficiente para que las partículas se adhieran a los revestimientos del molino.

Es fundamental que la velocidad de giro del molino esté por debajo de la velocidad crítica si se desea lograr una molienda eficiente del mineral. Por lo general, la velocidad crítica se define en términos de un porcentaje de su valor. Es decir, el molino debe girar a una velocidad inferior a un cierto porcentaje de su velocidad crítica para lograr el efecto de adhesión deseado.

Es importante tener en cuenta este parámetro para asegurar un funcionamiento adecuado del molino de barras. Si la velocidad de giro excede la velocidad crítica, las partículas pueden ser arrojadas fuera del molino en lugar de quedar adheridas a los revestimientos, lo que resultaría en una menor eficiencia de la molienda. (Connecting Buyers With Chinese Suppliers, 2022)

La fórmula que nos indica la velocidad crítica para un determinado molino de barras es la siguiente:

$$V_{\text{crítica}} = \frac{42.3}{\sqrt{D_M}} \quad (1)$$

Donde:

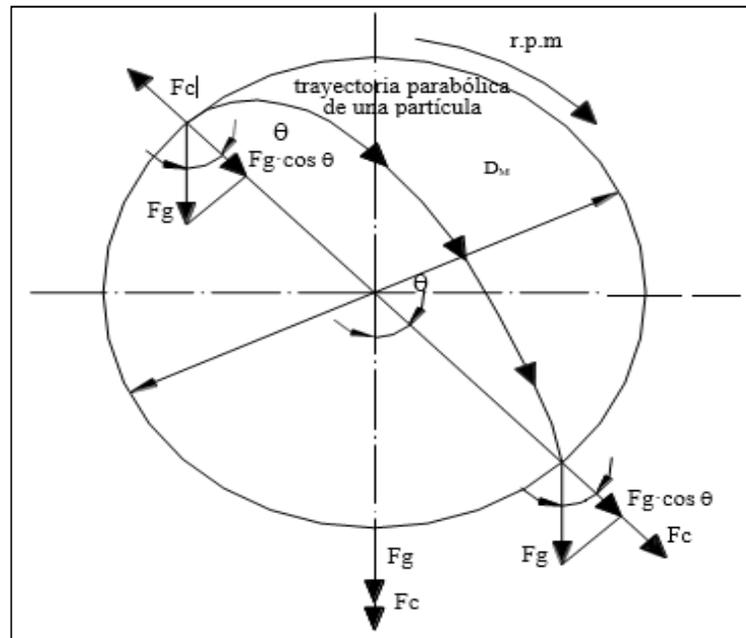
V= Velocidad crítica, r.p.m.

DM = Diámetro del molino, m. (medido entre los revestimientos internos).

La expresión que nos proporciona el valor de la velocidad crítica, en revoluciones por minuto (r.p.m.), para un molino de barras dado, se calcula en base al diámetro del molino (DM), el cual se mide entre los revestimientos internos del mismo. La expresión para determinar la velocidad crítica de un molino de barras ha sido derivada mediante el análisis de la trayectoria seguida por una partícula dentro del interior del molino.

Figura 10.

Trayectoria parabólica de una partícula.



Fuente: (Fuller, Traylor, 2019).

Es común que los molinos de barras operen a velocidades que se encuentran en el rango del 62% al 68% de la velocidad crítica.

1.2.8.2 Volumen de la carga

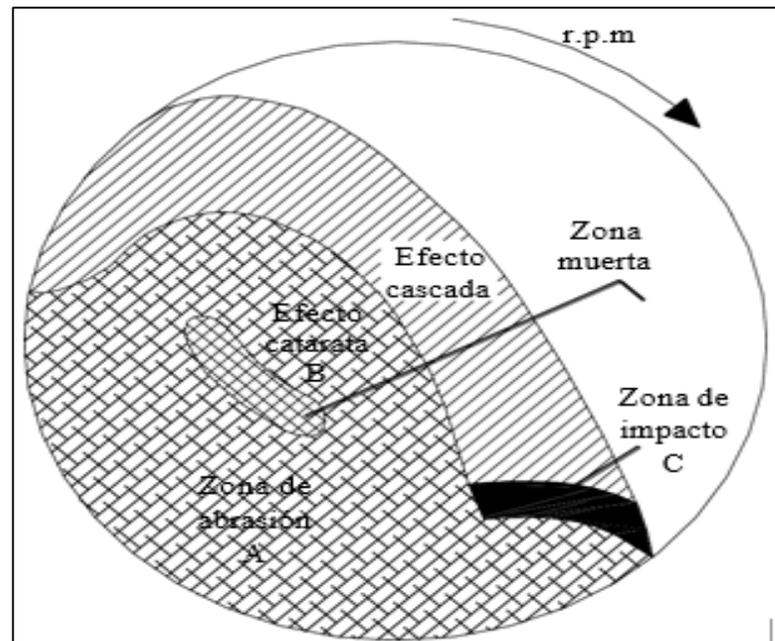
La relación que nos proporciona el volumen de la carga en vacío, teniendo en cuenta los huecos vacíos entre las barras, expresado como un porcentaje (%) del volumen total interior del molino, es la siguiente:

$$V.C. (\%) = 113 - 126 \cdot \frac{H_c}{D_M} \quad (2)$$

En base a la distancia interior máxima (H_c) entre la parte superior del revestimiento y la parte superior de la carga en reposo, y al diámetro interior del molino (D_M), se determina el grado de llenado de los molinos de barras. Es común que estos molinos operen con un grado de llenado que se encuentra en el rango del 35% al 40%.

Figura 11.

Comportamiento de la carga de barras en un molino en carga.



Fuente: (Fuller, Traylor, 2019).

1.2.9 Trituración por mandíbulas

En toda operación de reducción de tamaño va a existir un roce, más o menos notable, dependiendo del tipo de fuerza aplicada y de la forma en que se aplica, diseño del equipo, entre el material a fragmentar y ciertas partes del equipamiento.

Dado el carácter normalmente abrasivo de las sustancias minerales, va a producirse un desgaste de partes más o menos vitales de los equipos mineros de fragmentación. Los equipos característicos para la realización de este trabajo son de tres tipos, caracterizados por la forma en que aplican la fuerza necesaria para la fragmentación.

- Quebrantadoras, machacadoras o trituradoras de mandíbulas. Estos equipos utilizan como fuerza predominante la compresión y la aplican de forma discontinua por atrapamiento entre dos mandíbulas, una fija y otra móvil mediante diferentes sistemas de actuación. Pueden ser de simple o de doble efecto, denominación que se corresponde con la traducción del inglés de single toggle (teja, palanca o placa de articulación) o double toggle (doble palanca).
- Trituradoras giratorias. Utilizan el mismo principio que las de mandíbulas, pero lo aplican de forma giratoria por lo que parece que el proceso, aun siendo discontinuo, tiene la apariencia de continuo. En el efecto de giro el material situado en un punto es comprimido y fragmentado entre la nuez (ó cabeza) y el cóncavo y pasado el instante de presión es liberado. El efecto desde el punto de vista exterior al equipo es de un funcionamiento continuo.

- Otros equipos, trituradores de choque, de impacto y de percusión. Utilizan la energía del impacto, la fuerza de compresión o el cizallamiento según la tecnología empleada.

- **Lavado**

El lavado es un proceso que se utiliza para eliminar las impurezas de las partículas de sílice. Este proceso se lleva a cabo después de la trituración y la molienda, y antes del secado. El lavado puede realizarse de varias formas, dependiendo de las características específicas del mineral de sílice y de las impurezas que se deben eliminar, entre tipos de lavado tenemos:

- ✓ Lavado con agua: Este es el método más común de lavado, que utiliza agua para lavar las partículas de sílice y eliminar las impurezas. El agua puede ser tratada con agentes químicos para mejorar su eficacia en la eliminación de ciertas impurezas.
- ✓ Lavado químico: Este método implica el uso de soluciones químicas para lavar las partículas de sílice. Este método puede ser más efectivo para la eliminación de ciertas impurezas que son más resistentes al lavado con agua. (Cobos, Li, Garcia, & al, 2023)

- **Equipos de Lavado**

El equipo utilizado para el lavado puede variar dependiendo del método de lavado utilizado dentro de los cuales tenemos:

- ✓ Tanques de lavado: Estos tanques proporcionan un espacio donde las partículas de sílice pueden ser mezcladas con agua o soluciones químicas para el lavado.

- ✓ Hidrociclones: Estos dispositivos utilizan la fuerza centrífuga para separar las partículas de sílice de las impurezas en función de su tamaño y densidad.

- **Características y razones principales para el lavado**

El lavado es un proceso que utiliza agua o soluciones químicas para eliminar las impurezas de las partículas de sílice. El proceso puede variar en eficiencia dependiendo de las características específicas del mineral de sílice y de las impurezas que se deben eliminar. El lavado es esencial para mejorar la calidad del mineral de sílice al eliminar las impurezas. Estas impurezas pueden interferir con los usos posteriores del mineral de sílice, por lo que su eliminación es crucial para el valor y la utilidad del producto final. Además, ciertas impurezas pueden ser perjudiciales si se dejan en el producto final, como los contaminantes metálicos que pueden reaccionar químicamente de manera indeseada.

- **Secado**

El secado es el proceso de eliminación de la humedad de las partículas de sílice. Este proceso es crítico, ya que la presencia de agua puede afectar la eficacia de la sílice en sus aplicaciones finales. El secado puede ser de varios tipos, dependiendo de las necesidades específicas de la operación y del producto final, dentro de los tipos tenemos:

- ✓ Secado al aire: Este es el método más simple de secado, en el que se permite que el aire fluya sobre las partículas de sílice para evaporar la humedad. Sin embargo, este proceso puede ser lento y no es ideal si se necesita un secado rápido o si se deben manejar grandes volúmenes de material.

- ✓ Secado en horno: En este método, las partículas de sílice se colocan en un horno donde se aplica calor para evaporar la humedad. Este método es más rápido y eficiente que el secado al aire, pero puede requerir más energía.

Por su parte el equipo utilizado para el secado puede variar dependiendo del método de secado utilizado. Entre ello se puede mencionar

- ✓ Hornos de secado: Estos dispositivos proporcionan un ambiente controlado donde se puede aplicar calor para acelerar la evaporación de la humedad.
- ✓ Secadores rotatorios: Estos dispositivos utilizan una combinación de calor y movimiento para acelerar el proceso de secado. Las partículas de sílice se colocan en un tambor giratorio que se calienta para evaporar la humedad.

- **Características y razones principales del proceso de secado**

El secado es un proceso que utiliza calor para evaporar la humedad de las partículas de sílice. Este proceso es crítico para la preparación de la sílice para sus aplicaciones finales, ya que la presencia de humedad puede afectar la eficacia de la sílice en sus aplicaciones finales y puede hacer que el producto sea más difícil de manejar y almacenar. El secado es esencial para la preparación de la sílice para sus aplicaciones finales. La eliminación de la humedad permite que las partículas de sílice interactúen más efectivamente en sus aplicaciones finales y mejora la manejabilidad y almacenabilidad del producto. Además, el secado puede mejorar la pureza de la sílice al eliminar cualquier impureza que pueda haber quedado atrapada en la humedad.

- **Clasificación**

La clasificación es el proceso de separación de las partículas de sílice en grupos de diferentes tamaños. Este proceso es crucial para garantizar que el producto final tenga las características de tamaño adecuadas para sus aplicaciones previstas. La clasificación puede ser de varios tipos, dependiendo de las necesidades específicas de la operación y del producto final.

- ✓ Clasificación por tamaño: Este es el método más común de clasificación, en el que las partículas de sílice se separan en grupos de diferentes tamaños utilizando una serie de tamices o pantallas con diferentes tamaños de malla.
- ✓ Clasificación por densidad: En este método, las partículas de sílice se separan en base a su densidad utilizando una corriente de agua u otro fluido. Las partículas más densas tienden a hundirse, mientras que las partículas menos densas flotan, permitiendo su separación.

- **Características y razones principales de la clasificación**

La clasificación es un proceso que separa las partículas de sílice en grupos de diferentes tamaños o densidades. Este proceso es crucial para garantizar que el producto final tenga las características de tamaño o densidad adecuadas para sus aplicaciones previstas. La clasificación puede ser un proceso intensivo en energía, y la eficiencia del proceso puede depender de las características específicas de las partículas de sílice y del equipo de clasificación utilizado. La clasificación es esencial para garantizar que el producto final tenga las características de tamaño o densidad adecuadas para sus aplicaciones previstas. Diferentes aplicaciones pueden requerir partículas de sílice de diferentes tamaños o densidades, por lo que la clasificación permite adaptar el producto

a estas necesidades específicas. Además, la clasificación puede mejorar la eficiencia de los procesos de embalaje y transporte al permitir que las partículas de similar tamaño o densidad se agrupen juntas.

1.3 Tecnologías de secado

El secado es un proceso crítico en la producción de sílice ya que un secado inadecuado puede resultar en problemas de calidad como la aglomeración o el deterioro de las partículas, así como también puede llevar a un aumento en los costos de producción debido al tiempo adicional necesario para que los materiales se sequen adecuadamente. Por lo tanto, el diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice debe incluir consideraciones específicas y tecnologías avanzadas para garantizar que el proceso de secado sea eficiente y produzca resultados de alta calidad (Cuervo Aguiar, 2019).

Una de las consideraciones clave en el diseño de una planta de secado es la elección del método de secado adecuado. Hay varios métodos de secado disponibles, pero los más comunes para el tratamiento y secado de sílice son el secado por aire caliente y el secado por tambor rotativo. El secado por aire caliente implica exponer los materiales húmedos a una corriente de aire caliente que extrae la humedad y la evapora. Este método de secado es simple y eficaz, pero tiene una limitación importante: la capacidad de la corriente de aire caliente para penetrar en el material en profundidad es limitada y, por lo tanto, puede requerir tiempos de secado prolongados. Además, la exposición prolongada al calor puede provocar la oxidación del material y afectar su calidad (Paredes Sánchez, 2023).

Por otro lado, el secado por tambor rotativo implica el uso de cilindros giratorios para mover el material mientras se somete a un flujo de aire caliente. Esto permite una mayor capacidad de penetración en el material y, por lo tanto, reduce el tiempo de secado

necesario. Además, el proceso de rotación ayuda a evitar la deformación del material y la aglomeración.

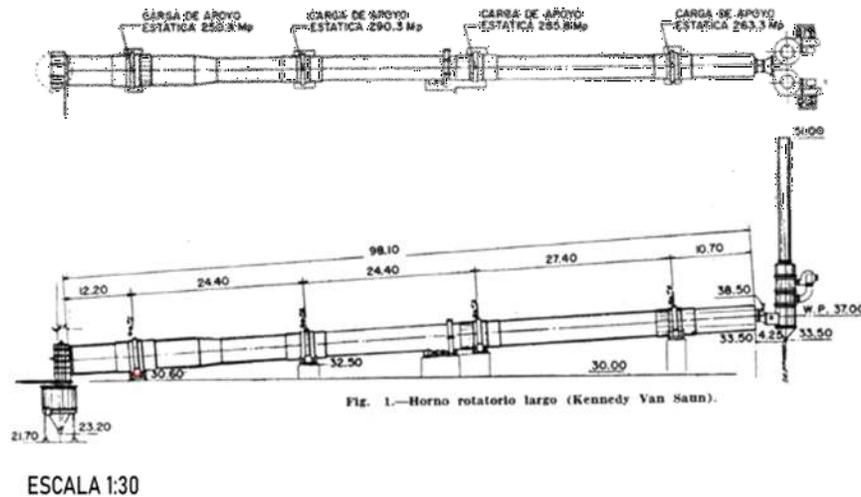
Sin embargo, tanto el secado por aire caliente como el secado por tambor rotativo requieren una fuente de calor para producir el aire caliente necesario para el proceso de secado. La elección de la fuente de calor debe considerar factores como el costo de combustible, la disponibilidad y la capacidad de calefacción. En general, las plantas de secado pueden utilizar una variedad de fuentes de calor, como el gas natural, el aceite o la electricidad, dependiendo de la ubicación y los recursos disponibles en la zona.

Además del método de secado, es importante considerar el diseño de la planta para garantizar una eficiencia óptima del proceso de secado. La planta debe incluir características como un sistema de ventilación adecuado, filtros de aire y dispositivos de control de temperatura para mantener una temperatura y humedad óptimas durante todo el proceso de secado.

En resumen, el tratamiento y secado de sílice requiere un enfoque cuidadoso y considerado para garantizar un proceso de secado eficiente y de alta calidad. El diseño de una planta de secado debe incluir la elección de un método de secado adecuado, una fuente de calor eficiente y un diseño de planta que permita un flujo de aire y una temperatura óptima.

1.3.1 Consumo de Energía

El consumo de combustible de los hornos rotatorios como se muestra en la figura es, generalmente, elevado; por encima de $1,75$ a $2,00 \times 10^3$ kcal/kg; el consumo de energía oscila de 24 a 32 kWh/t, dependiendo principalmente del tipo de sistema de combustión y de las exigencias de recuperación de polvo. (Schwarzkopf, 1971)

Figura 12.*Horno Rotatorio.***Fuente:** (Dalteknik, 2019)

1.4 Diseño y construcción de plantas

El secado es un proceso crítico en la producción de sílice ya que un secado inadecuado puede resultar en problemas de calidad como la aglomeración o el deterioro de las partículas, así como también puede llevar a un aumento en los costos de producción debido al tiempo adicional necesario para que los materiales se sequen adecuadamente. Por lo tanto, el diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice debe incluir consideraciones específicas y tecnologías avanzadas para garantizar que el proceso de secado sea eficiente y produzca resultados de alta calidad (Cobos, Li, Garcia, & al, 2023).

Una de las consideraciones clave en el diseño de una planta de secado es la elección del método de secado adecuado. Hay varios métodos de secado disponibles, pero los más comunes para el tratamiento y secado de sílice son el secado por aire caliente y el secado por tambor rotativo.

