

**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS “CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**UNIVERSIDAD
DE CIENFUEGOS**
CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

Título: Propuesta tecnológica preliminar para la producción de óxido de calcio a partir de cal viva para usos en laboratorios del sistema educacional.

Por

Autor: Darianny Alonso Reyes

Tutor/es: Laimí Pisch Vidal

Colaborador/es: Laritza Martínez Pérez

Cienfuegos, 2021

Pensamiento

PENSAMIENTO

La disciplina tarde o temprano vencerá a la inteligencia

Yokoi Kenji

Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS

*A mi tutora Laimí por estar a mi lado brindándome su apoyo y
paciencia incondicional.*

A mi profesor Fernando por todos sus consejos y conocimientos.

*A todos mis profesores de la carrera a los cuales les debo todos los
conocimientos alcanzados en estos cinco años.*

*A mis compañeros de aula por haber compartido conmigo estos años
de carrera.*

*A todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a la
realización de mi sueño, graduarme para llegar a ser un buen
profesional.*

Dedicatoria

DEDICATORIA

A mi mamá Odalys por su amor y dedicación incondicional, por ser un ejemplo para mí y por haberme convertido en la persona que soy hoy, sin tí nada de esto hubiera sido posible.

A mi papá Osbel por apoyarme y depositar toda su confianza en mí en cada paso que he dado, espero que te sientas orgulloso.

A mi hermana Dayetsí por estar siempre a mi lado, por ser mi amiga incondicional y mi confidente.

A mi abuela Tomasa por su paciencia, amor y consejos.

A mi abuelo Papito quien siempre estuvo pendiente de mí hasta los últimos momentos de su vida, a él donde quiera que se encuentre gracias por siempre cuidarme y quererme tanto.

A mi mejor amigo Dargge fue una suerte encontrarte gracias por tus consejos, por las risas y por ser mi apoyo en todo momento, eres una de las personas más importantes de mi vida

A mis amigas Dayana, Daniela y Leilianys, le agradezco a la vida y a la universidad por ponerlas en mi camino son lo mejor que me ha sucedido.

Y a todas las personas que de una manera u otra estuvieron involucradas en este proyecto.

Muchas gracias.

Síntesis

SINTESES

Se hizo una demanda de reactivos a nivel nacional por parte del Ministerio de Educación destinados para la actividad experimental en el nivel educacional. El objetivo de este trabajo fue proponer una tecnología para producir óxido de calcio a partir de la cal viva proveniente de la calera de una manera económica y eficiente. En la actualidad, en Cuba, se ha visto afectada la actividad por el déficit de reactivos químicos, debido al elevado precio de estos en el mercado y que el país no cuenta con el financiamiento para su importación para los laboratorios de la enseñanza general. Ante esta situación se decidió realizar la actual investigación con fines académicos, con tal propósito se realizó una revisión bibliográfica de las principales tecnologías disponibles en el país, aplicando herramientas de la ingeniería química como: balance de materiales, elementos del diseño de planta y análisis económico de inversión. Se determinó que un proceso de hidratación de cal viva es adecuado para el proceso tecnológico que se propuso y que la producción al año de este reactivo será 420 kg/semana. La propuesta cuenta con una hidratadora de cal viva con una capacidad de 66 kg/d, un separador centrífugo de alta eficiencia, un ciclón y un molino de bolas. Como resultado principal se hace un acercamiento preliminar a la propuesta tecnológica y se dan recomendaciones para la continuación y desarrollo de este proyecto.

Palabras Clave: Cal, Óxido de Calcio, Tecnología

Synthesis

SYNTHESIS

A demand was made for reagents at the national level by the Ministry of Education destined for experimental activity at the educational level. The objective of this work was to propose a technology to produce calcium oxide from quicklime from limestone in an economical and efficient way. At present, in Cuba, activity has been affected by the deficit of chemical reagents, due to the high price of these in the market and the fact that the country does not have financing for their importation for general education laboratories. Faced with this situation, it was decided to carry out the current research for academic purposes, for this purpose a bibliographic review of the main technologies available in the country was carried out, applying chemical engineering tools such as: balance of materials, elements of plant design and economic analysis investment. It was determined that a quicklime hydration process is suitable for the proposed technological process and that the annual production of this reagent will be 420 kg / week. The proposal includes a quicklime hydrator with a capacity of 66 kg /d, a high-efficiency centrifugal separator, a cyclone and a ball mill. As a main result, a preliminary approach is made to the technological proposal and recommendations are given for the continuation and development of this project.