El secado por aire caliente implica exponer los materiales húmedos a una corriente de aire caliente que extrae la humedad y la evapora. Este método de secado es simple y eficaz, pero tiene una limitación importante: la capacidad de la corriente de aire caliente para penetrar en el material en profundidad es limitada y, por lo tanto, puede requerir tiempos de secado prolongados. Además, la exposición prolongada al calor puede provocar la oxidación del material y afectar su calidad (Cobos, Li, Garcia, & al, 2023).

Por otro lado, el secado por tambor rotativo implica el uso de cilindros giratorios para mover el material mientras se somete a un flujo de aire caliente. Esto permite una mayor capacidad de penetración en el material y, por lo tanto, reduce el tiempo de secado necesario. Además, el proceso de rotación ayuda a evitar la deformación del material y la aglomeración.

Sin embargo, tanto el secado por aire caliente como el secado por tambor rotativo requieren una fuente de calor para producir el aire caliente necesario para el proceso de secado. La elección de la fuente de calor debe considerar factores como el costo de combustible, la disponibilidad y la capacidad de calefacción. En general, las plantas de secado pueden utilizar una variedad de fuentes de calor, como el gas natural, el aceite o la electricidad, dependiendo de la ubicación y los recursos disponibles en la zona (Baquero Beltrán, 2021).

Además del método de secado, es importante considerar el diseño de la planta para garantizar una eficiencia óptima del proceso de secado. La planta debe incluir características como un sistema de ventilación adecuado, filtros de aire y dispositivos de control de temperatura para mantener una temperatura y humedad óptimas durante todo el proceso de secado.

El tratamiento y secado de sílice requiere un enfoque cuidadoso y considerado para garantizar un proceso de secado eficiente y de alta calidad. El diseño de una planta de secado debe incluir la elección de un método de secado adecuado, una fuente de calor eficiente y un diseño de planta que permita un flujo de aire y una temperatura óptimos.

1.5 Automatización y control

Se puede explorar la tecnología de automatización y control utilizada en la planta, incluyendo la instrumentación, sistemas de control de procesos y software de monitoreo. La automatización y el control son cruciales en el diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice. Se requiere un control riguroso de procesos para garantizar que la sílice se procese adecuadamente y se seque de manera eficiente (Azarfam, Nadian, Moezzi, & Gholami, 2020).

La automatización implica la implementación de sistemas de control y monitoreo utilizando tecnologías avanzadas, como software de supervisión y control, sensores de temperatura y humedad, dispositivos de medición en línea, entre otros. Estos sistemas permiten a los operadores monitorear de cerca el proceso de producción y tomar decisiones basadas en datos precisos. Además, la automatización ayuda a mejorar la eficiencia del proceso al reducir el tiempo de inactividad, minimizar errores y reducir el consumo de energía. Esto garantiza que la planta funcione de manera más rentable y con una mayor capacidad de producción. La automatización y el control efectivos son fundamentales en el diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice para garantizar la eficiencia del proceso, la rentabilidad y la calidad del producto final (Alsaeedi, y otros, 2019).

1.6 Sistemas de seguridad y medio ambiente

Se pueden abordar los aspectos de seguridad y salud ocupacional, así como también las medidas para minimizar el impacto ambiental del proceso de tratamiento y

secado de sílice (Khan, y otros, 2021). El diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice puede implicar consideraciones relacionadas con la seguridad y el medio ambiente. Algunas posibles medidas de seguridad que deben ser consideradas en el diseño de la planta pueden incluir:

1. Identificación de los riesgos asociados con el manejo y tratamiento de la sílice: La sílice es un polvo fino que puede causar irritación en los ojos, la piel y el tracto respiratorio, por lo que se deben establecer medidas de control de exposición.
2. Implementación de equipo de protección personal: Se debe equipar a los trabajadores con equipo de protección personal adecuado, como respiradores, gafas protectoras y guantes.
3. Sistema de ventilación adecuado: El diseño de la planta debe incluir un sistema de ventilación adecuado para evitar la acumulación de polvo de sílice en el aire, permitiendo mantener la calidad del aire en interiores saludable.

En cuanto al medioambiente, se pueden considerar las siguientes medidas durante el diseño de la planta:

1. Controlar la emisión de gases: La operación de la planta puede generar gases de escape que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente. El uso de sistemas de captura y tratamiento de gases puede reducir los niveles de emisiones contaminantes.
2. Gestión de desechos: El tratamiento de la sílice puede producir desechos sólidos que deben ser manejados adecuadamente. La

implementación de métodos seguros de almacenamiento y disposición ayudará a minimizar el impacto ambiental.

Estas son algunos ejemplos de cómo el diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice puede implicar consideraciones de seguridad y medio ambiente.

1.7 Planificación de la producción

Para el diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice, es necesario seguir un proceso cuidadoso y detallado (Song, y otros, 2021). A continuación, se presentan los pasos generales en la planificación de la producción de una planta de este tipo:

1. **Análisis de la materia prima:** Se deben realizar pruebas y análisis para conocer la calidad y características de la sílice a tratar, para determinar qué procesos son los adecuados y cuáles son los requisitos de equipo especializado.

2. **Diseño del proceso:** Conocidas las especificaciones de la materia prima, se deben diseñar los procesos necesarios para tratarla. Por ejemplo, esto podría incluir la limpieza del sílice, trituración, molienda, separación, sedimentación, filtración y secado.

3. **Selección y adquisición de equipos:** Con base en el diseño del proceso, se deben seleccionar y adquirir los equipos especializados necesarios para cada etapa del proceso.

4. **Diseño de la planta:** Conocidos los equipos necesarios, se debe proceder con el diseño de la planta, teniendo en cuenta factores como los flujos de materiales, la disposición de los equipos y la seguridad de los trabajadores.

5. **Construcción de la planta:** Una vez finalizado el diseño, se debe proceder con la construcción de la planta, cumpliendo con las normas y reglamentaciones para garantizar la seguridad y eficiencia del proceso.

6. Puesta en marcha y pruebas: Al construir la planta, es importante realizar pruebas exhaustivas y ajustes necesarios antes de poner en marcha la producción.

7. Producción y mantenimiento: Finalmente, se debe establecer un programa de producción y mantenimiento para garantizar la eficiencia y calidad del proceso a largo plazo.

Es importante tener en cuenta que cada proceso es único y puede requerir consideraciones adicionales. Además, es fundamental cumplir con los reglamentos y normas de seguridad para prevenir posibles riesgos para la salud y el medio ambiente durante todo el proceso (Song, y otros, 2021).

CAPÍTULO 2

2 TRATAMIENTO DE LA SILICE

2.1 Tratamiento de la sílice

En la sílice, la unidad estructural básica consiste en un tetraedro de SiO_4 , es decir, un átomo de silicio siempre rodeado por cuatro átomos de oxígeno. Los enlaces iónicos y covalentes son las fuerzas responsables de mantener unidos a estos átomos, lo que resulta en una fuerza de unión significativa. La distancia entre los átomos de silicio y oxígeno no es uniforme, las unidades tetraédricas no se repiten de manera regular y el compuesto exhibe desorden. Se llama sílice amorfa a esta última, mientras que a la forma ordenada se le conoce como sílice cristalina. Ambas variantes se emplean en la fabricación del vidrio.

2.2 Proceso del material frente de explotación hasta el almacenamiento

El proceso comienza con la carga del material de sílice bruto en un depósito de almacenamiento. Este material puede ser sílice en bruto extraído de canteras o minas, y puede contener impurezas y partículas no deseadas.

Desde el depósito, el material se alimenta en una chancadora. Una chancadora es una máquina que reduce el tamaño de las partículas del material mediante la aplicación de fuerza mecánica. En este paso, la sílice bruta se tritura en fragmentos más pequeños y manejables.

Figura 13.

Chancadora de mandíbulas



Fuente: (Chaeng, 2019)

Los fragmentos más grandes de sílice provenientes de la chancadora se alimentan en un molino de martillos. El molino de martillos es un dispositivo que utiliza martillos giratorios para pulverizar aún más el material. Esto reduce el tamaño de las partículas a un nivel más fino y uniforme.

Figura 14.

Trituradora de martillo



Fuente: (Joyal, 2021).

Una vez acabado el proceso de trituración el material se introduce en una zaranda clasificadora, el material que no cumple los estándares requeridos regresa por medio de una banda transportadora nuevamente a la chancadora de mandíbulas y se vuelve a realizar el proceso de chancado y triturado.

El material es enviado en pulpa con la ayuda de una bomba especial para pulpas y lodo debido al gran volumen de pulpa más el agua, al tanque de lavado a través de mangueras, la cantidad de agua a circular por la manguera suministrada por una manguera de ½ pulgada constantemente.

Figura 15.

Bomba para pulpas y lodos



Fuente: (Inducom, s.f.)

Después de pasar por el molino de martillos, el material triturado se introduce en un tanque de lavado con agua. El objetivo de este paso es eliminar las impurezas adheridas a la sílice y separarlas del material deseado. El agua se utiliza para lavar y eliminar partículas no deseadas, como arcilla, limo y otros contaminantes. (Joyal, 2021)

Figura 16.

Tanque de lavado.



Fuente: (MadeinChina, 2019).

Después de que el material de sílice ha sido lavado con agua para eliminar impurezas y partículas no deseadas, el agua de lavado suele estar contaminada con los materiales que se han eliminado de la sílice. Para separar estas impurezas del agua y permitir que el agua se limpie antes de su posible reutilización o liberación en el medio ambiente, se utiliza un proceso llamado sedimentación en pozos.

Los pozos de sedimentación son tanques o estructuras especialmente diseñadas donde se permite que el agua de lavado cargada de impurezas se asiente y repose durante un período de tiempo. Durante este tiempo, las partículas sólidas más pesadas y las impurezas suspendidas en el agua comienzan a sedimentar o asentarse en el fondo del

pozo debido a la gravedad. Las partículas más grandes y densas se hunden más rápido, mientras que las más pequeñas pueden tardar más en asentarse.

Una vez que el material ha sido lavado y las impurezas se han separado, el material de sílice lavado se acumula en una zona de almacenamiento temporal. Aquí se puede llevar a cabo un proceso de control de calidad para asegurarse de que el material cumple con los estándares deseados en términos de pureza y tamaño de partícula.

Una vez que el proceso de lavado ha purificado el material de sílice, este material pasa a una etapa crucial de fraguado y almacenamiento, donde se prepara para los pasos posteriores del proceso. El fraguado es esencial para estabilizar y consolidar el material, lo que lo hace más manejable y adecuado para su manipulación y transporte.

Figura 17.

Retroexcavadora.



Fuente: (Sian Construction Equipment, 2022).

En este punto, el material lavado es transferido con precisión y eficiencia utilizando una retroexcavadora. Esta maquinaria de manipulación robusta y potente

permite el movimiento controlado del material desde la zona de lavado hasta una tolva de almacenamiento intermedio. La retroexcavadora garantiza la carga y descarga eficiente del material, minimizando la posibilidad de contaminación cruzada y asegurando la continuidad del proceso.

Desde la tolva de almacenamiento intermedio, el material lavado es dirigido hacia una tolva de carga mediante el empleo de una cinta transportadora. Esta banda transportadora está diseñada para un flujo constante y uniforme, asegurando que el material sea entregado de manera eficiente a la siguiente etapa del proceso. La tolva de carga actúa como un punto de transición, permitiendo la regulación del flujo de material hacia la etapa de secado.

Figura 18.

Tolvas.



Fuente: (Alibaba.com, 2021)

Después de la tolva de carga, el material de sílice lavado es dirigido por medio de cintas transportadoras hacia un sistema de tubos de secado.

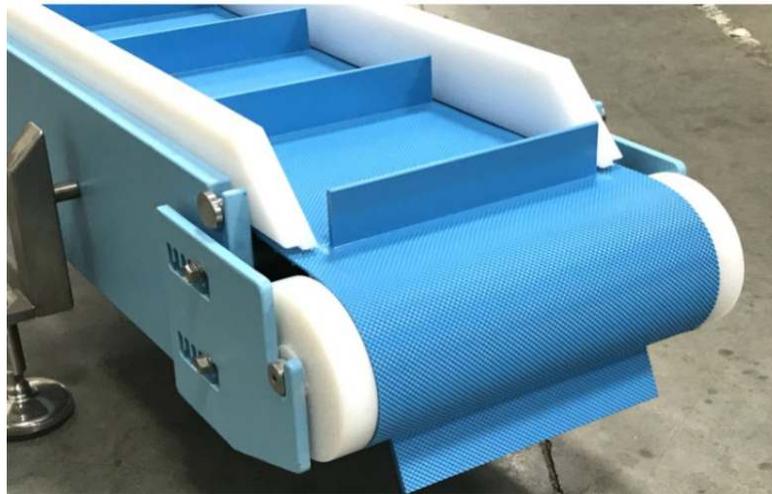
Modelos tentativos para la planta:

- BT150(150cm largo * 60cm ancho)
- BT250L (250cm largo * 60cm ancho)
- BT300(300cm largo * 60cm ancho)

Los tres modelos fueron seleccionados de acuerdo con la velocidad que se requiere a la que recorra el material.

Figura 19.

Cintas transportadoras.



Fuente: (Covetech, 2021)

El proceso de secado es esencial para eliminar la humedad residual del material, lo que contribuye a mejorar su estabilidad y reduce la posibilidad de aglomeración durante el almacenamiento y transporte posterior. Los tubos de secado son diseñados específicamente para aplicar calor controlado y circulación de aire a través del material.

Figura 20.

Tubo de secado



Fuente: (Connecting Buyers With Chinese Suppliers, 2022)

Una vez que el material ha pasado por los tubos de secado y ha alcanzado el nivel de humedad deseado, es descargado en una zaranda vibratoria.

Figura 21.

Zaranda



Fuente: (Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment inc, 2021)

La zaranda tiene la función de clasificar el material en diferentes fracciones según su tamaño de partícula. Las partículas más finas, que cumplen con los requisitos de calidad para la comercialización, son separadas y listas para ser enviadas al mercado. Mientras tanto, las partículas más gruesas se dirigen hacia un área de almacenamiento dedicada, donde se mantienen para volver a ser procesadas en futuros ciclos.

2.3 Procedimiento para caracterizar el material

2.4 Ensayos físicos

2.4.1 Tamaño de partícula (ASTM C124)

Se utilizó el método de sedimentación para determinar el tamaño de partícula promedio de la sílice. El resultado obtenido es un tamaño de partícula promedio de 20 μm . Esto indica que las partículas de sílice en la muestra son relativamente pequeñas.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Dispersante (líquido)
- Dispositivo de medición de densidad (picnómetro)
- Balanza analítica
- Agua destilada
- Sedimentómetro o pipeta sedimentómetro
- Cronómetro o reloj
- Tubos de sedimentación

Procedimiento:

Preparación de la muestra: La muestra de sílice se debe preparar cuidadosamente, asegurándose de que esté seca y libre de cualquier contaminante o partículas extrañas.

Dispersión: Se coloca una cantidad conocida de la muestra de sílice en un líquido dispersante adecuado (por lo general, agua destilada). Este proceso asegura que las partículas de sílice se dispersen uniformemente en el líquido.

Medición de densidad: Se determina la densidad del líquido dispersante utilizando un picnómetro. Esto es importante para calcular el volumen de las partículas de sílice en suspensión.

Llenado del sedimentómetro: El líquido dispersante con las partículas en suspensión se transfiere a un tubo de sedimentación o un sedimentómetro con cuidado para evitar la entrada de burbujas de aire.

Medición del tiempo de sedimentación: Se inicia un cronómetro o reloj y se registra el tiempo necesario para que las partículas de sílice se depositen en el fondo del sedimentómetro.

Cálculo del tamaño de partícula: Utilizando los datos de densidad del líquido dispersante y el tiempo de sedimentación, se utiliza la ley de Stokes para calcular el tamaño de partícula promedio de la sílice en la muestra.

El resultado obtenido mediante el ensayo de tamaño de partícula utilizando el método ASTM C124 indica que el tamaño de partícula promedio de la sílice en la muestra es de 20 μm . Esto significa que las partículas de sílice son relativamente pequeñas en tamaño.

La información sobre el tamaño de partícula es fundamental en diversas aplicaciones, ya que puede influir en propiedades como la reactividad química, la capacidad de carga, la porosidad y la capacidad de flujo de la sílice en distintos procesos industriales. En este caso, una sílice con un tamaño de partícula promedio de 20 micrómetros puede ser adecuada para aplicaciones específicas donde se requiere un tamaño de partícula controlado y uniforme.

2.4.2 Densidad ASTM C204

Se determinó la densidad de la sílice utilizando el método de la balanza hidrostática. El valor obtenido es de 2,65 g/cm³, lo que sugiere que la sílice es relativamente densa y compacta.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Balanza analítica
- Picnómetro
- Agua destilada
- Horno
- Pipetas

Procedimiento:

Preparación del picnómetro: El picnómetro se llena inicialmente con agua destilada y se pesa con precisión en una balanza analítica. Esto proporciona la masa de agua que ocupará el picnómetro en condiciones conocidas.

Pesar la muestra de sílice: Se pesa con precisión una cantidad conocida de la muestra de sílice en una balanza analítica. Es importante que la muestra esté seca y libre de humedad.

Llenado del picnómetro con la muestra: La muestra de sílice se coloca en el picnómetro, y se asegura de que no queden burbujas de aire atrapadas. Luego, se llena el picnómetro con agua destilada hasta el nivel de referencia.

Pesado del picnómetro lleno: Se pesa nuevamente el picnómetro lleno con la muestra de sílice y agua destilada.

Cálculo de la densidad: Utilizando los pesos obtenidos en los pasos anteriores y el principio de Arquímedes, se calcula la densidad de la muestra de sílice.

El resultado obtenido mediante el ensayo de densidad utilizando el método ASTM C204 muestra que la densidad de la sílice es de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Esta densidad es relativamente alta, lo que sugiere que la sílice es un material denso y compacto.