Key Words: Lime, Calcium Oxide, Technology

Índice

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN..... 1

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS.....	4
1.1 Competencia de la industria química.....	4
1.2 Industria química en Cuba en la actualidad	6
1.3 Consumo de óxido de calcio en el mundo	7
1.4 Conceptos básicos relacionados con la cal	9
1.4.1 Formación.....	9
1.4.2 Origen Químico.....	9
1.4.3 Origen Biológico	10
1.4.4 Utilidad.....	10
1.4.5 Incompatibilidades	11
1.4.6 Medidas de Seguridad	11
1.4.7 Condiciones de almacenamiento	12
1.5 Elaboración de la Cal y su Composición	12
1.6 Clasificación de la Materia Prima.....	13
1.6.1 Dolomita.....	13
1.6.2 Magnesita	13
1.6.3 Calcita.....	13
1.7 Impurezas.....	15
1.8 Factores que afectan la calidad del CaO industrial.....	15
1.8.1 Composición química de la caliza, CaCO ₃ más impurezas	15
1.8.2 Tamaño de Piedra Caliza.....	16
1.8.3 Temperatura del horno	17
1.9 Descripción de los procesos generadores de emisiones de la producción de cal	18
CONCLUSIONES PARCIALES CAPÍTULO I:.....	19

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA UTILIZADA PARA ELABORAR LA PROPUESTA DE TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO EN LA EMPRESA QUÍMICA DE CIENFUEGOS (EQUIFA).	21
2.1 Características generales de la empresa.	21
2.1.1 Localización geográfica de la empresa	21
2.1.2 Misión y Visión de la empresa	21
2.2 Metodología propuesta	22
2.3 Producción de cal viva.	23
2.3.1 Extracción	23
2.3.2 Trituración.	24
2.3.3 Calcinación.	24
2.3.4 Cribado.	25
2.3.5 Hidratación.	25
2.3.6 Molienda y clasificación.	25
2.3.7 Envase y despacho.	25
2.4 Propuestas tecnológicas	25
2.4.1 Instalación de un proceso de hidratado	25
2.4.2 Circuito de micronizado	30
2.5 Selección de alternativas	35
2.6 Control de impurezas a escala de laboratorio	37
2.6.1. Parte Experimental	39
CONCLUSIONES PARCIALES CAPÍTULO II:	51
CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	52
3.1 Resultado de los niveles de operación estimado.	53
3.2 Propuesta de equipamiento	53

3.3 Balance de materiales en la etapa de hidratación.....	53
3.3.1 Balance en la hidratadora	54
3.3.2 Balance de materiales en el separador centrífugo.	55
3.3.3 Balance de materiales en el ciclón	55
3.4 Energía necesaria en la etapa de hidratación. Molino de bolas	55
3.5 Cálculo económico	56
3.5.1 Costo – Beneficio	56
3.5.2 Índice de costos	56
3.5.3 Estimación de costo de equipos	57
3.5.4 Costo total de inversión.....	57
3.5.6 Indicadores dinámicos de rentabilidad.....	60
CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO III:	63
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXOS.....	73

Introducción

INTRODUCCIÓN

El desarrollo científico tecnológico constituyó una parte fundamental en el programa social inaugurado en Cuba en 1959. Ya en el año 1960 Fidel Castro afirmaba que el futuro del país tenía que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia, que precisamente se estaban sembrando oportunidades a la inteligencia, veía la ciencia como una riqueza, a la cual la población en su mayoría no había tenido (Castro Ruz, 1960).

En 1964, en la inauguración de la ciudad universitaria “José Antonio Echeverría”, aclaraba el papel de la universidad en la investigación: “Pero el concepto mismo de la función de la universidad se amplía (...) Es que el concepto de universidad tiene que entrañar la investigación; pero no la investigación que se hace solamente en un aula o en un laboratorio, sino la investigación que hay que realizar a lo ancho y largo de la isla, la investigación que hay que realizar en la calle” (Castro Ruz, 1964).