La densidad es una propiedad importante que puede influir en las aplicaciones y comportamiento de la sílice en diferentes contextos. Una densidad alta puede indicar que la sílice es adecuada para aplicaciones en las que se requiere una alta resistencia o capacidad de carga, como en la fabricación de concreto de alta resistencia. También puede ser relevante en aplicaciones de filtración o como carga en productos compuestos.

2.4.3 Índice de refracción (ASTM C227)

Se utilizó un refractómetro para medir el índice de refracción de la sílice, que resultó ser 1,54. El índice de refracción es una medida de la capacidad de un material para refractar la luz y puede ser útil para identificar la sílice en aplicaciones de análisis químico o mineralógico.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Refractómetro
- Fuente de luz
- Prisma de refracción o prisma de Abbe
- Líquido de contacto (generalmente aceite de inmersión)
- Porta muestras

Procedimiento:

Preparación de la muestra: La muestra de sílice se debe preparar para que esté en una forma adecuada para el ensayo. Esto puede implicar la trituración y molienda de la muestra para obtener una superficie plana y lisa.

Configuración del refractómetro: Se coloca la muestra en el porta muestras del refractómetro.

Calibración del refractómetro: Antes de medir la muestra, el refractómetro se calibra utilizando una sustancia de referencia con un índice de refracción conocido. Esto asegura la precisión de la medición.

Medición del índice de refracción: Se dirige una fuente de luz a través de la muestra de sílice. La luz se refracta al pasar a través de la muestra debido a su índice de refracción. La refracción se mide utilizando un prisma de refracción o un prisma de Abbe. El líquido de contacto (generalmente aceite de inmersión) se utiliza entre la muestra y el prisma para garantizar un contacto adecuado y minimizar las reflexiones.

Registro del índice de refracción: El refractómetro muestra el valor del índice de refracción de la muestra de sílice.

El resultado obtenido mediante el ensayo de índice de refracción utilizando el método ASTM C227 muestra que el índice de refracción de la sílice es de 1,54. El índice de refracción es una medida de la capacidad de un material para cambiar la dirección de la luz cuando esta pasa a través del material. Un índice de refracción específico es característico de un material y puede utilizarse para identificarlo o verificar su pureza.

En este caso, el índice de refracción de 1,54 es típico de la sílice, lo que indica que la muestra es consistente con este material. Esto es útil en aplicaciones de análisis químico o mineralógico, donde la identificación precisa de la sílice es importante. También puede ser relevante en la fabricación de materiales ópticos, como lentes y vidrios, donde el índice de refracción es una propiedad crítica para su rendimiento.

2.4.4 Dureza (ASTM C137 - Escala de Mohs)

Se aplicó el ensayo de Mohs para determinar la dureza de la sílice, y se encontró que tiene una dureza de 7 en la escala de Mohs. Esto indica que la sílice es un material bastante duro.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Conjunto de minerales de la escala de Mohs (generalmente 10 minerales)
- Placa de vidrio o una superficie lisa

Procedimiento:

Preparación de la superficie: Se selecciona una superficie lisa de la muestra de sílice para realizar la prueba. Esta superficie debe estar libre de impurezas y contaminantes.

Selección de los minerales de la escala de Mohs: Se utiliza un conjunto de minerales de la escala de Mohs, que consta de 10 minerales con diferentes niveles de dureza, desde el talco (dureza 1) hasta el diamante (dureza 10).

Aplicación de los minerales: Se toma un mineral de menor dureza de la escala de Mohs y se intenta rayar la superficie de la muestra de sílice presionando con fuerza, pero de manera controlada. Se repite este proceso para cada mineral de la escala de Mohs, en orden ascendente de dureza.

Observación de los resultados: Se observa si se produce alguna marca o rayadura en la superficie de la sílice durante la prueba con cada mineral. La dureza se determina según el mineral de la escala de Mohs que logra rayar la sílice.

El resultado obtenido mediante el ensayo de dureza utilizando la escala de Mohs según el estándar ASTM C137 indica que la dureza de la sílice es de 7 en la escala de Mohs. Esto significa que la sílice tiene una dureza equivalente a minerales de dureza 7 de la escala de Mohs, como el cuarzo o el feldespato.

La dureza es una propiedad importante que describe la resistencia de un material a ser rayado por otros materiales más duros. En este caso, la sílice tiene una dureza relativamente alta, lo que la hace adecuada para aplicaciones donde se requiere resistencia a la abrasión o al desgaste, como en la fabricación de abrasivos, arena de fundición y materiales refractarios.

2.4.5 Resistencia a la compresión (ASTM C348)

Se realizó un ensayo de compresión para medir la resistencia a la compresión de la sílice, que resultó ser de 200 *MPa*. Esto es importante para evaluar la capacidad de la sílice para soportar cargas bajo compresión.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Máquina de ensayo de compresión
- Placas de compresión
- Calibrador o extensómetro (opcional)
- Dispositivo para medir la carga aplicada
- Cronómetro o reloj

Procedimiento:

Preparación de la muestra: La muestra de sílice se prepara cortando o moldeando en una forma geométrica específica, generalmente un cubo o un cilindro. La muestra debe estar libre de imperfecciones y defectos.

Configuración de la máquina de ensayo: La muestra se coloca entre dos placas en la máquina de ensayo de compresión. Las placas deben estar alineadas de manera uniforme con la muestra.

Calibración (opcional): Si se utiliza un calibrador o un extensómetro para medir la deformación de la muestra, se calibra adecuadamente para garantizar mediciones precisas de la deformación durante el ensayo.

Aplicación de la carga: Se aplica gradualmente una carga axial de compresión a la muestra de sílice a una velocidad constante. La carga se registra continuamente a medida que se aplica.

Registro de la deformación (opcional): Si se utiliza un calibrador o un extensómetro, se registra la deformación de la muestra a medida que se aplica la carga.

Registro del punto de rotura: Se continúa aplicando la carga hasta que la muestra de sílice se rompe o alcanza un punto en el que ya no puede soportar más carga. Este punto se registra como la resistencia a la compresión.

Cálculo de la resistencia a la compresión: Se calcula la resistencia a la compresión dividiendo la carga máxima aplicada por la superficie de la muestra en contacto con las placas de compresión.

El resultado obtenido mediante el ensayo de resistencia a la compresión según el estándar ASTM C348 muestra que la resistencia a la compresión de la sílice es de 200 MPa. Esto significa que la sílice puede soportar una carga compresiva de hasta 200 megapascuales antes de romperse.

La resistencia a la compresión es una propiedad importante en aplicaciones donde la sílice está sujeta a cargas compresivas, como en la fabricación de productos cerámicos, concretos de alta resistencia, materiales refractarios y otros productos industriales. Una resistencia a la compresión de 200 MPa es bastante sólida y sugiere que la sílice es adecuada para aplicaciones que requieren resistencia a la compresión y durabilidad.

2.5 Ensayos químicos

2.5.1 Contenido de sílice (ISO 11266)

Se utilizó la norma ISO 11266 para determinar el contenido de sílice en la muestra mediante un ensayo de calcinación. El resultado obtenido muestra que la sílice tiene un

contenido del 98%, lo que significa que la muestra está compuesta principalmente de sílice.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Horno de calcinación
- Balanza analítica
- Tubos o crisoles de porcelana
- Mufla (horno de alta temperatura)
- Desecador
- Reactivo químico adecuado para eliminar otras sustancias (generalmente ácido fluorhídrico, HF)
- Ácido nítrico (HNO_3)
- Agua destilada
- Equipos de seguridad personal (guantes, gafas de protección, bata)

Procedimiento:

Preparación de la muestra: La muestra de sílice se pesa con precisión en una balanza analítica y se coloca en un tubo o crisol de porcelana.

Calcinación: El tubo o crisol con la muestra se coloca en un horno de calcinación y se calienta a una temperatura específica durante un tiempo determinado. Durante este proceso, se queman todas las impurezas orgánicas y otros materiales volátiles, dejando solo la sílice.

Enfriamiento y desecación: Después de la calcinación, el tubo o crisol se retira del horno y se permite enfriar en un desecador para evitar la absorción de humedad. Luego, se pesa nuevamente para determinar la masa residual de sílice.

Tratamiento con ácido: Si aún quedan impurezas o materiales no deseados, se trata la muestra con ácido fluorhídrico (HF) para disolverlos y obtener una muestra pura de sílice.

Determinación del contenido de sílice: La cantidad de sílice se calcula restando la masa inicial de la muestra de la masa residual después de la calcinación y el tratamiento con ácido. Este valor se expresa como porcentaje del peso original de la muestra.

El resultado obtenido mediante el ensayo de contenido de sílice utilizando la norma ISO 11266 muestra que el contenido de sílice en la muestra es del 98%. Esto significa que el 98% del peso de la muestra original estaba compuesto de sílice pura después de la calcinación y, posiblemente, el tratamiento con ácido para eliminar otras impurezas.

Este ensayo es crucial para determinar la pureza de la muestra de sílice y es especialmente relevante en aplicaciones donde la pureza del material es esencial, como la fabricación de vidrio, productos cerámicos de alta calidad, componentes electrónicos y otros productos químicos y materiales avanzados. Un alto contenido de sílice (98% en este caso) indica una alta pureza y calidad de la muestra, lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren sílice de alta calidad y baja impureza.

2.5.2 *Contenido de impurezas (ISO 11267)*

Se aplicó la norma ISO 11267 para determinar el contenido de impurezas en la sílice mediante el método de fusión. El resultado indica que el contenido de impurezas es del 2%, lo que significa que la sílice es de alta pureza.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Horno de fusión
- Crisol de platino o crisol de sílice
- Fundente (generalmente una mezcla de carbonato de sodio y carbonato de potasio)
- Ácido nítrico (HNO_3)
- Agua destilada
- Pipetas y buretas
- Equipos de seguridad personal (guantes, gafas de protección, bata)

Procedimiento:

Preparación de la muestra: La muestra de sílice se pesa con precisión y se coloca en un crisol de platino o crisol de sílice.

Preparación del fundente: Se prepara una mezcla fundente adecuada que consiste en carbonato de sodio (Na_2CO_3) y carbonato de potasio (K_2CO_3). Esta mezcla ayuda a fundir la muestra y las impurezas a temperaturas elevadas.

Fusión: Se agrega la mezcla fundente al crisol que contiene la muestra de sílice. Luego, el crisol se coloca en un horno de fusión y se calienta a una temperatura elevada durante un tiempo suficiente para fundir la muestra y las impurezas.

Lixiviación: Después de la fusión, el contenido del crisol se disuelve en ácido nítrico (HNO_3) para solubilizar las impurezas y obtener una solución.

Neutralización: La solución se neutraliza utilizando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) para asegurar que todas las impurezas estén en forma de precipitado y no en solución.

Valoración: Se realiza una titulación utilizando una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) para determinar la cantidad de impurezas presentes en la muestra.

Cálculo del contenido de impurezas: Utilizando los datos obtenidos en la titulación, se calcula el contenido de impurezas en la muestra como un porcentaje del peso total.

El resultado obtenido mediante el ensayo de contenido de impurezas utilizando la norma ISO 11267 indica que el contenido de impurezas en la sílice es del 2%. Esto significa que solo el 2% del peso de la muestra estaba compuesto por impurezas después del proceso de fusión y titulación.

La identificación específica de las impurezas no se proporciona en la descripción del ensayo, por lo que no sabemos qué tipos de impurezas estaban presentes en la muestra de sílice. Sin embargo, el hecho de que el contenido de impurezas sea solo del 2% sugiere que la sílice es de alta pureza.

Este ensayo es esencial para garantizar que la sílice sea adecuada para aplicaciones en las que la pureza del material es crítica, como la fabricación de vidrio de alta calidad, productos electrónicos, cerámica de precisión y productos químicos de alta pureza. Un contenido de impurezas del 2% es bastante bajo y demuestra que la sílice es de alta calidad y adecuada para aplicaciones que requieren pureza.

2.5.3 Forma cristalina (ISO 11268)

Se utilizó la norma ISO 11268 para determinar la forma cristalina de la sílice mediante un ensayo de difracción de rayos X. Este análisis proporcionaría información

sobre la estructura cristalina de la sílice, lo que podría ser importante en aplicaciones específicas.

Materiales:

- Muestra de sílice
- Difractómetro de rayos X
- Fuente de rayos X
- Detector de rayos X
- Placas o portaobjetos de vidrio
- Equipos de seguridad personal (guantes, gafas de protección)

Procedimiento:

Preparación de la muestra: La muestra de sílice se tritura y muele para obtener un polvo fino y homogéneo.

Montaje en el difractómetro: La muestra se coloca en un portaobjetos de vidrio de manera uniforme y se monta en el difractómetro.

Configuración del difractómetro: El difractómetro se ajusta de acuerdo con las especificaciones del ensayo. Esto incluye la alineación de la muestra con la fuente de rayos X y el detector de rayos X.

Generación de rayos X: La fuente de rayos X se activa, y los rayos X se dirigen hacia la muestra. Cuando los rayos X inciden en la muestra, interactúan con la estructura cristalina de la sílice.

Detección de patrones de difracción: El detector de rayos X registra los patrones de difracción resultantes de la interacción de los rayos X con la muestra. Estos patrones son característicos de la estructura cristalina de la sílice y permiten determinar su forma cristalina.

Análisis de datos: Los patrones de difracción se analizan mediante software especializado para identificar los picos de difracción y determinar la estructura cristalina de la sílice.

Conclusiones:

El ensayo de forma cristalina utilizando la norma ISO 11268 mediante difracción de rayos X proporciona información detallada sobre la estructura cristalina de la sílice. Los patrones de difracción obtenidos revelan la disposición y la orientación de los átomos en la red cristalina de la sílice, lo que es fundamental para comprender sus propiedades y su comportamiento en aplicaciones específicas.

3 CAPÍTULO 3

3.1 DISEÑO DE LA PLANTA

3.1.1 Descripción de la información obtenida

El presente capítulo introduce el diseño de una planta para el tratamiento y secado de sílice, un componente esencial en una amplia gama de industrias, desde la manufactura de vidrio hasta la producción de productos químicos avanzados. Este proyecto representa una amalgama de ingeniería de procesos, diseño industrial y consideraciones ambientales, destinado a optimizar la eficiencia y calidad del proceso de tratamiento de sílice.

El objetivo fundamental de este proyecto es desarrollar una instalación que permita la transformación de la sílice en una forma que cumpla con los estándares de pureza y granulometría exigidos por los sectores industriales pertinentes. Para alcanzar este propósito, se aborda de manera exhaustiva cada fase del proceso, desde la recepción y preparación del material crudo hasta la obtención de la sílice tratado listo para su utilización en aplicaciones específicas.

Este capítulo se organiza en secciones que abarcan cada aspecto fundamental del diseño de la planta para el tratamiento y secado de sílice. A través de un análisis detallado de la selección de equipos, el diseño del flujo de proceso, los sistemas de control y la evaluación de riesgos, se pretende proporcionar una visión del proyecto en su conjunto.

Cada sección se complementará con diagramas, esquemas y datos cuantitativos relevantes, proporcionando una base sólida para la comprensión y evaluación del diseño propuesto. De esta manera, se espera que este capítulo sirva como una referencia detallada y esclarecedora para el desarrollo y ejecución de la planta de tratamiento y secado de sílice.

3.2 Requisitos del proceso

El primer paso en el diseño de la planta de tratamiento y secado de sílice es establecer claramente los objetivos que se quieren alcanzar, para ello, es crucial definir el grado de pureza al que se aspira y determinar la capacidad de procesamiento que la planta debe ser capaz de manejar.

3.3 Grado de Pureza del Sílice

Tras una revisión exhaustiva de las especificaciones de la industria, se propone como objetivo alcanzar un grado de pureza de la sílice del 99.5% o superior. Este nivel de pureza garantiza que el producto final cumple con los estándares más exigentes de las aplicaciones industriales previstas.

Tabla 3.

Grado de pureza del Sílice

Grado de Pureza	Descripción
99,5%	Este nivel de pureza es ampliamente reconocido como el estándar mínimo para aplicaciones industriales de alto valor.
Superior	Al apuntar a un grado de pureza superior al 99,5%, aseguramos que nuestro producto puede competir en los mercados de sílice de alta calidad y aplicaciones tecnológicas de vanguardia.
Cumplimiento Normativo	Este grado de pureza cumple con los estándares de calidad y especificaciones de la mayoría de las industrias que requieren sílice de alta pureza.

Fuente: Elaboración propia (2023).

El grado de pureza de la sílice es un factor determinante en su utilidad y valor en diversas aplicaciones industriales. Un grado de pureza del 99,5% o superior garantiza que la sílice pueda ser utilizado en industrias que demandan materiales de alta calidad y confiabilidad. Además, este nivel de pureza cumple con los estándares normativos más rigurosos, lo que es esencial para la aceptación en mercados regulados y altamente competitivos

3.4 Capacidad de Procesamiento

La capacidad de procesamiento es un factor crítico para la eficiencia y viabilidad de la planta. Considerando las proyecciones de demanda y el tamaño del mercado al que serviremos, se estima que la planta deberá tener una capacidad de procesamiento de al menos 100 ton métricas de sílice al día.

Tabla 4.

Capacidad de procesamiento

Capacidad de Procesamiento (Ton/d)	Descripción
150	Se estima que una capacidad de 150 ton / d es el nivel óptimo para nuestra planta.
Flexibilidad de Producción	Esta capacidad permite abordar una amplia gama de demandas, al tiempo que proporciona flexibilidad para ajustarse a cambios en el mercado o en los requerimientos de los clientes.
Escala Económica	Una capacidad de procesamiento de 150 ton/ d es económicamente viable y permite el beneficio de economías de escala en la producción.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Estos objetivos establecidos actuarán como los cimientos sobre los cuales se construirá el diseño detallado de la planta. Se asegura que cada etapa del proceso esté alineada con la consecución de estos objetivos, desde la recepción del material crudo hasta la obtención de la sílice tratada de alta pureza y la implementación de sistemas de control y monitoreo para garantizar su cumplimiento.

3.5 Selección del Equipo

Para llevar a cabo el proceso de tratamiento y secado de sílice de manera eficiente y precisa, es esencial seleccionar los equipos adecuados que abarquen cada etapa del proceso. A continuación, se presenta una lista de los equipos esenciales:

3.5.1 *Retroexcavadora*

La retroexcavadora es crucial para la manipulación y carga inicial del material crudo en el proceso. Proporciona la capacidad de excavación necesaria para la extracción eficaz de sílice de fuentes naturales.

3.5.2 *Tolva*

La tolva actúa como un contenedor de almacenamiento temporal para el material excavado, permitiendo un flujo controlado hacia la siguiente etapa del proceso.

3.5.3 *Chancadora de mandíbulas*

La chancadora de mandíbulas es esencial para reducir el tamaño del material crudo a una granulometría adecuada para su procesamiento posterior. Esto facilita una operación más eficiente y garantiza una alimentación uniforme en etapas posteriores.

3.5.4 *Trituradora de martillos*

La trituradora de martillos proporciona un proceso adicional de reducción de tamaño, garantizando que la sílice se encuentre en la forma y tamaño óptimos para las fases de lavado y secado.

3.5.5 Bomba

La bomba desempeña un papel importante ya que traslada la pulpa de la sílice junto al agua para seguir al proceso en el tanque de lavado.

3.5.6 Tanque de lavado

La lavadora desempeña un papel vital en la eliminación de impurezas y contaminantes del material. Garantiza un sílice limpio y preparado para las etapas posteriores.

3.5.7 Cinta transportadora

Las cintas transportadoras facilitan el movimiento eficiente del material entre diferentes etapas del proceso. Ofrecen una forma de transporte constante y controlada.

3.5.8 Tubo de secado

El tubo de secado proporciona el ambiente adecuado para la eliminación de la humedad de la sílice, preparando el material para la etapa final de procesamiento.

3.5.9 Zaranda

La zaranda es esencial para la clasificación y separación de partículas de sílice según su tamaño. Esto permite la obtención de diferentes fracciones de sílice (grueso y fino) según las especificaciones requeridas.

La eficiencia y el rendimiento de una planta de tratamiento y secado de sílice dependen en gran medida de la selección adecuada de equipos especializados. A continuación, presentamos una descripción detallada de los equipos clave que componen esta instalación, sus capacidades operativas, requisitos de potencia, dimensiones y peso. Estos equipos desempeñan roles cruciales en cada etapa del proceso, desde la extracción inicial hasta la clasificación final de la sílice tratada.

Tabla 5.*Clasificación de equipos*

Equipo	Modelo/Descripción	Capacidad (Ton/H)	Potencia Requerida (hp)	Dimensiones (m)	Peso (Ton)
Retroexcavadora	CAT 426F2	60	162,19	9,7 x 3,1 x 3,4	20,3
Tolva	AC-30	50	-	5,5 x 2,2 x 2,6	4,5
Chancadora de Mandíbulas	PE-400*600	20	40,23	1,8x 1,7x 1,6	6,6
Trituradora de Martillos	PC800*800	25	100,58	1,2 x 1,4 x 1,4	12,5
Zaranda	9911MPEGT-936	35	52,19	3,8 x 1,6 x 2,7	6,2
Bomba Hydrotek	IQ100-212	26 m ³ /h	22,32	0,9X0,9X0,7	0,6
Tanque de lavado	Eagle Iron Works 36x30	40	24,79	8,5 x 2,9 x 2,9	12,6
Cinta Transportadora	Dita DTC 500	30	20,11	15,0 x 1,0 x 0,3	3,0
Tuvo de secado	Allgaier Moisture Control	25	100,54	10,0 x 1,5 x 1,5	7,5
Zaranda	Metso CVB2060	25	29,491	4,0 x 2,0 x 1,5	5,8

Fuente: Elaboración propia (2023).

Contamos con una retroexcavadora que traslada el material distintas fases del proceso en la planta de tratamiento.

Estas especificaciones técnicas proporcionan un marco detallado para la selección y adquisición de los equipos necesarios para la planta de tratamiento y secado de sílice. Cada equipo ha sido elegido considerando sus capacidades técnicas para garantizar un funcionamiento eficiente y eficaz en cada etapa del proceso.

3.6 Diseño de la planta

Figura 22.

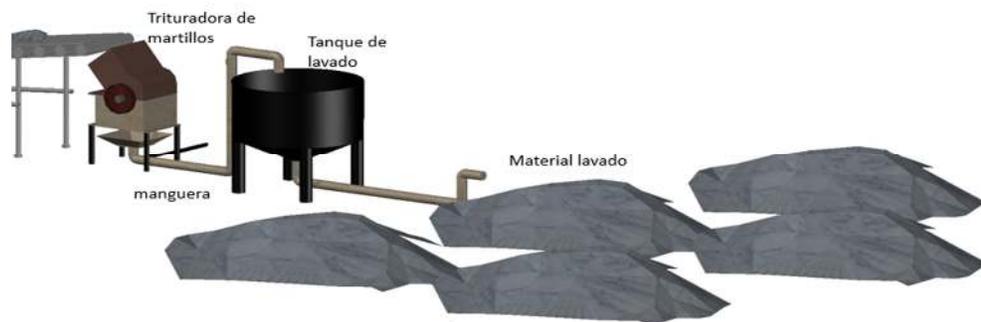
Transportación de material



Fuente: Elaboración propia (2023).

Figura 23.

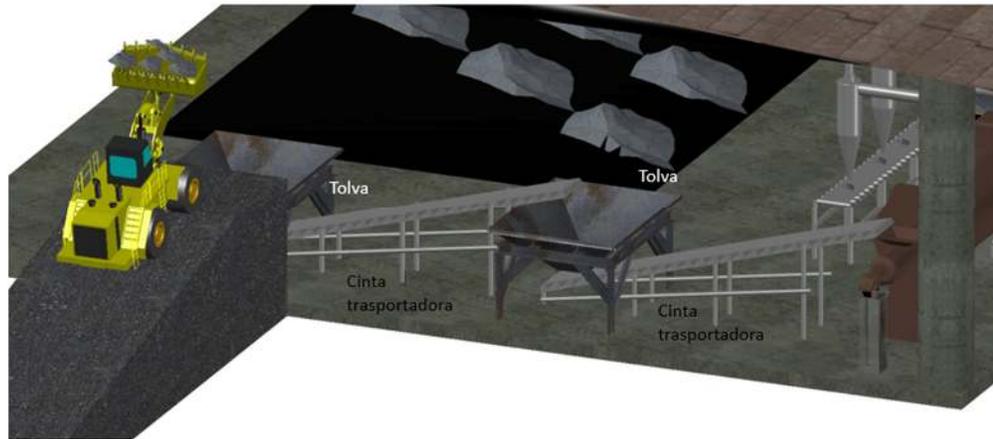
Proceso de trituración



Fuente: Elaboración propia (2023).

Figura 24.

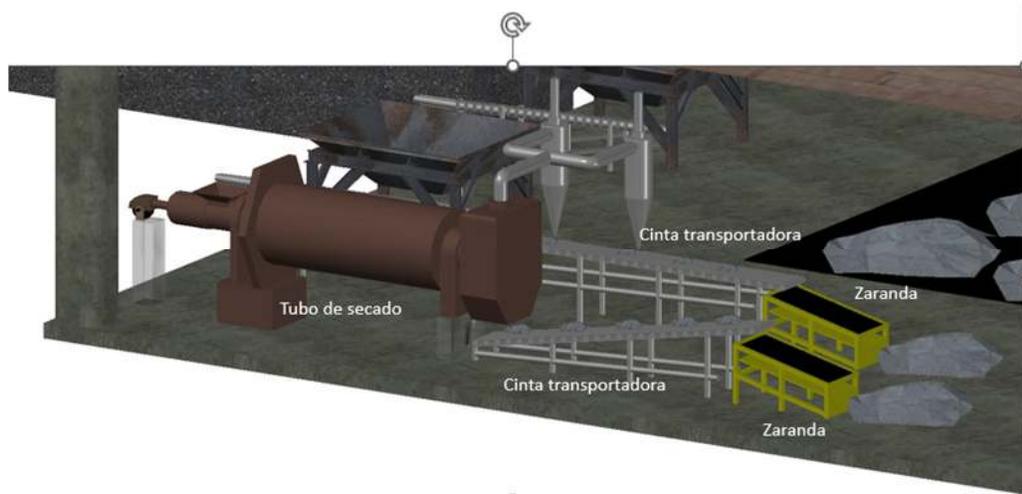
Transporte de material al techado



Fuente: Elaboración propia (2023).

Figura 25.

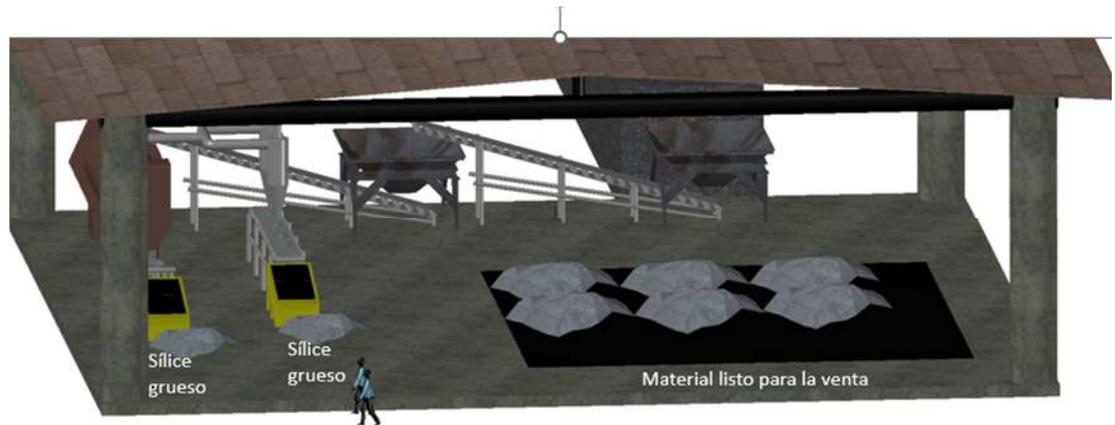
Proceso de secado del material sílice



Fuente: Elaboración propia (2023).

Figura 26.

Clasificación del material



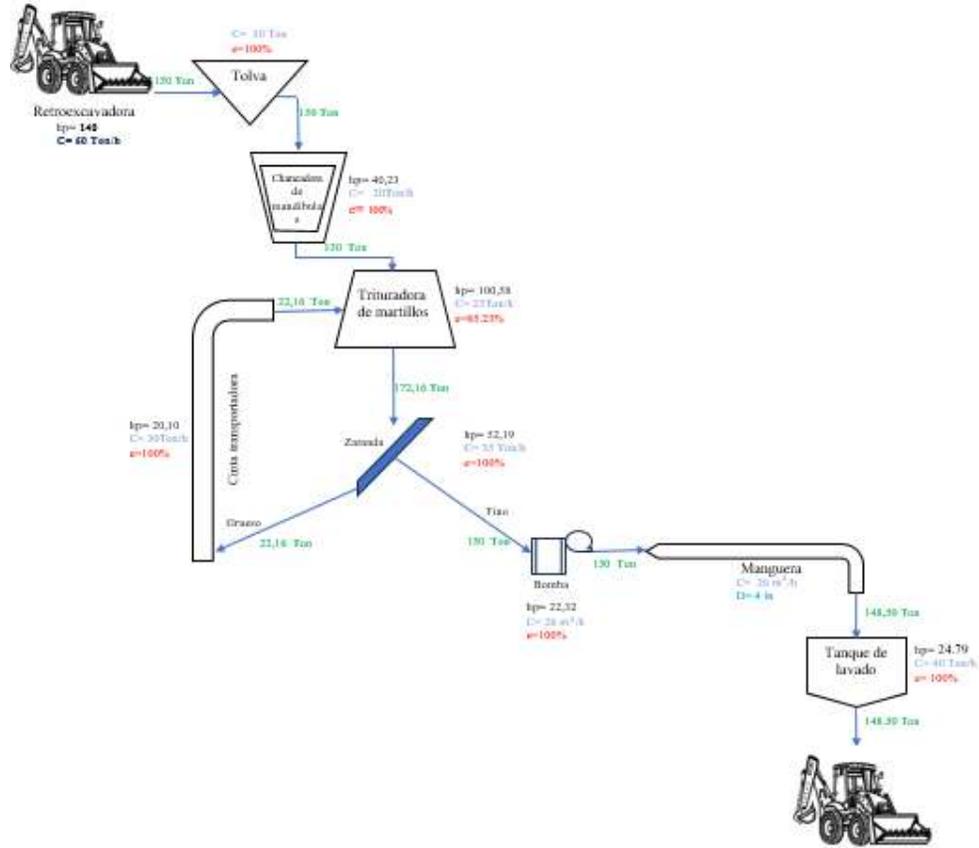
Fuente: Elaboración propia (2023).

3.6.1 Flujo de Proceso

El proceso de tratamiento y secado de sílice se lleva a cabo a través de una serie de etapas meticulosamente diseñadas para asegurar la obtención de sílice de alta calidad y pureza. A continuación, se describe en detalle cada una de las etapas del proceso:

Figura 27.

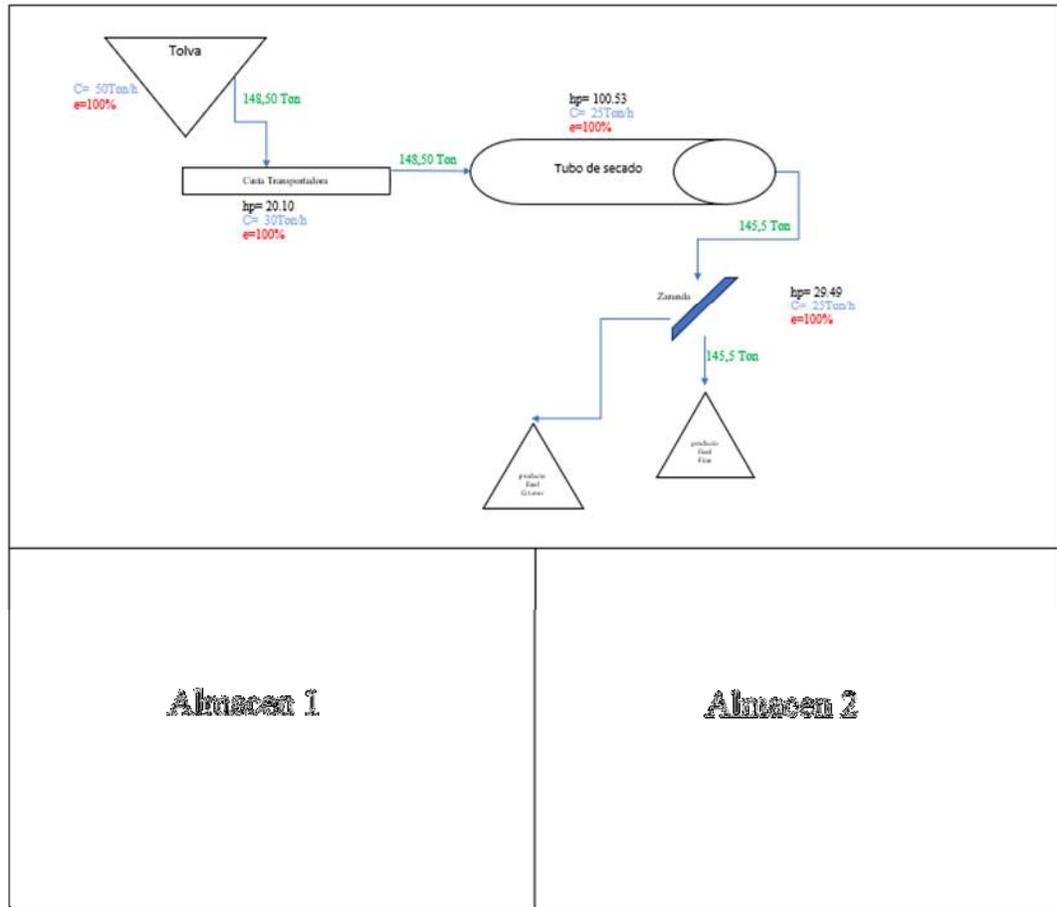
Diagrama de procesos al aire libre



Fuente: Elaboración propia (2023).

Figura 28.

Diagrama de procesos con cubierta

**Fuente:** Elaboración propia (2023).

La cubierta cuenta con dimensiones de 80 m x 80 m aptos para los procesos de secado, selección y conservación de material en óptimas condiciones.

3.6.2 Material a Procesar

El proceso comienza con la extracción del material crudo, que consiste en depósitos de sílice en su estado natural, utilizando una retroexcavadora. Esta máquina permite la extracción eficaz y controlada del material desde la fuente.

La fase inicial del proceso se centra en la extracción del material crudo de depósitos de sílice en su estado natural. Este material se compone principalmente de óxido de silicio (SiO_2) y puede presentar impurezas minerales y orgánicas. La retroexcavadora, una máquina especializada en trabajos de excavación, despliega su capacidad para extraer selectivamente la sílice de la fuente, garantizando una manipulación cuidadosa y controlada del material.

Esta etapa es fundamental, ya que la calidad y composición del material crudo impactan directamente en la eficacia de las etapas subsiguientes del proceso de tratamiento y secado. La retroexcavadora, al ser una herramienta de precisión en la extracción, asegura que la sílice inicial se encuentre en condiciones óptimas para la transformación posterior. Cada carga de material crudo es cuidadosamente seleccionada y transportada a la siguiente etapa, marcando el comienzo de un proceso meticulosamente planificado hacia la obtención de sílice de alta pureza.