La actividad experimental es uno de los aspectos clave en el proceso de enseñanza y aprendizaje de las ciencias en especial en la Química. Las prácticas de laboratorio tienen un papel fundamental debido a que potencian objetivos relacionados con el conocimiento conceptual y procedimental. Estas brindan a los estudiantes una mejor comprensión de la construcción de la comunidad científica. El trabajo de laboratorio favorece y promueve el aprendizaje de las ciencias, pues le permite al estudiante cuestionar sus saberes y confrontarlos con la realidad (López Rúa & Tamayo Alzate, 2012) .

El gobierno cubano cada año destina una considerable cantidad de recursos financieros, materiales y humanos para garantizar el derecho a la educación; sin embargo, se ven afectados los servicios que se brindan por los efectos del bloqueo económico, comercial y financiero, que se traducen en carencias diarias a consecuencia de que Cuba permanece sin tener acceso al mercado estadounidense.

Por esa razón se dificultan las vías para obtener la base material de estudio y de vida, el mobiliario y el equipamiento imprescindible para llevar a cabo el proceso docente educativo, con mayor calidad, afectando las actividades prácticas debido a la insuficiencia en la disponibilidad de recursos y reactivos para laboratorios de Física, Química y Biología, afectando la sustitución o reparación de medios y útiles en 405 dotaciones de laboratorios que afecta tanto al ciclo de la formación general de todas las especialidades como a la

especialidad de profesores de química de secundaria básica que lleva un mayor componente, los implementos para los laboratorios de biología, física y química (MINED, 2020).

En la actualidad no se encontraron referencias a tecnologías de producción de reactivos para las prácticas de laboratorio para el sistema educacional cubano

Además el Ministerio de Educación presenta dificultades al importar reactivos para los laboratorios de la enseñanza general. Como parte de la política de sustitución de importaciones, se ha estudiado la posibilidad de producir algunos sustitutos para esos reactivos en el país, tarea encargada a la Empresa Química de Cienfuegos (EQUIFA) (Velázquez Cobiella, 2020). Ante esta situación se decide realizar la actual investigación con fines académicos.

El desarrollo de esta investigación permitirá un acercamiento a la producción de reactivos químicos destinados a la enseñanza, garantizando así beneficios económicos para el país, mayor posibilidad de empleo para profesionales y tecnólogos, y una diversificación de los servicios que brinda EQUIFA.

Problema de Investigación

La carencia de una tecnología en EQUIFA, que permita la producción de óxido de calcio a partir de cal viva para usos en laboratorios docentes.

Objetivo General

Evaluar una propuesta tecnológica preliminar en EQUIFA, para la producción de óxido de calcio a partir de cal viva para usos en laboratorios docentes.

Objetivos específicos

1. Establecer los fundamentos científicos que sustentan la investigación.
2. Elaborar una propuesta tecnológica preliminar para la producción de óxido de calcio a partir de cal viva para usos en laboratorios docentes.
3. Proponer equipos tecnológicos necesarios para la propuesta tecnológica
4. Evaluar técnica y económicamente la propuesta tecnológica.

Hipótesis de la Investigación

La evaluación de una propuesta tecnológica preliminar en EQUIFA, para producir óxido de calcio a partir de cal viva, permitirá determinar si es posible o no satisfacer la demanda del Ministerio de Educación para los laboratorios docentes.

Diseño Metodológico de la Investigación

- Se aplicarán técnicas documentales de recopilación de la información, como: revisión, registro, procesamiento y representación de datos referentes al diseño de tecnología y a la producción de reactivos.
- Se utilizará el EndNote como gestor bibliográfico para los documentos consultados.
- Programas Informáticos: Software de acceso libre cálculo de costo de equipos y la herramienta informática Excel.

Capítulo I

CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE REACTIVOS QUÍMICOS

1.1 Competencia de la industria química

Desde principios del pasado siglo, la industria química se ha caracterizado por un desarrollo explosivo. Han aumentado los conocimientos científicos y fuentes de

información sobre la química. Por lo que en un mundo tan competitivo para lograr el éxito y para sobrevivir, las empresas no pueden mantenerse de manera definitiva instaladas en un mercado, ni en una tecnología determinada, lo que demuestra la importancia de gestionar de manera adecuada los procesos de innovación tecnológica.

La industria química es muy competitiva. El comercio de productos químicos es internacional y las compañías se ven forzadas a competir, en sus propios países, con compañías extranjeras tanto en sus propios mercados como en los extranjeros. Esta competencia es de dos tipos: la competencia que se genera entre compañías que producen y venden el mismo producto, sobre todo si constituye una materia prima de gran demanda; como por ejemplo, producir amoníaco; este producto es la materia prima de varias industrias químicas tales como la de fertilizantes, explosivos, farmacéutica, polímeros entre otras.

Existen pocas diferencias entre las corporaciones que producen este reactivo respecto a la calidad y atención técnica al cliente, la tendencia es que el número de productores sea bajo, se generen altos volúmenes de producción y la competencia en los precios sea intensa. Una compañía que no cuente con las bases relacionadas con materia prima o tecnología de procesamiento necesario para lograr costos de producción competitivos simplemente no puede funcionar de manera efectiva en este tipo de mercados; el otro tipo de competencia es la que se realiza entre los diferentes productos. Son muchos los productos químicos que se adquieren para satisfacer una necesidad particular, por ejemplo, para emplearlos como antioxidantes, destruir bacterias o absorber luz ultravioleta; con frecuencia ocurre que hay varios productos diferentes con características diferentes, diferente grado de efectividad y precios diferentes pero que llevan a cabo funciones similares. Como estos productos representan formas alternas para que el cliente satisfaga la misma necesidad, los productos compiten entre sí. En este tipo de mercado, la efectividad del producto, el precio y el servicio o garantía que se ofrece al cliente son elementos importantes para tener éxito en las ventas (Trino Suárez, 2004).

La eficiencia de la capacidad de producción y el continuo mejoramiento de los productos comerciales depende en gran medida del conocimiento tanto técnico como científico. Son muy pocas las industrias químicas que utilizan sus propias tecnologías y la gran mayoría, prefiere la dependencia tecnológica ya que con esto ahorran costos en investigaciones tecnológicas, que de por sí son bastante elevadas, debiendo recargar los

mismos a los productos finales. La tecnología química es dinámica y avanza constantemente a pasos agigantados por lo que la rapidez y obsolescencia en procesos y productos resulta muy alta; sin embargo, una rápida obsolescencia no es característica de todas las plantas químicas, por ejemplo, el equipo para obtener productos químicos inorgánicos de gran volumen, donde la tecnología no cambia rápidamente, puede incluso durar de 20 a 30 años como es el caso de las plantas de amoníaco y ácido sulfúrico construidas en los años treinta y hoy en día siguen funcionando con muy pocos cambios en su tecnología.

Las plantas químicas tienen una vida más corta que el equipo que se utiliza por ejemplo en minería. Esto se debe, en parte, a que los diversos componentes de la planta química, están altamente propensos a procesos de corrosión; por lo que muchas veces, resulta más conveniente renovar plantas viejas con nuevas tecnologías de procesamientos que reconstruirlas totalmente.

1.2 Industria química en Cuba en la actualidad

En el desarrollo contemporáneo de las nuevas tecnologías se manifiesta con fuerza la problemática de convertir en términos económicos de producción y comercialización, los conocimientos adquiridos en las etapas de I+D enlazados con los conocimientos ya establecidos universalmente, que dan la posibilidad de generar una nueva tecnología. Este proceso de interacción de diversas técnicas y disciplinas es la ingenierización, o sea, es la incorporación dinámica de los conocimientos de ingeniería a los procesos de generación e innovación tecnológica. Su fin es garantizar que, desde la propia escala de laboratorio se tome la ruta adecuada hasta la realización final de la nueva tecnología con un enfoque técnico-económico adecuado. En este sentido, la ingenierización se entrelaza con todo el proceso de I+D, con la realización de los proyectos y diseños de ingeniería, hasta la construcción y puesta en marcha de la instalación tecnológica en cuestión (García Capote, 1997).

Con una amplia gama de productos, la Industria Química constituye un sector de alta incidencia en el desarrollo de otras actividades económicas en el país. Llamado a ser un puntal en la sustitución efectiva de importaciones, su Grupo Empresarial acomete diversas acciones para respaldar la alta demanda de sus servicios (Figueredo Reinaldo & Sifonte Díaz, 2019).