3.6.3 Tolva (Almacenamiento Temporal)

Una vez el material crudo es extraído por la retroexcavadora, se dirige hacia una tolva de almacenamiento temporal. Esta tolva despeja el camino para un flujo de trabajo fluido y controlado en el proceso de tratamiento. Su función principal radica en proporcionar un espacio de almacenamiento donde el material crudo puede reposar de manera temporal antes de avanzar a las etapas siguientes.

La tolva está diseñada para manejar una capacidad específica, permitiendo así una acumulación controlada del material. Esta característica es esencial, ya que asegura un flujo constante de material hacia las etapas posteriores del proceso, incluso si hay fluctuaciones en la tasa de extracción de la retroexcavadora.

Además, la tolva está construida con dimensiones precisas con medidas 5,5 x 2,2 x 2,6 m que garantizan un adecuado almacenamiento sin comprometer la eficiencia operativa. Su diseño robusto y duradero proporciona estabilidad y confiabilidad durante el almacenamiento temporal.

La selección de una tolva adecuada y su ubicación estratégica en el proceso son consideraciones críticas para optimizar la eficiencia de la operación. Al proporcionar un espacio de almacenamiento controlado, la tolva juega un papel crucial en la preparación del material crudo para las fases subsiguientes de trituración y procesamiento.

3.6.4 Chancadora de Mandíbulas

El material crudo es alimentado desde la tolva hacia la chancadora de mandíbulas. Aquí, es reducido a un tamaño adecuado para su posterior procesamiento. Esta etapa facilita una operación más eficiente y garantiza una alimentación uniforme. Una vez el material crudo ha pasado por la fase de almacenamiento temporal en la tolva, es alimentado hacia la chancadora de mandíbulas. Este equipo desempeña un papel esencial en el proceso al reducir el tamaño del material a una granulometría adecuada para su posterior procesamiento.

La chancadora de mandíbulas funciona mediante la compresión del material entre dos superficies, lo que resulta en la fragmentación y reducción de tamaño. Este proceso garantiza que la sílice se encuentre en una forma óptima para las etapas de lavado y secado subsiguiente. El modelo seleccionado de la compañía Zxcruiser, PE-400*600 es reconocido por su eficiencia y confiabilidad en la trituración de materiales duros. Con una capacidad de trituración de 20 ton por hora y una potencia de motor de 40,23 hp, el tamaño de entrada a la entrada máximo de 1,02 m, asegurando una operación eficaz y productiva.

Las dimensiones de la chancadora, 1,8 m de largo por 1,7 m de ancho y 1,6 de alto, proporcionan un equilibrio entre rendimiento y espacio ocupado en la planta. Además, con un peso de 6,65 ton, se garantiza la estabilidad y seguridad durante la operación (Distrito Industrial Boai, s.f.).

La chancadora de mandíbulas es una etapa crítica en el proceso de tratamiento, ya que prepara el material crudo para las siguientes fases. Su capacidad para reducir el tamaño de manera eficiente y precisa asegura que la sílice se encuentre en condiciones ideales para la operación de lavado y secado.

3.6.5 Trituradora de Martillos

Posteriormente, el material triturado es procesado a través de una trituradora de martillos. Esta etapa proporciona una reducción adicional en el tamaño, asegurando que la sílice esté preparada óptimamente para las fases de lavado y secado.

Después de pasar por la chancadora de mandíbulas, el material triturado se somete a una fase adicional de reducción de tamaño a través de la trituradora de martillos. Este equipo desempeña un papel crucial al garantizar que la sílice esté preparado óptimamente para las etapas de lavado y secado posteriores.

La trituradora de martillos seleccionada, el tipo Hammer Crusher, el modelo PC800*800, es reconocida por su eficiencia en la reducción de tamaño de materiales duros. Con una capacidad de trituración de 25 ton/h y una potencia de motor de 100,58 hp, en tamaño máximo de entrada a la trituradora es de 0,8m y un mínimo de 0,48m y el de salida de 0,015 m, asegurando una operación efectiva y productiva.

Las dimensiones de la trituradora, 1,2 m de largo por 1,4 m de ancho y 1,4 m de alto, proporcionan un equilibrio entre rendimiento y espacio ocupado en la planta.

Además, con un peso de 12,5 ton, se garantiza la estabilidad y seguridad durante la operación (Connecting Buyers , s.f.).

La trituradora de martillos desempeña un papel esencial al asegurar que la sílice esté en la forma y tamaño óptimos para las fases de lavado y secado. Su capacidad para reducir el tamaño de manera eficiente y precisa es fundamental para el éxito global del proceso de tratamiento y secado de sílice.

3.6.6 Zaranda

La implementación de una zaranda vibratoria resulta crucial para mejorar la eficacia del proceso de secado y lograr el tamaño óptimo de la sílice requerida por el cliente. Después de las etapas de chancado y trituración, resulta imperativo llevar a cabo una selección del material, asegurando que aquellos que no cumplen con los requisitos de tamaño sean devueltos al proceso de chancado para alcanzar las dimensiones adecuadas. Esta medida garantiza la calidad final del producto y la satisfacción del cliente al recibir un material que cumple con sus especificaciones.

La zaranda vibratoria seleccionada es de la compañía Indars. Esta zaranda con su capacidad de 35 ton/ h con 3 cauchos de amortiguación, con las dimensiones de altura de 3,8 m de altura con 1.6 m de ancho y una profundidad de 2,7 m, este modelo cuneta con un moto vibrador de 52,19 hp, cuenta con una tolva descargable de producto y 2 mallas intercambiables (Indars S.A.S., s.f.)

Esta fase reviste una importancia crítica, ya que en ella se determina el tamaño del producto final. Si dicho tamaño no cumple con los requerimientos establecidos, se podrán realizar correcciones para evitar un desperdicio considerable al término del proceso. Por tanto, esta etapa se posiciona como un paso crucial en todo el proceso de producción.

3.6.7 Bomba

Una vez que el material alcanza el tamaño ideal para avanzar en el proceso, se procede a su transferencia al tanque de lavado a través de una manguera de 4 pulgadas. Esta manguera se mantiene constantemente alimentada con una mezcla compuesta por una manguera de ½ pulg, la cual se mezcla con la pulpa resultante del proceso de trituración. Este método garantiza un flujo continuo de material hacia el tanque de lavado, donde se llevan a cabo las siguientes etapas del proceso con precisión y eficacia.

El modelo escogido es de la compañía Dinatex y el modelo escogido es la bomba caudal Hydrotek IQ100-212 que tiene una capacidad de 26 m³/h con una potencia de motor de 22,34 hp, sus dimensiones especificadas en el catálogo son 0,9 m de ancho, de largo de 0,9 m y tiene una altura de 0,7 m (Dinatex , s.f.).

Durante esta etapa, la transferencia del material hacia otra zona del proceso adquiere una relevancia crucial. Sin embargo, es importante tener en cuenta que se registra una pérdida del 1% debido a fugas presentes en la manguera. Este porcentaje puede atribuirse al desgaste natural de la manguera, especialmente en un entorno variable como el clima cambiante del oriente. Dichas condiciones climáticas pueden acelerar el deterioro de la manguera y aumentar la probabilidad de fugas. Por lo tanto, es esencial monitorear y mantener regularmente las mangueras para minimizar las pérdidas y garantizar un flujo continuo y eficiente del material a lo largo del proceso.

3.6.8 Tanque de lavado

El material triturado es transferido a una lavadora especializada. Aquí, se lleva a cabo una rigurosa operación de lavado para eliminar impurezas y contaminantes, garantizando así un sílice limpio y preparado para las etapas siguientes. Una vez el material ha pasado por la trituradora de martillos, se somete a una etapa crítica: el lavado.

Esta fase es esencial para garantizar que la sílice esté completamente limpio y libre de impurezas antes de continuar con el proceso de secado.

La lavadora seleccionada, una Eagle Iron Works 36x30, es reconocida por su eficiencia en la eliminación de impurezas y contaminantes. Tiene una capacidad de lavado de 40 ton por hora y requiere una potencia de motor de 24,80 hp para operar de manera óptima. Con dimensiones de 8,5 m de largo por 2,9 m de ancho y alto, la lavadora proporciona un espacio adecuado para el proceso de lavado. Su diseño robusto y duradero garantiza una operación confiable y efectiva.

Durante esta etapa, el material es sometido a un proceso riguroso de lavado con agua, lo que permite la eliminación eficiente de impurezas y contaminantes. Este paso es fundamental para asegurar que la sílice esté completamente limpio y listo para las etapas posteriores de procesamiento y secado. La lavadora desempeña un papel esencial en la obtención de sílice de alta pureza y calidad.

3.6.9 Retroexcavadora (Segunda Manipulación)

Una vez lavado, el material es recogido nuevamente por una retroexcavadora para ser transferido a la siguiente fase del proceso. Después de completar la fase de lavado, el material se somete a una segunda manipulación a través de una retroexcavadora. Esta fase es crucial para asegurar que la sílice lavada esté lista para ser transportado y procesado en las etapas posteriores.

La retroexcavadora, con su capacidad de carga de 60 ton y una potencia de motor de 162,27 hp, demuestra ser un equipo esencial en esta fase. Su capacidad para manipular cargas pesadas con precisión y control proporciona una transición sin contratiempos desde la fase de lavado hasta las etapas subsiguientes del proceso.

Con dimensiones de 9,7 m de largo, 3,1 m de ancho y 3,4 m de alto, la retroexcavadora ofrece el espacio y la estabilidad necesarios para una manipulación efectiva del material. Su peso de 20,3 ton asegura una operación segura y estable. La retroexcavadora permite una transición eficiente del material lavado hacia las etapas posteriores del proceso. Su capacidad para manipular grandes volúmenes de material con precisión y control es esencial para mantener la eficiencia del flujo de trabajo en la planta de tratamiento y secado de sílice.

3.6.10 Tolva (Almacenamiento temporal)

La retroexcavadora deposita el material lavado en otra tolva de almacenamiento temporal, preparándolo para el siguiente tramo del proceso. Después de la segunda manipulación mediante la retroexcavadora, el material lavado se dirige hacia una segunda tolva de almacenamiento temporal. Esta etapa es esencial para mantener un flujo de trabajo continuo y controlado en el proceso de tratamiento.

La tolva de almacenamiento temporal proporciona un espacio donde el material lavado puede reposar temporalmente antes de continuar su viaje a través de las etapas posteriores del proceso. Al igual que en la etapa anterior, la capacidad de la tolva está cuidadosamente dimensionada para asegurar una acumulación controlada del material y un flujo constante hacia las siguientes etapas del proceso.

Esta tolva está diseñada específicamente para manejar material lavado, asegurando que la sílice se mantenga en condiciones óptimas para el procesamiento posterior. Su ubicación estratégica en el flujo de trabajo garantiza una transición sin problemas hacia la siguiente fase.

La tolva, con sus dimensiones precisas de 5,5 m de largo, 2,2 m de ancho y 2,6 m de alto, se adapta perfectamente al espacio asignado en la planta. Su diseño robusto y duradero proporciona estabilidad y confiabilidad durante el almacenamiento temporal.

La selección y ubicación estratégica de esta tolva en el proceso de tratamiento asegura un flujo de trabajo eficiente y controlado, preparando el material lavado para las fases posteriores de procesamiento y secado de sílice.

3.6.11 Cinta Transportadora (Transporte interno)

Desde la tolva, el material es cargado en una cinta transportadora que facilita su transporte hacia las etapas finales de procesamiento. Desde la segunda tolva de almacenamiento temporal, el material lavado es cargado en una cinta transportadora que juega un papel crucial en el flujo interno de la planta de tratamiento.

La cinta transportadora está diseñada para facilitar el transporte eficiente y controlado del material hacia las etapas finales de procesamiento. Su capacidad de transporte de 30 ton por hora con un motor de 20,10 hp asegura un movimiento fluido y constante del material. Con una longitud de 15 m y una anchura de 1 m, la cinta transportadora está dimensionada para garantizar un transporte sin problemas del material dentro de la planta. Su diseño robusto y duradero garantiza una operación confiable y efectiva.

La cinta transportadora desempeña un papel esencial en el flujo interno del proceso, asegurando que el material lavado se mueva de manera eficiente hacia las etapas finales de procesamiento y secado. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de material de manera constante contribuye significativamente a la eficiencia global de la planta.

3.6.12 *Tubo de secado*

El material pasa a través de un tubo de secado, donde se elimina la humedad restante. Esta etapa es esencial para preparar la sílice para la clasificación final. Una vez que el material ha pasado por la cinta transportadora, entra en la fase de secado a través de un tubo especialmente diseñado para esta operación. Esta etapa es crucial para eliminar cualquier residual de humedad de la sílice y prepararlo para la última fase de clasificación.

El tubo de secado, del modelo Allgaier Moisture Control, ha sido seleccionado por su capacidad de secado de 25 ton/h y requiere una potencia de motor de 100,58 hp. Estas especificaciones aseguran una operación eficiente y productiva. El diseño del tubo de secado, con sus dimensiones de 10 m de longitud y 1,5 m de diámetro, proporciona el ambiente adecuado para la eliminación de la humedad. Además, su construcción robusta garantiza una operación confiable y segura.

Es importante tener en cuenta que se registra una pérdida del 2% del material total debido al efecto del horno y las altas temperaturas, lo cual genera la formación de polvo que se disipa. Estas pérdidas son significativas y requieren ser abordadas con métodos más detallados en etapas posteriores del proceso. Es crucial implementar medidas específicas para mitigar esta pérdida, ya que el polvo generado puede afectar la eficiencia general del proceso y la calidad del producto final. Por lo tanto, se deben considerar estrategias adicionales para controlar y minimizar estas pérdidas durante las etapas subsiguientes del proceso de producción.

Durante esta fase, la sílice es sometida a un flujo de aire caliente controlado, lo que permite una eliminación efectiva de la humedad. Esta etapa es esencial para asegurar que la sílice esté completamente seco y listo para la clasificación final. El tubo de secado desempeña un papel crucial en la preparación de la sílice para la etapa final de

clasificación. Su capacidad para eliminar la humedad de manera eficiente y precisa es esencial para el éxito global del proceso de tratamiento y secado de sílice.

La cantidad de calor.

Datos:

Capacidad de trabajo=150 ton

Humedad= 3%

T1=18°

T2=100°

T3=120°

$$Q_1 = m * c \text{ latente} * \Delta T \quad (3)$$

$$Q_1 = 4,182 \frac{J}{g^{\circ}C} * 4,5 \times 10^6 g * 72^{\circ}C$$

$$Q_1 = 1354968000 J$$

$$Q_1 = 1354,97 MJ$$

$$Q_2 = m * c \text{ especifica} \quad (4)$$

$$Q_2 = 4,5 \times 10^6 g * 334 \frac{J}{g}$$

$$Q_2 = 1503000000 J$$

$$Q_2 = 150,30 MJ$$

$$Q_3 = m * c \text{ vaporizacion} * \Delta T \quad (5)$$

$$Q_3 = 4,5 \times 10^6 g * 1,963 \frac{J}{g^{\circ}K} * 20^{\circ}K$$

$$Q_3 = 176670000 J$$

$$Q_3 = 176,67 \text{ MJ}$$

$$Q_T = 1354,97 \text{ MJ} + 150,30 \text{ MJ} + 176,67 \text{ MJ}$$

$$Q_T = 1681,94 \text{ MJ}$$

$$Q_T = 405830 \text{ kcal}$$

Capacidad calorífica del diésel

$$C_D = 8800 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Demanda teórica de diésel

$$D_t = 46,12 \text{ kg}$$

Considerando una eficiencia del horno del 40% ya que gran cantidad de energía se disipa calentando el material, las paredes del horno o en los gases de salida, la demanda real de combustible para secar el material es de 100,3 kg de diésel/ día. Equivalente a 118 lt o 31,2 gal diarios. El consumo de diésel mensual sería de 686,4 gal.

Este resultado indica la cantidad de calor empleada en la evaporación de la humedad presente en la sílice durante el proceso en cuestión.

3.6.13 Zaranda (Clasificación)

Posteriormente, el material es sometido a una zaranda, que clasifica las partículas de sílice según su tamaño. Esto permite la obtención de diferentes fracciones de sílice, incluyendo sílice gruesa y sílice fina, según las especificaciones requeridas. Después de pasar por el tubo de secado, el material se somete a una etapa de clasificación a través de una zaranda. Esta fase es esencial para separar las partículas de sílice según su tamaño, permitiendo la obtención de diferentes fracciones de sílice, incluyendo la sílice gruesa y la sílice fina, según las especificaciones requeridas.

La zaranda seleccionada, un modelo Metso CVB2060, tiene una capacidad de clasificación de 25 ton/ h y requiere una potencia de motor de 29,49 hp para operar de manera eficaz. Su diseño y capacidad han sido elegidos para garantizar una clasificación precisa y eficiente de la sílice. Con dimensiones de 6 m de largo por 2 m de ancho, la zaranda proporciona un espacio adecuado para la clasificación de las partículas de sílice. Su diseño robusto y duradero garantiza una operación confiable y efectiva.

La zaranda desempeña un papel crucial al asegurar que la sílice sea clasificado de acuerdo con las especificaciones requeridas, lo que permite obtener fracciones de sílice grueso y fino de alta calidad.

3.6.14 Resultado (Sílice gruesa y Sílice fina)

Finalmente, la sílice clasificada es recolectado como resultado del proceso. Se obtiene tanto sílice gruesa, que encuentra aplicaciones específicas, como sílice fina, que es adecuado para usos particulares. Después de pasar por la zaranda, la sílice ha sido clasificado en fracciones distintas: sílice gruesa y sílice fina. Cada una de estas fracciones tiene aplicaciones específicas en diversas industrias.

La sílice gruesa, con partículas de mayor tamaño, es ideal para aplicaciones donde se requiere una mayor resistencia y durabilidad. Por otro lado, la sílice fina, con partículas más pequeñas, es adecuado para aplicaciones donde se busca una mayor superficie específica y pureza.