El Grupo Empresarial de la Industria Química (GEIQ) presenta gran complejidad pues reúne gran diversidad de producciones y tecnologías pertenecientes a la industria

química. La empresa de Gases Industriales y Medicinales la cual tiene representación en todas las provincias del país, además de la empresa mixta OxiCuba que se dedica a la producción de gases industriales, a partir del fraccionamiento del Aire se produce Oxígeno, Nitrógeno, Argón, CO₂, Acetileno, Mezclas de Gases y Óxido Nitroso como anestésico.

Otra de las actividades fundamentales es la Cloro-Sosa y sus derivados. En este sentido una de las empresas que presenta mayor impacto es la electroquímica ubicada en Sagua la Grande, Villa Clara. Tras un largo y complejo proceso inversionista, cuenta con una planta de tecnología de punta que produce establemente y satisface la demanda de productos clorados del país a partir de la sal, materia prima de producción nacional.

Por su parte, la producción de NPK y fertilizantes nitrogenados está respaldada por dos plantas que generan fertilizantes mezclados NPK, una en Matanzas (Rayonitro) y otra en Cienfuegos. “Esta última produce 200 toneladas en un turno de trabajo, aunque pudiese llegar en su segunda fase de inversión a 300 mil toneladas al año. Usamos en estas mezclas la zeolita nacional para mejor aprovechamiento de las formulaciones, y contribuir a la sustitución de importaciones” (Figueredo Reinaldo & Sifonte Díaz, 2019).

En el municipio de Nuevitás, Camagüey, se cuenta con una planta de fertilizantes nitrogenados y en la provincia de Artemisa se encuentra una planta para la formulación de herbicidas, plaguicidas.

La industria de papel y cartón está integrada por 6 entidades que garantizan las producciones de papel de salud, bandejas de huevo y sacos multicapas, contándose además la producción de papel higiénico y servilletas en la Empresa Mixta PROSA ubicada en Cárdenas.

En el caso del vidrio, la Organización Superior de Dirección Empresarial (OSDE) cuenta con dos empresas. Una se dedica a producir artículos prensados, soplados y decorativos, y la otra produce cristalería para laboratorios. Por último, la elaboración de Ácido Sulfúrico, el que también elabora en la empresa Rayonitro de Matanzas.

1.3 Consumo de óxido de calcio en el mundo

Los reactivos químicos se utilizan con mayor frecuencia en varios tipos de trabajos de investigación, análisis químicos, en la preparación y también en la producción de otras

sustancias. Las características de las aplicaciones de laboratorio y su escala determinan las cantidades y tipos de reactivos. Estas sustancias se utilizan para análisis tales como: determinación de iones, separación de cationes o mezclas de aniones, detección de iones específicos y muchos otros.

Internacionalmente la cal es un material que ha sido utilizado por diversas culturas desde tiempos ancestrales, aparece en diversas industrias como lo son la metalúrgica, peletera, textil, papelera, laboratorios experimentales y se usa para procesos de purificación de aguas, tratamiento de basura, tratamiento de gases contaminantes, entre otras; he ahí la importancia de su calidad (Corathers, 2015).

El proceso de elaboración de la cal fue en sus inicios bastante simple ya que solo era cuestión de encontrar y quemar las rocas adecuadas, con el paso del tiempo este proceso se ha venido tecnificando en todo el mundo ya que la cal es un material muy versátil por sus usos tanto en la construcción como en la industria. Hoy en día la obtención de la cal es realmente interesante, todo comienza cuando se encuentra una cantera de roca caliza (CaCO_3) se extrae, se tritura, se calcina para obtener (CaO) cal viva, y en algunos casos se hidrata para obtener cal hidratada (Ca(OH)_2) o cal apagada (Soto Lopez, 2013).

La cal se produce en más de 90 países de todo el mundo. La producción mundial de cal de 2005 a 2014 promedió 314 millones de toneladas métricas por año. Durante ese tiempo, China lideró el mundo en la producción de cal, con un promedio de alrededor del 61 por ciento del total mundial. Estados Unidos (incluido Puerto Rico) fue el segundo productor líder con un 6 por ciento en el 2015 (Corathers, 2015).