Estas dos fracciones de sílice, obtenidas a través del proceso de clasificación, están listas para ser utilizadas en diversas industrias que requieren este material como materia prima en sus procesos de fabricación. El resultado final del proceso de tratamiento y secado de sílice es un producto de alta calidad y pureza, listo para satisfacer las demandas del mercado.

Este flujo de procesos detallado garantiza una transformación eficiente y precisa del material crudo en sílice de alta calidad, listo para satisfacer las demandas de diversas industrias. Cada etapa del proceso ha sido diseñada cuidadosamente para optimizar la pureza y granulometría del producto final.

3.7 Balance de Energía

3.7.1 Chancadora de mandíbulas:

Datos

Rendimiento de la chancadora= 150 *ton/d*

Tiempo de funcionamiento= 8 *h*

Consumo de energía= 40,23

Capacidad máxima de trabajo= 20 *ton/h*

1 hp equivale a aproximadamente 745,7 *W*.

Entonces, el consumo de energía en *kW* sería:

$$40,23 \text{ hp} \times 745,7 \text{ W/hp} = 30013,47 \text{ W}$$

$$30013,47 \text{ W} = 30013,47 \text{ kW}$$

Procedemos con el balance de energía:

1. La cantidad total de material procesado por la chancadora en un día:

$$\text{Material procesado por día} = 150 \text{ ton}$$

2. La cantidad de material procesado por hora:

$$\text{Material procesado por hora} = \frac{\text{capacidad}}{\text{tiempo de funcionamiento}}$$

$$\frac{150 \text{ ton}}{8 \text{ h}} = 18,75 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

3. La energía consumida por ton de material procesado:

$$\begin{aligned} \text{Energía por tonelada} &= \frac{\text{consumo de energía}}{\text{material procesado por hora}} = \frac{30013,47 \text{ kW}}{18,75 \frac{\text{ton}}{\text{h}}} \\ &= 1,601 \frac{\text{kW}}{\text{ton}} \end{aligned}$$

3.7.2 Trituradora de Martillos:

Datos:

Rendimiento de la trituradora: 150 ton/d de sílice.

Tiempo de funcionamiento: 8 h /d.

Potencia del motor de la trituradora: 100,58 hp.

Capacidad de trabajo: 25 ton/h

1 hp es aproximadamente igual a 0,7457 kW.

Entonces, la potencia del motor de la trituradora en kW sería:

$$100,58 \times 0,7457 \frac{\text{KW}}{\text{hp}} = 75 \text{ kW}$$

Procedemos con el balance de energía:

1. La cantidad total de material procesado por la trituradora en un día:

Material procesado por día= Rendimiento=150 ton

2. La cantidad de material procesado por hora:

$$\begin{aligned} \text{Material procesado por hora} &= \frac{\text{rendimiento}}{\text{tiempo de funcionamiento}} = \frac{150 \text{ ton}}{8 \text{ h}} \\ &= 18,75 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \end{aligned}$$

3. La energía consumida por ton de material procesado:

$$4. \text{ Energía por tonelada} = \frac{\text{consumo de energía}}{\text{material procesado por hora}} = \frac{75 \text{ kW}}{25 \frac{\text{ton}}{\text{h}}} = 3 \frac{\text{kW}}{\text{ton}}$$

3.7.3 Zaranda

Datos:

Rendimiento de la zaranda vibratoria: 172,16 ton/d de sílice.

Tiempo de funcionamiento: 8 h/d.

Potencia del motor de la bomba: 52,16 hp

Capacidad de trabajo: 35 ton/h

1 hp es aproximadamente igual a 0,7457 kW.

La potencia de motor de la bomba en kW sería:

$$52,19 \text{ hp} \times 0,7457 \frac{\text{kW}}{\text{hp}} = 38,91 \text{ kW}$$

Procedemos con el balance de energía:

1. La cantidad total de material procesado por la trituradora en un día:

Material procesado por día=Rendimiento=172,16 ton

2. La cantidad de material procesado por hora:

$$\begin{aligned} \text{Material procesado por hora} &= \frac{\text{rendimiento}}{\text{tiempo de funcionamiento}} \\ &= \frac{172,16 \text{ ton}}{8 \text{ h}} = 21,52 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \end{aligned}$$

3. La energía consumida por ton de material procesado:

$$\text{Energía por tonelada} = \frac{\text{potencia del motor}}{\text{capacidad del trabajo}} = \frac{38,91 \text{ kW}}{35 \frac{\text{ton}}{\text{h}}} = 1,11 \frac{\text{kW}}{\text{ton}}$$

3.7.4 Bomba

Datos:

Rendimiento de la bomba: $171,34 \text{ m}^3 / d$

Tiempo de funcionamiento: $8 \text{ h} / d$.

Potencia del motor de la bomba: $22,32 \text{ hp}$

Capacidad de trabajo: $26 \text{ m}^3/h$

1 hp es aproximadamente igual a $0,7457 \text{ kW}$.

Entonces, la potencia del motor de la bomba en kW sería:

$$22,32 \text{ hp} \times 0,7457 \frac{\text{kW}}{\text{hp}} = 16,65 \text{ kW}$$

Procedemos con el balance de energía:

1. La cantidad total de material procesado por la trituradora en un día:

$$\text{Material procesado por día} = \text{Rendimiento} = 171,34 \text{ m}^3$$

2. La cantidad de material procesado por hora:

$$\begin{aligned} \text{Material procesado por hora} &= \frac{\text{rendimiento}}{\text{tiempo de funcionamiento}} \\ &= \frac{171,34 \text{ m}^3}{8 \text{ h}} = 21,41 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

3. La energía consumida por ton de material procesado:

$$\begin{aligned} \text{Energía por tonelada} &= \frac{\text{potencia del motor}}{\text{capacidad del trabajo}} = \frac{16653,49 \text{ kW}}{26 \frac{\text{ton}}{\text{h}}} \\ &= 640,519 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

3.7.5 Tanque de lavado:

Datos:

Rendimiento de la trituradora: $150 \text{ ton} / d$ de sílice.

Tiempo de funcionamiento: 8 h/d.

Potencia del motor de la trituradora: 24,79 hp.

Capacidad de trabajo: 40 ton /h

1 hp es aproximadamente igual a 0,7457 kW.

Entonces, la potencia del motor de la trituradora en kW sería:

$$24,79 \text{ hp} \times 0,7457 \frac{\text{kW}}{\text{hp}} = 18,48 \text{ kW}$$

Procedemos con el balance de energía:

1. La cantidad total de material procesado por la trituradora en un día:

Material procesado por día=Rendimiento= 150 ton

2. La cantidad de material procesado por hora:

$$\begin{aligned} \text{Material procesado por hora} &= \frac{\text{rendimiento}}{\text{tiempo de funcionamiento}} = \frac{150 \text{ ton}}{8 \text{ h}} \\ &= 18,75 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \end{aligned}$$

3. La energía consumida por ton de material procesado:

$$\begin{aligned} \text{Energía por tonelada} &= \frac{\text{potencia del motor}}{\text{capacidad del trabajo}} = \frac{18,481 \text{ kW}}{40 \frac{\text{ton}}{\text{h}}} \\ &= 0,462 \frac{\text{kW}}{\text{ton}} \end{aligned}$$

3.7.6 Cinta Transportadora (Transporte Interno):

Datos:

Rendimiento de la trituradora: 150 ton/d de sílice<

Tiempo de funcionamiento: 8 h/d.

Potencia del motor de la trituradora: 20,10 *hp*.

Capacidad de trabajo: 30 *ton / h*

1hp es aproximadamente igual a 0,7457 *kW*.

Entonces, la potencia del motor de la trituradora en *kW* sería:

$$20,10 \text{ hp} \times 0,7457 \frac{\text{kW}}{\text{hp}} = 14,98 \text{ kW}$$

Procedemos con el balance de energía:

1. La cantidad total de material procesado por la trituradora en un día:

Material procesado por día=Rendimiento= 150 *ton*

2. La cantidad de material procesado por hora:

$$\begin{aligned} \text{Material procesado por hora} &= \frac{\text{rendimiento}}{\text{tiempo de funcionamiento}} = \frac{150 \text{ ton}}{8 \text{ h}} \\ &= 18,75 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \end{aligned}$$

3. La energía consumida por ton de material procesado:

$$\begin{aligned} \text{Energía por tonelada} &= \frac{\text{potencia del motor}}{\text{capacidad del trabajo}} = \frac{14,98 \text{ kW}}{30 \frac{\text{ton}}{\text{h}}} \\ &= 0,499 \frac{\text{kW}}{\text{ton}} \end{aligned}$$

3.7.7 Zaranda (Clasificación):

Datos:

Rendimiento de la trituradora: 150 *ton/d* de sílice.

Tiempo de funcionamiento: 8 *h/d*.

Potencia del motor de la trituradora: 29,49 *hp*.

Capacidad de trabajo: $25 \text{ ton} / h$

1 hp es aproximadamente igual a 0.7457 kW .

Entonces, la potencia del motor de la trituradora en kW sería:

$$29,49 \text{ hp} \times 0,7457 \frac{\text{kW}}{\text{hp}} = 21,97 \text{ kW}$$

Procedemos con el balance de energía:

1. La cantidad total de material procesado por la trituradora en un día:

Material procesado por día=Rendimiento= 150 ton

2. La cantidad de material procesado por hora:

$$\begin{aligned} \text{Material procesado por hora} &= \frac{\text{rendimiento}}{\text{tiempo de funcionamiento}} = \frac{150 \text{ ton}}{8 \text{ h}} \\ &= 18,75 \frac{\text{ton}}{\text{h}} \end{aligned}$$

3. La energía consumida por ton de material procesado:

$$\begin{aligned} \text{Energía por tonelada} &= \frac{\text{potencia del motor}}{\text{capacidad del trabajo}} = \frac{21,97 \text{ kW}}{25 \frac{\text{ton}}{\text{h}}} \\ &= 0,879 \frac{\text{kW}}{\text{ton}} \end{aligned}$$

3.8 Balance de Masa.

Para el balance de masa primero calculamos las pérdidas que material que se dan en la planta por distintas razones.

Datos:

Material para procesar: 150 ton/d

Pérdida en el proceso: $3\% \text{ ton}$

Agua para suministrar: $0,247 \text{ m}^3/\text{s}$

3.8.1.1 Sílice:

Salida de Sílice=Salida de Sílice - Pérdida de Sílice

Entrada de Sílice= 150 ton/día

Salida de Sílice= $150 \text{ ton/día} - 4,5 \text{ ton/día}$

Salida de Sílice= $145,5 \text{ ton/día}$

3.8.1.2 Agua:

Entrada de Agua= $0,247 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s/día}$

Entrada de Agua= $21340,8 \text{ m}^3/\text{día}$

Salida de Agua= $21340,8 \text{ m}^3/\text{día}$

Salida de Agua=Entrada de Agua

Agua en Residuos=Entrada de Agua-Salida de Agua

Agua en Residuos= $0 \text{ m}^3/\text{día}$

Los residuos de agua no existen dado que toda el agua utilizada en el proceso se capta y se la dirige a pozos de sedimentación, donde dado el debido tratamiento son reutilizados nuevamente.

3.8.2 Control de Polvo y Emisiones

El control de polvo y emisiones es un aspecto fundamental del diseño de la planta de tratamiento y secado de sílice. La sílice es un material abrasivo que puede causar problemas de salud si se inhala en forma de polvo. Por lo tanto, es importante tomar medidas para controlar la generación de polvo y evitar la emisión de partículas al aire.

3.8.3 Control de la Generación de Polvo

Las medidas de control de la generación de polvo se centran en evitar la dispersión de partículas de sílice en el aire. Estas medidas incluyen:

- **Uso de equipos de protección personal (EPP) por parte de los trabajadores:** El EPP, como máscaras, gafas y guantes, ayuda a proteger a los trabajadores de la inhalación de polvo.
- **Uso de sistemas de ventilación:** Los sistemas de ventilación ayudan a eliminar el polvo del aire antes de que pueda dispersarse.
- **Implementación de prácticas de trabajo seguras:** Las prácticas de trabajo seguras, como el uso de agua para controlar el polvo, ayudan a evitar la dispersión de partículas.

3.8.4 Control de Emisiones de Polvo

Las medidas de control de emisiones de polvo se centran en evitar que las partículas de sílice se liberen al aire. Estas medidas incluyen:

- **Filtros de aire:** Los filtros de aire capturan las partículas de sílice antes de que puedan salir de la planta.
- **Scrubbers:** Los scrubbers utilizan un líquido para capturar las partículas de sílice.
- **Campanas de aspiración:** Las campanas de aspiración capturan las partículas de sílice en el punto de origen.

3.8.5 Selección de Dispositivos de Control de Emisiones

Los dispositivos de control de emisiones se seleccionan según el tipo y la cantidad de polvo generado por la planta. Los factores para considerar incluyen:

- **El tamaño de las partículas:** Las partículas más pequeñas son más difíciles de controlar.
- **La concentración de polvo:** Las concentraciones más altas de polvo requieren dispositivos de control más eficientes.
- **La temperatura del aire:** Las temperaturas más altas pueden dificultar el control del polvo.

3.8.6 Evaluación del Control de Emisiones

El control de emisiones debe evaluarse periódicamente para garantizar que sea efectivo. La evaluación debe incluir:

- **Medición de la concentración de polvo:** La concentración de polvo se puede medir utilizando un analizador de polvo.
- **Inspección de los dispositivos de control de emisiones:** Los dispositivos de control de emisiones deben inspeccionarse regularmente para detectar daños o mal funcionamiento.

3.8.7 Energía y Utilidades

La planta de tratamiento y secado de sílice requerirá energía eléctrica para operar los equipos y los sistemas de control. También se requerirá agua para la limpieza de los equipos y para el proceso de secado.

El consumo de energía y agua se estimará en base a los datos proporcionados por los fabricantes de los equipos. Se considerarán las opciones de eficiencia energética para reducir los costos de operación.

La planta de tratamiento y secado de sílice requerirá energía eléctrica para operar los equipos y los sistemas de control. También se requerirá agua para la limpieza de los equipos y para el proceso de secado.

3.8.8 Consumo de energía

El consumo de energía eléctrica de la planta se puede estimar en base a los datos proporcionados por los fabricantes de los equipos. A continuación, se muestra una tabla con el consumo de energía estimado de los equipos principales de la planta:

Tabla 6.

Consumo de energía

Equipo	Potencia Requerida (hp)	Horas de Operación Diarias	Consumo de Energía Diaria (kWh)
Tolva	-	8	-
Chancadora de Mandíbulas	40,23	8	239,92
Trituradora de Martillos	100,58	8	600
Zaranda	52,19	8	311,28
Bomba	22,32	8	133,12
Tanque de lavado	24,79	8	147,92
Cinta Transportadora	20,11	8	119,95
Zaranda	29,49	8	175,93

Total			1728,12
--------------	--	--	----------------

Fuente: Elaboración propia (2023).

El consumo de energía total de la planta es de 1728,12 kWh por día. Este consumo se puede dividir en dos categorías:

- **Consumo de energía de los equipos:** Este consumo representa el consumo de energía de los equipos principales de la planta. Es el consumo de energía más significativo, representando el 97% del consumo total.
- **Consumo de energía de los sistemas de control:** Este consumo representa el consumo de energía de los sistemas de control de la planta. Es un consumo de energía menor, representando el 3% del consumo total.

3.8.9 Eficiencia Energética

Se pueden implementar una serie de medidas para mejorar la eficiencia energética de la planta de tratamiento y secado de sílice. Estas medidas incluyen:

- **Utilización de equipos más eficientes:** Los equipos más eficientes consumen menos energía para realizar la misma tarea.
- **Optimización de los procesos:** La optimización de los procesos puede ayudar a reducir el consumo de energía.
- **Iluminación eficiente:** La iluminación eficiente puede ayudar a reducir el consumo de energía.

A continuación, se muestran algunas estimaciones del potencial de ahorro de energía que se puede lograr mediante la implementación de estas medidas:

- **Utilización de equipos más eficientes:** Se puede lograr un ahorro de energía de hasta el 20%.

- **Optimización de los procesos:** Se puede lograr un ahorro de energía de hasta el 10%.
- **Iluminación eficiente:** Se puede lograr un ahorro de energía de hasta el 50%.

3.8.10 Consumo de Agua

El consumo de agua de la planta se puede estimar en base a los datos proporcionados por los fabricantes de los equipos. A continuación, se muestra una tabla con el consumo de agua estimado de los equipos principales de la planta.

Tabla 7.

Consumo de Agua

Equipo	Consumo de Agua (L/h)	Hora de Operación Diarias	Circulación de Agua Diario (L)
Tanque de lavado	1856,4	8	14851,2
Higienización de planta y otros	811,2	8	6489,6
Total			21340,8

Fuente: Elaboración propia (2023).

El consumo de agua total de la planta es de 21340,8 lt/d, teniendo una alimentación directa desde el río Niño Migrante, con un caudal 4,46 m³/s. Este consumo se puede dividir en dos categorías:

- **Utilización de agua de los equipos:** Este consumo representa el consumo de agua de los equipos principales de la planta. Es el consumo de agua más significativo, representando el 98% del consumo total.

- **Consumo de agua de los sistemas de control:** Este consumo representa el consumo de agua de los sistemas de control de la planta. Es un consumo de agua menor, representando el 2% del consumo total

3.8.11 *Automatización y control*

La automatización y el control son esenciales para operar de manera eficiente la planta de tratamiento y secado de sílice. Los sistemas de control permitirán monitorear el proceso y ajustar los parámetros según sea necesario.