Dado que no existe un análisis a nivel mundial del precio de la cal, éstos son acordados directamente entre productores y compradores de forma individual, se ha tomado como referencia el mercado de la cal en EEUU ya que dicho país es uno de los mayores productores de cal a nivel mundial, los datos obtenidos tienen como fuente la base de información de la US Geography Survey, donde se puede observar que el precio de la cal tiene una tendencia al alza del 3,85% anual (Anexo 1), valor inferior a la tendencia nacional que bordea el 5% anual; en los últimos años el valor tiende a la baja (situándolo en torno a US\$ 120/t), lo que coincide con el aumento de la producción de cal en los mercados internacionales

La producción de cal en los Estados Unidos totalizó 19,5 millones de toneladas métricas en 2014, con un valor transado de aproximadamente \$ 2,4 mil millones, a un precio aproximado de \$123.07 USD la tonelada de cal

En cuanto a la evolución de la producción mundial de cal, cabe mencionar que se tienen un crecimiento en promedio del 14,65 % anual (Soto Rubio, 2020).

1.4 Conceptos básicos relacionados con la cal

La cal es el más ancestral y al mismo tiempo el más actual de los productos químicos de origen natural conocidos y utilizados por el hombre en todo el mundo.

La materia prima utilizada en la elaboración de la cal es la piedra caliza, que es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre (su dureza en la escala de Mohs es de 3) y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico (Culqui Romero, 2017).

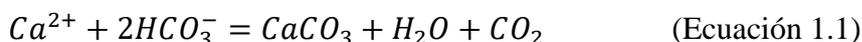
La cal tiene muy diversas aplicaciones, por ejemplo, como fundente en el proceso de refinado del acero, como aglomerante en la construcción, y como agente precipitador de impurezas en los sistemas de tratamiento de aguas. También se utiliza mucho para neutralizar los componentes ácidos de los vertidos industriales y de los gases de combustión. La producción anual de la Unión Europea asciende a 20 000 000 toneladas de cal, lo que equivale al 15 % de la producción mundial de relevancia comercial.

1.4.1 Formación

Por su aspecto blanco son muy distinguibles. Las calizas se forman en los mares cálidos y poco profundos de las regiones tropicales, en aquellas zonas en las que los aportes detríticos son poco importantes, dos procesos, que generalmente actúan conjuntamente, contribuyen a la formación de las calizas (Culqui Romero, 2017).

1.4.2 Origen Químico

El carbonato de calcio se disuelve con mucha facilidad en las aguas que contienen gas carbónico disuelto (CO_2). El entorno en los que aguas cargadas de CO_2 liberan bruscamente este gas en la atmósfera, se produce generalmente la precipitación del carbonato de calcio en exceso según la ecuación 1.1:



Esa liberación de CO₂ interviene, fundamentalmente, en dos tipos de entornos: en el litoral cuando llegan a la superficie aguas cargadas de CO₂ y, sobre los continentes, cuando las aguas subterráneas alcanzan la superficie (Culqui Romero, 2017).

1.4.3 Origen Biológico

Numerosos organismos utilizan el carbonato de calcio para construir su esqueleto mineral, debido a que se trata de un compuesto abundante y muchas veces casi a saturación en las aguas superficiales de los océanos y lagos (siendo, por ello, relativamente fácil inducir su precipitación). Tras la muerte de esos organismos, se produce en muchos entornos la acumulación de esos restos minerales en cantidades tales que llegan a constituir sedimentos que son el origen de la gran mayoría de las calizas existentes.

Actualmente limitada a unas cuantas regiones de las mareas tropicales, la sedimentación calcárea fue mucho más importante en otras épocas. Las calizas que se pueden observar sobre los continentes se formaron en épocas caracterizadas por tener un clima mucho más cálido que el actual, cuando no había hielo en los polos y el nivel del mar era mucho más elevado. Amplias zonas de los continentes estaban en aquel entonces cubiertas por mares epicontinentales poco profundos. En la actualidad, son relativamente pocas las plataformas carbonatadas, desempeñando los arrecifes un papel importante en la fijación del carbonato de calcio marino (Culqui Romero, 2017).