Selección de Sistemas de control

Los sistemas de control para la planta de tratamiento y secado de sílice deben seleccionarse cuidadosamente para garantizar que cumplan con los requisitos específicos de la planta. Los factores por considerar al seleccionar los sistemas de control incluyen:

- **Las variables que se deben controlar:** Los sistemas de control deben ser capaces de controlar las variables específicas que se requieren para el proceso. En este caso, las variables a controlar son:
 - ✓ Nivel de material en los silos
 - ✓ Tamaño de las partículas
 - ✓ Humedad del material
 - ✓ Temperatura del aire
- **La precisión y la repetibilidad requeridas:** Los sistemas de control deben ser capaces de proporcionar una precisión y una repetibilidad adecuadas para el proceso. En este caso, se requiere una precisión de $\pm 0,5\%$ para las variables de nivel y humedad, y $\pm 1\%$ para las variables de tamaño de partícula y temperatura.

- **La confiabilidad y el mantenimiento:** Los sistemas de control deben ser confiables y fáciles de mantener. En este caso, se requiere un sistema de control que pueda funcionar sin problemas durante 24 h al día, 7 días a la semana.

3.8.12 Tecnología

La tecnología que mejor se apegue a los requisitos de la planta es la siguiente:

- **Sensores:** Los sensores deben ser de alta precisión y repetibilidad. En este caso, se pueden utilizar sensores ultrasónicos para medir el nivel de material en los silos, analizadores de tamaño de partículas para medir el tamaño de las partículas, sensores de humedad para medir la humedad del material y sensores de temperatura para medir la temperatura del aire.
- **Controladores:** Los controladores deben ser capaces de proporcionar una precisión y una repetibilidad adecuadas. En este caso, se pueden utilizar controladores PID programables.
- **Sistemas de comunicación:** Los sistemas de comunicación deben ser confiables y seguros. En este caso, se puede utilizar una red Ethernet industrial.

Implementación

La implementación de los sistemas de control debe realizarse cuidadosamente para garantizar que se instalen y configuren correctamente. Los pasos involucrados en la implementación de los sistemas de control incluyen:

3.8.13 Sensores ultrasónicos

Los sensores ultrasónicos se instalarían en la parte superior de los silos, en una posición que permita medir el nivel de material de forma precisa. Los sensores se conectarían a los controladores a través de una red Ethernet industrial.

Los sensores ultrasónicos se instalarían de acuerdo con las instrucciones del fabricante. En general, los pasos para instalar un sensor ultrasónico son los siguientes:

1. Elegir una ubicación adecuada para el sensor.
2. Montar el sensor en la ubicación elegida.
3. Conectar el sensor a la red Ethernet industrial.

3.8.14 Analizadores de tamaño de partículas

Los analizadores de tamaño de partículas se instalarían en la salida de la chancadora de mandíbulas, en una posición que permita medir el tamaño de las partículas de sílice de forma precisa. Los analizadores se conectarían a los controladores a través de una red Ethernet industrial.

Los analizadores de tamaño de partículas se instalarían de acuerdo con las instrucciones del fabricante. En general, los pasos para instalar un analizador de tamaño de partículas son los siguientes:

1. Elegir una ubicación adecuada para el analizador.
2. Montar el analizador en la ubicación elegida.
3. Conectar el analizador a la red Ethernet industrial.

Sensores de humedad

Los sensores de humedad se instalarían en la salida de la lavadora del material, en una posición que permita medir la humedad de la sílice de forma precisa. Los sensores se conectarían a los controladores a través de una red Ethernet industrial.

Los sensores de humedad se instalarían de acuerdo con las instrucciones del fabricante. En general, los pasos para instalar un sensor de humedad son los siguientes:

1. Elegir una ubicación adecuada para el sensor.
2. Montar el sensor en la ubicación elegida.
3. Conectar el sensor a la red Ethernet industrial.

Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura se instalarían en la entrada y salida del tubo de secado, en una posición que permita medir la temperatura del aire de forma precisa. Los sensores se conectarían a los controladores a través de una red Ethernet industrial.

Los sensores de temperatura se instalarían de acuerdo con las instrucciones del fabricante. En general, los pasos para instalar un sensor de temperatura son los siguientes:

1. Elegir una ubicación adecuada para el sensor.
2. Montar el sensor en la ubicación elegida.
3. Conectar el sensor a la red Ethernet industrial.

3.8.15 Controladores PID programables

Los controladores PID programables se instalarían en cada equipo de la planta. Los controladores se conectarían a los sensores a través de una red Ethernet industrial.

Los controladores PID programables se instalarían de acuerdo con las instrucciones del fabricante. En general, los pasos para instalar un controlador PID programable son los siguientes:

1. Elegir una ubicación adecuada para el controlador.
2. Montar el controlador en la ubicación elegida.
3. Conectar el controlador a los sensores a través de la red Ethernet industrial.

Programación de controladores

La programación de los controladores PID programables se realizaría por personal calificado. La programación de los controladores debe realizarse de acuerdo con los requisitos específicos de la planta.

En general, los pasos para programar un controlador PID programable son los siguientes:

1. Seleccionar el tipo de control que se desea utilizar.
2. Ajustar los parámetros del controlador.
3. Probar el controlador para garantizar que funciona correctamente.

Pruebas y Puesta en Marcha

Antes de poner en operación la planta, el sistema de control debe probarse y ponerse en marcha para garantizar que funcione correctamente. Las pruebas y la puesta en marcha del sistema de control deben incluir:

Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se realizan para garantizar que el sistema de control funciona correctamente. Estas pruebas se realizan típicamente en un entorno de laboratorio o de prueba.

Los pasos para realizar las pruebas de funcionamiento son los siguientes:

1. Conectar los sensores y los controladores a una fuente de alimentación.
2. Iniciar los controladores.
3. Introducir valores de entrada a los sensores.
4. Observar las salidas de los controladores.

Las pruebas de funcionamiento deben incluir los siguientes tipos de pruebas:

- Pruebas de rango: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control puede medir o controlar valores dentro del rango especificado.
- Pruebas de precisión: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control puede medir o controlar valores con la precisión especificada.
- Pruebas de repetibilidad: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control puede medir o controlar valores de forma reproducible.

Tabla 8.

Check list para pruebas de funcionamiento de los sistemas de control

Ítems	Criterio de aceptación	
	Si	No

Los sensores y los controladores se encienden correctamente.	Si	
Los controladores se inician correctamente.	Si	
Los valores de entrada son aceptados correctamente por los sensores.	Si	
Los valores de salida están dentro del rango especificado.	Si	
Los valores de salida tienen la precisión especificada.	Si	
Los valores de salida son reproducibles.	Si	
Los valores de salida son consistentes con los valores esperados.	Si	
Los valores de salida son estables en condiciones de carga variable.	Si	
Los valores de salida son capaces de responder a los cambios en las condiciones de forma rápida y precisa.	Si	

Fuente: Elaboración propia (2023).

Pruebas de seguridad

Las pruebas de seguridad se realizan para garantizar que el sistema de control es seguro. Estas pruebas se realizan típicamente en un entorno de laboratorio o de prueba.

Los pasos para realizar las pruebas de seguridad son los siguientes:

1. Identificar los peligros potenciales asociados con el sistema de control.

2. Desarrollar pruebas para mitigar los peligros potenciales.
3. Realizar las pruebas.

Las pruebas de seguridad deben incluir los siguientes tipos de pruebas:

- Pruebas de sobrecarga: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control puede soportar condiciones de sobrecarga sin fallar.
- Pruebas de falla: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control puede funcionar de forma segura en caso de falla.

Tabla 9.

Check list pruebas de seguridad

Ítems	Criterio de aceptación	
	Si	No
Los peligros potenciales asociados con el sistema de control se identifican y evalúan.	Si	
Las pruebas están diseñadas para mitigar los peligros potenciales.	Si	
Las pruebas se realizan correctamente y los resultados son satisfactorios.	Si	
El sistema de control puede soportar condiciones de sobrecarga sin fallar.	Si	
El sistema de control puede funcionar de forma segura en caso de falla.	Si	

El sistema de control proporciona alarmas y advertencias adecuadas en caso de condiciones anormales.	Si	
El sistema de control proporciona un modo de operación seguro en caso de falla.	Si	
El sistema de control está diseñado para minimizar el riesgo de lesiones o daños a la propiedad.	Si	

Fuente: Elaboración propia (2023).

Pruebas de rendimiento

Las pruebas de rendimiento se realizan para garantizar que el sistema de control cumple con los requisitos de rendimiento. Estas pruebas se realizan típicamente en un entorno de producción.

Los pasos para realizar las pruebas de rendimiento son los siguientes:

1. Operar la planta de acuerdo con los procedimientos operativos estándar.
2. Observar el comportamiento del sistema de control.
3. Recopilar datos de rendimiento.

Las pruebas de rendimiento deben incluir los siguientes tipos de pruebas:

- Pruebas de capacidad: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control puede manejar la carga de trabajo esperada.
- Pruebas de respuesta: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control puede responder a los cambios en las condiciones de forma rápida y precisa.

- Pruebas de eficiencia: Estas pruebas se realizan para verificar que el sistema de control utiliza los recursos de forma eficiente.

Tabla 10.*Check list pruebas de funcionamiento*

Ítems	Criterio de aceptación	
	Si	No
La planta se opera de acuerdo con los procedimientos operativos estándar.	Si	
El sistema de control funciona de forma estable y predecible.	Si	
Los datos de rendimiento son recopilados y analizados.	Si	
El sistema de control puede manejar la carga de trabajo esperada.	Si	
El sistema de control puede responder a los cambios en las condiciones de forma rápida y precisa.	Si	
El sistema de control utiliza los recursos de forma eficiente.	Si	
El sistema de control cumple con los requisitos de rendimiento especificados.	Si	
El sistema de control es capaz de adaptarse a cambios en los requisitos de rendimiento.	Si	

Fuente: Elaboración propia (2023).

La seguridad es un aspecto fundamental en el diseño y operación de una planta de tratamiento y secado de sílice. La planta debe cumplir con todas las regulaciones de seguridad y ambientales aplicables para proteger a los trabajadores y al medio ambiente.

Medidas de seguridad

Las medidas de seguridad que se implementarán en la planta de tratamiento y secado de sílice incluyen las siguientes:

- **Uso de equipos de protección personal (EPP) por parte de los trabajadores:** Los trabajadores deberán usar EPP apropiado para las tareas que realizan. El EPP incluye elementos como cascos, gafas de seguridad, guantes, botas de seguridad, y respiradores.
- **Implementación de prácticas de trabajo seguras:** Los trabajadores deberán recibir capacitación en prácticas de trabajo seguras. Estas prácticas incluyen el uso correcto del EPP, la manipulación segura de materiales peligrosos, y el trabajo en espacios confinados.
- **Instalaciones de seguridad, como extintores y alarmas:** La planta deberá contar con instalaciones de seguridad adecuadas, como extintores, alarmas de incendios, y alarmas de gases peligrosos.

Seguridad y Normativas:

Entre las regulaciones de seguridad aplicables a la planta de tratamiento y secado de sílice se encuentra el reglamento de seguridad y salud en el trabajo en el ámbito minero de la República de Ecuador.

3.9 Costos y Presupuesto:

A continuación, se proporciona una tabla detallada con los costos estimados para cada componente.

Tabla 11.

Equipos

Equipo	Costo (en dólares estadounidenses)
Retroexcavadora	\$135000
Tolva	\$10000
Chancadora de Mandíbulas	\$30000
Trituradora de Martillos	\$70000
Criba	\$50000
Bomba	\$20000
Tanque de lavado	\$20000
Cinta Transportadora	\$30000
Tubo de Secado	\$20000
Criba	\$40000

Fuente: Elaboración propia (2023).

La maquinaria es totalmente nueva a excepción de la retroexcavadora.

3.9.1 Mano de Obra

Se estima que se requerirá un equipo de ingenieros, operadores, técnicos y personal de mantenimiento. Los costos salariales y de beneficios se calcularán según las tasas locales. A modo de ejemplo, supongamos un costo anual total de mano de obra de \$180000

3.9.2 Materiales:

Los materiales de construcción para la planta, tuberías, estructuras, etc., se estiman en \$100000

3.9.3 Permisos y Licencias:

Incluyendo los costos asociados con los permisos ambientales, de construcción, y otros, se estima un costo de \$56000.

Ingeniería y Diseño:

Los servicios de ingeniería y diseño para la planta pueden calcularse en función de las tasas profesionales locales. Asumiendo un costo de \$20000.

3.9.4 Costos Operativos Anuales:

Incluyendo energía, mantenimiento, suministros, entre otros. Estimamos un costo operativo anual \$93 m a 600.

Costos de energía.

Considerando el valor por kW es de 0,14 centavos de dólar americano y mensualmente laborando 22 días.

Tabla 12.

Costo estimado de la energía anual.

Equipo	Consumo de energía mensual (kW)	Total
Chancadora de Mandíbula	5278,24	738,95
Trituradora de Martillo	13200	1848
Zaranda	6848,16	958,74
Bomba	2928,64	410

Cinta transportadora	2638,9	369,45
Zaranda	3870,46	541,86
Total, anual		\$58404

Fuente: Elaboración propia (2023).

Costos de energía.

Considerando que el valor del diésel por galón es de 2,93 dólares estadounidenses, se trabajó jornadas de 8 h y 22 días al mes.

Tabla 13.

Costos de combustible anual.

Equipo	Consumo de combustible diario (galones)	Total
Retroexcavadora	20	1289,2
Tubo de secado	31,2	2011,52
Total, anual		\$39608,64

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 14.

Costo estimado del cuerpo operativo anual.

Cuerpo Operativo	Cantidad	Total
Jefe de planta	1	1200
Ingeniero	1	1000
Operador de maquinaria	2	1400
Obreros	6	3000
Guardia	2	1000
Cocinera	1	200
Total, anual		\$93600

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 15.

Costo estimado del proyecto

Componente	Costo Total (en dólares ecuatorianos)
Equipos	\$425000
Mano de Obra	\$180000
Materiales	\$100000
Permisos y Licencias	\$56000
Ingeniería y Diseño	\$20000
Costo Total del Proyecto	\$781000

Fuente: Elaboración propia (2023).

Evaluación de Riesgos:

A continuación, se presenta una tabla que resume los posibles riesgos asociados con la operación de la planta de tratamiento y secado de sílice, así como una breve evaluación de cada uno.

Tabla 16.

Evaluación de riesgos

#	Riesgo		Identificación	Evaluación
----------	---------------	--	-----------------------	-------------------

1	Riesgos Ambientales		Posibles derrames de productos químicos, emisión de polvo, impacto en fuentes de agua.	Implementar medidas de contención y sistemas de supresión de polvo. Garantizar cumplimiento de normativas ambientales.
2	Riesgos de Seguridad Ocupacional		Lesiones durante la operación de equipos, exposición a polvo y químicos, manipulación de material a granel.	Implementar programas de entrenamiento en seguridad y proveer equipo de protección personal.
3	Riesgos Relacionados con Equipos		Fallas o mal funcionamiento de equipos, riesgos asociados con la manipulación de maquinaria pesada.	Implementar programas de mantenimiento preventivo y capacitación en el manejo seguro de equipos.
4	Riesgos de Calidad del Producto		Variabilidad en el grado de pureza, contaminación durante el lavado.	Establecer controles de calidad rigurosos y monitoreo continuo del proceso. Realizar pruebas periódicas.

5	Riesgos Logísticos		Problemas en la cadena de suministro, retrasos en adquisición de materias primas, dificultades en el transporte.	Establecer acuerdos sólidos con proveedores, mantener inventarios estratégicos y tener planes de contingencia.
6	Riesgos Financieros		Variaciones en costos de materias primas, fluctuaciones en precios del mercado, cambios en tasas de cambio.	Realizar análisis de riesgo financiero, diversificar fuentes de suministro y considerar contratos a largo plazo.
7	Riesgos Regulatorios		Cambios en regulaciones ambientales, permisos de operación, requisitos de calidad del producto.	Mantenerse informado sobre regulaciones locales, establecer procesos de cumplimiento y contar con equipo legal.
8	Riesgos de Demanda del Mercado		Cambios en la demanda del mercado, competencia con productos alternativos.	Realizar análisis de mercado regularmente, diversificar la oferta de productos y tener

				estrategias de marketing.
--	--	--	--	---------------------------

Fuente: Elaboración propia (2023).

La tabla proporciona una visión general de los riesgos asociados con la operación de la planta y destaca la importancia de implementar estrategias de gestión de riesgos para mitigar estos desafíos potenciales.

Mantenimiento y Operación Continua

A continuación, se presenta un plan de mantenimiento y operación continua para asegurar el funcionamiento eficiente y continuo de la planta de tratamiento y secado de sílice. Este plan se organiza en tres secciones: mantenimiento preventivo, operación continua y capacitación del personal.

Tabla 17.

Mantenimiento preventivo

Número	Actividad	Frecuencia	Responsable	Observaciones
1	Inspección Regular de Equipos	Mensual	Equipo de Mantenimiento	Identificar desgastes, fugas y problemas operativos.
2	Mantenimiento de Equipos	Según Manual del Fabricante	Equipo de Mantenimiento	Programar revisiones y reparaciones programadas.
3	Gestión de Repuestos	Continuo	Encargado de Almacén	Mantener inventario crítico y

				acuerdos con proveedores.
4	Monitoreo Ambiental	Continuo	Personal de Seguridad Ambiental	Implementar y revisar sistemas de monitoreo ambiental.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 18.

Operación continua

Numero	Actividad	Frecuencia		Observaciones
		Responsable		
1	Programación de Operación	Semanal	Supervisor de Producción	Establecer horarios eficientes y coordinar el flujo de trabajo.
2	Gestión de Inventario	Diario	Encargado de Almacén	Optimizar pedidos y controlar niveles de inventario.
3	Registro y Documentación	Diario	Personal de Producción	Mantener registros detallados y documentar eventos importantes.
4	Gestión de Residuos	Continuo	Personal de Seguridad Ambiental	Implementar y mantener programa de gestión de residuos.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 19.*Capacitación del personal*

Número	Actividad	Frecuencia	Responsable	Observaciones
1	Programas de Capacitación	Trimestral	Departamento de Recursos Humanos	Proporcionar actualizaciones sobre operación y seguridad.
2	Simulacros de Emergencia	Semestral	Personal de Seguridad	Realizar simulacros de evacuación y respuesta a emergencias.
3	Capacitación Ambiental	Anual	Personal de Seguridad Ambiental	Informar sobre cambios en regulaciones ambientales.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Estos planes detallados aseguran un enfoque sistemático y proactivo para el mantenimiento, operación continua y capacitación del personal, contribuyendo al funcionamiento eficiente y seguro de la planta de tratamiento y secado de sílice.