1.4.4 Utilidad

Es una roca importante como reservorio de petróleo, con gran porosidad. Tienen una gran resistencia a la meteorización; esto ha permitido que muchas esculturas y edificios de la antigüedad tallados en caliza hayan llegado hasta la actualidad. Sin embargo, la acción del agua de lluvia y de los ríos (especialmente cuando se encuentra acidulada por el ácido carbónico) provoca su disolución, creando un tipo de meteorización característica denominada kárstica. No obstante es utilizada en la construcción de enrocamientos para obras marítimas y portuarias como rompeolas, espigones, escolleras entre otras estructuras de estabilización y protección.

La roca caliza es un componente importante del cemento gris usado en las construcciones modernas y también puede ser usada como componente principal, junto con áridos, para fabricar el antiguo mortero de cal, pasta grasa para creación de estucos o lechadas para pintar superficies, así como otros muchos usos por ejemplo en industria farmacéutica o peletera. Se encuentra dentro de la clasificación de recursos naturales

(RN) entre los recursos no renovables (minerales) y dentro de esta clasificación, en los no metálicos, como el salitre, el aljez y el azufre.

Mineralógicamente, los carbonatos útiles para la fabricación de los distintos tipos de cal son: la dolomita, la aragonita y la calcita. Siendo la aragonita, relativamente escasa, ya que es la obtenida por precipitación en caliente en un proceso químico. Las propiedades de cada uno de ellos se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Características físico químicas de las calizas (Culqui Romero, 2017).

Nombre Mineralógico	Fórmula Química	Peso Molecular	Peso Específico	Dureza	Forma de los Cristales
		g/mol	g/cm ³	Escala de Mohs	
Dolomita	CaCO ₃ , MgCO ₃	184,4	2,84	3,5 – 4,0	Romboédrica
Aragonita	CaCO ₃	100,1	2,84	3,5 – 4,0	Ortorrónica
Calcita	CaCO ₃	100,1	2,72	3,0	Romboédrica
Magnesita	MgCO ₃	84,3	3,00	3,5 – 4,5	Romboédrica

1.4.5 Incompatibilidades

Reacciona violentamente con ácidos fuertes, agua, trifluoruro de cloro o trifluoruro de boro; reacciona con agua generando el calor suficiente para encender materiales combustible (Química Pima, 2013).

1.4.6 Medidas de Seguridad

Evitar el contacto con piel y ojos. Llevar equipo de protección. No llevar lentes de contacto cuando se maneja este producto. También es aconsejable tener un lavador de ojos de bolsillo. Mantener los niveles de polvo al mínimo. Minimizar la generación de polvo. Evitar el polvo utilizando ventilación o filtros adecuados en los lugares donde se manipule. Siempre que se pueda es mejor la manipulación mecánica.

Evitar la inhalación o ingestión y contacto con la piel y con los ojos. Se requieren medidas de higiene profesionales generales para asegurar el manejo seguro de la sustancia. Estas medidas llevan aparejadas buenas prácticas de personal y servicio (es decir, limpieza regular con dispositivos de limpieza adecuados), no beber, comer o

fumar en el lugar de trabajo. Ducharse y cambiar de ropa al final del turno de trabajo. No llevar ropa contaminada a casa.

La sustancia debería almacenarse en seco. Debe evitarse cualquier contacto con el aire y la humedad. En caso de ensilado, los silos deberán ser estancos. Mantener el producto lejos de los ácidos, de cantidades importantes de papel y paja y compuestos nitrogenados. Mantener fuera del alcance de los niños. No usar aluminio en el transporte o almacenaje si hay riesgo de contacto con el agua.

En caso de incendio, no usar agua evitar la humidificación. El óxido de calcio reacciona con el agua y genera calor. Esto puede causar riesgo de incendio (EQUIFA, 2021).

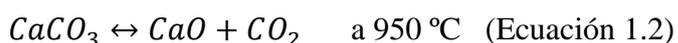
1.4.7 Condiciones de almacenamiento

Lugares ventilados, frescos y secos. Lejos de fuente de calor, ignición y de los rayos directos de sol. Separar de materiales incompatibles. Rotular los recipientes. Rotular los recipientes adecuadamente y mantenerlos bien cerrados.