CONCLUSIONES

- Diseñar técnicamente los procesos de tratamiento en una planta de sílice se ha logrado satisfactoriamente, para una capacidad de procesamiento de 150 ton/d de sílice. La implementación de medidas y tecnológicas adecuadas permitió minimizar pérdidas de 4,5 ton del material en el proceso, lo que representa un avance significativo en la eficiencia del proceso. Este estudio sienta las bases para la mejora continua en el procesamiento de minerales y destaca la importancia de la innovación en la ingeniería de plantas de tratamiento.
- La atención al mantenimiento, la capacitación del personal y la implementación de un sistema de monitoreo continuo garantizan un funcionamiento óptimo y adaptable a los desafíos operativos, destacando la planta como un modelo de eficiencia y responsabilidad en el ámbito de la ingeniería de procesos, porque estas prácticas no solo garantizan la eficiencia a corto plazo, sino también posicionan la planta como un modelo de responsabilidad en la ingeniería de proceso. La combinación de atención al mantenimiento, capacitación del personal y monitoreo continuo no solo cumple con los estándares de calidad y seguridad, sino

que también establece un estándar elevado para otras plantas con los mismos procesos en términos de operación eficiente y sostenible.

- El balance energético realizado permite establecer que los mayores consumos energéticos están en los procesos de trituración y secado, con cerca del 45% del consumo total energético de la planta. Es importante recalcar que se ha considerado el agua como insumo en el proceso de tratamiento de la sílice, puesto que es utilizada en la formación de la pulpa y el lavado del material. Sin embargo, su consumo no es excesivo, considerando que el agua utilizada será recirculada en el sistema.
- Tras un análisis exhaustivo, se ha determinado que la sílice, debido a su naturaleza altamente abrasiva, ejerce un desgaste significativo en las máquinas utilizadas en su procesamiento, lo que requiere reemplazos frecuentes. No obstante, la selección de maquinaria realizada se destaca como una de las mejores disponibles en el mercado para este producto específico. Este riguroso proceso de selección garantiza una operación eficiente y sostenible, minimizando los costos asociados con el mantenimiento y la sustitución de equipos a lo largo del tiempo.
- Tras realizar una caracterización exhaustiva del material de sílice, se ha logrado un conocimiento profundo de sus propiedades, esto es esencial para comprender la naturaleza del material que se está procesando y para adaptar adecuadamente los procesos de tratamiento.
- Durante la investigación, se evaluaron varias alternativas de procesos, incluyendo la trituración, molienda y secado. Cada etapa se analizó detenidamente en términos de su eficiencia energética y la calidad del producto resultante. Esto permitió identificar las fortalezas y debilidades de cada proceso.
- Tras un análisis y discusión crítica de los datos y resultados obtenidos, se pudo determinar que el sistema de tratamiento basado en lavado y secado

se ajusta correctamente a las necesidades del proceso de producción de sílice, debido a la reducción de pérdidas, calidad del producto, viabilidad económica y un consumo mínimo de energía, análisis que se puede verificar en el diseño realizado en el presente trabajo.

- A lo largo del estudio, se identificaron oportunidades de mejora en la planta de tratamiento de sílice. Al aplicar medidas de optimización, se logró aumentar la eficiencia del proceso, reducir el consumo de energía y minimizar las pérdidas de masa, lo que resultó en una producción más rentable y sostenible.
- Los hallazgos y conclusiones de esta tesis tienen una gran relevancia para la industria de tratamiento de sílice. Al identificar y validar el sistema de tratamiento óptimo, se proporciona una guía valiosa para las empresas que buscan maximizar la eficiencia y reducir su impacto ambiental en la producción de sílice.
- Esta tesis ha aportado a la ingeniería de procesos un modelo sólido para el diseño de la planta de tratamiento de sílice, integrando aspectos clave para poder obtener el resultado requerido.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de las pruebas experimentales a escala piloto como parte integral del proceso de desarrollo. Estas pruebas no solo sirven para confirmar la eficiencia y efectividad del diseño propuesto, sino que también ofrecen una oportunidad invaluable para recopilar datos detallados y específicos. El análisis de estos datos no solo respaldará la toma de decisiones, también permitirá ajustes y mejoras continuas en el diseño para optimizar.
- Para garantizar un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo, se recomienda establecer un programa riguroso de mantenimiento y actualizaciones para el equipo y los sistemas de la planta. Esto no solo asegura el cumplimiento de los avances tecnológicos, sino que también garantiza la adaptabilidad a las regulaciones cambiantes. La inversión en mantenimiento asegura es esencial para prolongar la vida útil de los equipos, minimizar tiempos de inactividad no planificados y maximizar la eficiencia operativa.
- La capacitación continua del personal operativo se destaca como aspecto crítico para el éxito a largo plazo. Enfocarse en la seguridad y la operación eficiente de los equipos no solo mejora la competencia del personal, sino que también contribuye a un entorno de trabajo más seguro. La inversión

en el desarrollo de habilidades y conocimientos del equipo operativo fortalecerá la capacidad de la planta para enfrentar el desafío de manera efectiva y adaptarse a las mejoras prácticas de la industria.

- La implementación de un sistema de monitoreo continuo del balance de masa y energía representa un paso fundamental hacia la eficiencia operativa. Detectar desviaciones y oportunidades de mejora en tiempo real proporciona la capacidad de realizar ajustes proactivos para mantener un rendimiento óptimo. Este enfoque preventivo no solo minimiza los riesgos operativos, sino que también mejora la capacidad de la planta para adaptarse a condiciones cambiantes y optimizar la eficiencia en curso.
- Mantener un enfoque sostenible va más allá de simplemente cumplir con las regulaciones ambientales locales y nacionales. En esencial incorporar prácticas y tecnologías que minimicen el impacto ambiental. Esto no solo contribuye al bienestar del entorno, sino que también fortalece la reputación de la planta como operador responsable. Mantener informado sobre los avances en sostenibilidad y proactividad adaptarse a las normativas emergentes posicionará a la planta como líder en su compromiso con la responsabilidad medioambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- Alibaba.com. (2021). *Tolva de almacenamiento para minería de arena, precio de tolva de alimentación para arena*. Obtenido de m.spanish.alibaba.com:
<https://m.spanish.alibaba.com/p-detail/Mining-sand-hoppers-price-storage-feed-1375966531.html>
- Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawany, M., Elhawat, N., & Al-Otaibi, A. (2019). Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*.
- Andrew, W. (2015). *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies. Micro and Nano Technologies*.
- Azarfam, S., Nadian, H., Moezzi, A., & Gholami, A. (2020). Effect of silicon on phytochemical and medicinal properties of aloe vera under cold stress. *Appl. Ecol. Environ. Res*, 561-575.
- Baquero Beltrán, P. A. (2021). *Diseño e implementación de un control de temperatura para una planta de caracterización de fotomultiplicadores de silicio*.
- Barragán, R., Christophoul, F., White, H., Baby, P., Rivadeneira, M., Ramírez, F., & Rodas, J. (2004). *La Cuenca Oriente: Geología y petróleo. IRD*.
- Chaeng. (2019). *Triturador de mandíbula*. Obtenido de es.chaeng.co:
<https://es.chaeng.co/other/jaw-crusher.html?campaignid=20221482436&adgroupid=153416104967&feeditemid=&targetid=kwd-322744512625&device=c&creative=660387370067&keyword=tritadora%20d>

e%20mand%C3%ADbula&gclid=CjwKCAjwxOymBhAFEiwAnodBLDZBPG
x7OLJruK6GjU9AMb-L

- Cobos, S. D., Li, L. K., Garcia, R. N., & al, e. (2023). *Diseño de una planta de producción de abono orgánico a base de cascarilla de arroz enriquecido con sílice para el cultivo de arroz en la región Piura*. universidad de piura.
- Connecting Buyers . (s.f.). *Made in China* . Obtenido de <https://htjxchina.en.made-in-china.com/product/eFXtNWKMSRfS/China-PC800-800-25-35-Tons-Per-Hour-Diesel-Engine-Hammer-Crusher-Spare-Parts-Milling-Machine.html>
- Connecting Buyers With Chinese Suppliers. (2022). *Giratorio de minería de la industria de pelo, secador de tambor giratorio, equipos de secado para el carbón, yeso, arena*. Obtenido de es.made-in-china.com: https://es.made-in-china.com/co_hnyhks/product_Industry-Mining-Rotary-Dryer-Rotary-Drum-Dryer-Drying-Equipment-for-Coal-Gypsum-Sand_oinsoyssg.html
- Covetech. (2021). *Bandas Transportadoras*. Obtenido de cove-tech.com: <https://cove-tech.com/>
- Cuervo Aguiar, J. P. (2019). *Control de inventarios en planta, mediante la evaluación del proceso de secado con énfasis en la pérdida de humedad en el molde y secado ambiente de las piezas, tazas y “One piece” de la compañía Senco Colombiana SAS*. universidad de antioquia.
- Daltechnik. (2019). *Horno rotatorio*. Obtenido de www.daltechnik.com: https://www.daltechnik.com/horno-rotatorio_es
- Dinatek . (s.f.). *Bomba Caudal hydrotek*. Obtenido de https://dinatek.ec/producto/bomba-caudal-hydrotek/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA29auBhBxEiwAnKcSqhkgBKSK4kmGw2JWyRjBJxg8oDUyqZmephBh5-1UhXUJMrM2FsLW3RoC9-sQAvD_BwE
- Distrito Industrial Boai. (s.f.). *Zhongxin Heavy Industry*. Obtenido de <https://www.zxcruisher.es/productos/crushing-equipment/24.html?campaignid=1593015516&adgroupid=57616201102&feeditemid=&targetid=kwd->

302099981025&device=c&creative=434307831995&keyword=trituradora%20de%20mandibula&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA29auBhBxEiwAnKcS

- Duque, J., González, S., Andrade, X., & Garzón, O. (2015). Levantamiento de cartografía temática escala 1:25.000, lote 2. *TRACASA-NIPSA*. doi:http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/Memoria_tecnica_Geomorfologia_EL_PANGUI_20151117.pdf
- Fuller, Traylor. (2019). *Tema 4: Reducción de Tamaño. Molienda*. Obtenido de [ocw.bib.upct.es:](https://ocw.bib.upct.es/)
https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5547/mod_resource/content/1/Tema_4_-_Molienda_I_.pdf
- GECOMIN S.A. (2009). Extracción de arena sílice en mina a cielo abierto en el predio “Las Adelitas”, localidad Cruz Colorada, municipio de Chignahuapan, Puebla. *NÉMESIS ASESORES AMBIENTALES S.C.*
- Geominsal. (2018). Arena Sílice. doi:<https://www.geominsal.cu/wpcontent/uploads/2018/02/Arena-Silice.pdf>
- GWP. (2010). A study of silica sand quality and end uses in surrey and kent. *GWP Consultantas*.
<https://tecnologiaminer.com/actualidad/metso-outotec-la-importancia-del-proceso-de-flotacion-de-minerales-1610060784>. (s.f.). Obtenido de <https://tecnologiaminer.com/actualidad/metso-outotec-la-importancia-del-proceso-de-flotacion-de-minerales-1610060784>.
- Indars S.A.S. (s.f.). *Indars S.A.S. Diseño-Fabricación de maquinaria*. Obtenido de <https://indars.com.co/productos/zaranda-vibratoria/>
- Inducom. (s.f.). *Inducom Soluciones Industriales*. Obtenido de <https://inducom-ec.com/productos/bomba-de-lodo/>
- Jessica Cristina Cajamarca León, J. E. (2010). *dspace.ucuenca.edu.ec*. Obtenido de [dspace.ucuenca.edu.ec:](http://dspace.ucuenca.edu.ec/)
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2398/1/tq1027.pdf>

- Jessica Cristina Cajamarca León, Jaime Estuardo Cuenca León. (2010). *dspace.ucuenca.edu.ec*. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2398/1/tq1027.pdf>
- Joyal. (2021). *Trituradora de martillo*. Obtenido de www.joyalcrusher.com: <https://www.joyalcrusher.com/es/products/Crushing/Hammer-Crusher.html>
- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Ali, S., Hassan, M. J., Brestic, M., & Huang, L. (2021). Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*.
- MadeinChina. (2019). *Lavado de canteras precio de fábrica Río sílice Arena 2 ruedas de lavado Arena espiral máquina de reciclaje*. Obtenido de es.made-in-china.com: https://es.made-in-china.com/co_baichygroup/product_Factory-Price-Quarry-Wash-River-Silica-Sand-2-Wheels-Washer-Spiral-Sand-Recycling-Machine_uoogsgesuy.html
- Martin, K. (2007). The chemistry of silica and its potential health benefits. *Pubmed*.
- Martínez, M. (2020). Materiales y marteria prima. *INET*. doi: <http://www.inet.edu.ar/wpcontent/uploads/2018/11/silicio.pdf>
- Metallurgist. (2022). Procesamiento de la arena de sílice. *911metallurgist*. doi:<https://www.911metallurgist.com/metalurgia/beneficio-arena-silice-equipo-requerido-planta-procesamiento/#SECADO-Y-MOLIENDA-SECA>
- Minngland. (2020). *Criba móvil Powerscreen Commander 1400*. Obtenido de www.miningland.es: <https://www.miningland.es/project/powerscreen-commander-1400/>
- Mular, B. (1982). *Diseño de plantas de proceso de minerales: Tomo I*. Madrid: Editorial Rocas y Minerales.
- MundoMinero. (19 de mayo de 2023). *La importancia del proceso de flotación de minerales – Metso:outotec*. Obtenido de mundominero.com: <https://mundominero.com.pe/la-importancia-del-proceso-de-flotacion-de-minerales-metso/>

- Outotec., H. E. (s.f.). *Tecnología Minera*. Obtenido de Tecnología Minera:
<https://tecnologiaminer.com/actualidad/metso-outotec-la-importancia-del-proceso-de-flotacion-de-minerales-1610060784>
- Panuh, D., Zulrian, R., & Surya, A. (2021). Design of mold press for the manufacturing of silica sand pellet form. *Jurnal Litbang Industri*.
- Paredes Sánchez, R. A. (2023). *Automatización de maquinaria de secado y teñido, gildan S de RL*. Universidad Tecnológica.
- Pérez, J., & Gardey, A. (2020). Sílice - Qué es, definición y concepto. *definicion.de*.
- Plastigen. (2019). *Kit Celdas de Flotación Plastigen*. Obtenido de plastigen.cl:
<https://plastigen.cl/kit-celdas-de-flotacion-plastigen/>
- Romero, C., Vallejo, C., & Cerón, G. (2019). La formación hollín en la cordillera del cóndor: estudio de la transición fluvio-marina, en la transgresión del albiano. Datos preliminares. *GUÍA DE ACTUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE ENFERMEDADES PROFESIONALES*.
doi:<https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/VIIIJCT-5.pdf>
- Romero, G. (2020). Diseño de la malla de perforación en dominios de sílice masiva y granular para reducir los costos de perforación y voladura en una mina a tajo abierto en Cajamarca. *Universidad Privada del Norte*.
doi:<https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/25895/Romero%20G%20c3%a1lvez%2c%20Gian%20Marco.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salvo, P. (2014). Formación de hollín en la pirólisis de diferentes biocombustibles oxigenados. *Universidad de Zaragoza*.
doi:<https://core.ac.uk/download/pdf/289975402.pdf>
- Schwarzkopf, F. (1971). Una comparación de los modernos sistemas de cal. *Materiales de Construcción*, 21(141).
- Secretaría de Economía de México. (2014). Sílice. *Coordinación General de Minería*.
doi:https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_silice_2014.pdf

- Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment inc. (2021). *Zaranda vibratoria*.
Obtenido de spanish.alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Zaranda-vibrating-300000409399.html>
- Sian Construction Equipment. (2022). *Retroexcavadoras Robustas y de Alto Rendimiento a la Venta*. Obtenido de es.asianconst.com:
<https://es.asianconst.com/retroexcavadoras-620.html>
- SME. (2020). Silica. *MEC*.
- Song, X. P., Verma, K. K., Tian, D. D., Zhang, X. Q., Liang, Y. J., Huang, X., & Li, Y. R. (2021). Exploration of silicon functions to integrate with biotic stress tolerance and crop improvement. *Biological Research*.
- Stewart, D., & Simmons, W. (2015). Silica mineral. *Britannica*.
- Stuar, C. (2021). 9 Unusual Ways for Using Silica Gel Packets. *Thepackagingcompany*.
- Susunaga, M., Garrido, E., Ortíz, B., & Susunaga, R. (2021). Remoción de metales pesados (Cr+6, Ni, Zn) de lixiviados del Relleno Sanitario de la ciudad de Veracruz. *UTE*. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.756>
- Tromans, D. (2008). Mineral comminution: energy efficiency considerations. *Miner Eng*, 21(11), 613-620.
- Valdiviezo, A. (2012). Minerales no metálicos para la industria de la construcción: Mercados Y Perspectivas. *Instituto Geológico minero y metalúrgico*. doi:<https://portal.ingemmet.gob.pe/documents/73138/170670/Minerales+no+met%C3%A1licos+para+la+industria+de+la+construcci%C3%B3n+-+Mercados+Y+Perspectivas+%282003%29/82dd44a7-9272-417a-9458-5235ad12cff2?version=1.0>
- Velázquez, S., & Vélez, D. (2016). Diseño conceptual de una planta para la producción de sulfato de aluminio a partir de bauxita. *Universidad EAFIT*.