Separado de alimentos y piensos; separado de ácidos. Mantener en lugar seco. Mantener a temperatura ambiente, evitar el contacto con la humedad. No almacenar a la intemperie. Puede cubrir con lonas para proteger de la humedad (Química Pima, 2013).

1.5 Elaboración de la Cal y su Composición

Se forma óxido de calcio cuando el carbonato de calcio se quema en el aire (Ecuación 1.2). En gran escala se produce calentando caliza en grandes hornos de cal llamados también caleras:



La reacción es reversible, como indica la ecuación anterior. Se alcanza el equilibrio cuando en contacto con la caliza y la cal existe una determinada concentración o presión parcial de CO₂. La presión de equilibrio se llama presión de descomposición del carbonato de calcio. Si a cualquier temperatura la presión parcial del CO₂ es inferior a la del equilibrio, se descompondrá la caliza para incrementar dicha presión al valor de equilibrio. En cambio, si la presión parcial es superior a la del equilibrio, el óxido de calcio se combinará con el dióxido de carbono para formar el carbonato. La relación entre la presión del dióxido de carbono (en mm de Hg) y la temperatura se muestra en la tabla 1.2:

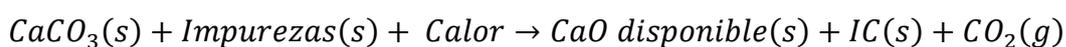
Tabla 1.2: Valores de presión para el CO₂ (Culqui Romero, 2017).

Temperatura (°C)	500	600	700	800	882	900
------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

El contenido de MgO fluctúa entre 0,5 % a 2,5 %. Si este carbonato contiene cantidades sustanciales de sílice, alúmina, hierro, se obtiene la cal viva hidráulica. De acuerdo al grado de calcinación y a los fundentes que contengan la materia prima, se obtiene la cal viva calcítica de alta, mediante o baja reactividad, siendo esta reactividad la medida del tiempo de residencia que necesita cal en el proceso de hidratación.

En forma vulgar la descarbonatación significa que cuando el calor llega al mineral de carbonato de calcio, este inicia su descomposición y comienza a generarse el óxido de calcio y en la superficie se desarrollan las reacciones que forman el requemado de éste último, produciendo el óxido de calcio combinado.

Por lo tanto el grado de calcinación va a depender de varios factores, entre otros, tamaño granulométrico de la materia prima o heterogeneidad física, cantidad de calor absorbido por cada partícula para lograr la disociación, las impurezas que se enlazan al calcio, tipo horno utilizado, etc., entonces en la reacción química para lograr la disociación en un proceso industrial, debemos tener presente que en la explotación industrial de calizas, es posible obtener partículas geoméricamente homogéneas, mono tamaños o mono granulares; por lo general se produce partículas de diferentes tamaños, y con distinta forma. Por otro lado, la tecnología permite una calcinación adecuada cuando la relación entre el tamaño mayor y el menor es 1:3. En el horno, el calor generalmente no es constante, por lo que la disociación del CaO y el CO₂ es diferente, para las partículas grandes y las pequeñas. Si a ello, le agregamos que las calizas vienen con impurezas asociadas, la reacción química industrial es por la ecuación 1.6:



(Ecuación 1.6)

Dónde:

El CaO, disponible o total, está conformado por el CaO útil + CaO requemado + CaO crudo y por el IC (s) que corresponde a las impurezas concentradas.

El CaO útil, corresponde al CaO libre generado durante la calcinación y cuyo pH natural es 12,6. Generalmente se encuentra entre la capa superficial de la partícula, que corresponde al material requemado por sobreexposición al calor y el núcleo de ésta, que es donde queda el material crudo, sin calcinar.

El CaO requemado se encuentra en la superficie de la partícula, es el CaO que se ha combinado, por exceso de calor, durante la calcinación, con la sílice, la alúmina o el hierro contenido en las calizas y cuyo pH natural es entre 12,6 a 12,8 o más.

Generalmente corresponde a la parte exterior de las partículas grandes y a la totalidad de las partículas pequeñas.

1.7 Impurezas

El contenido de impurezas en los distintos tipos de cal, va a depender de las que se encuentren en la materia prima, entre las más comunes están principalmente: la sílice, el aluminio, el hierro, el azufre, el magnesio y los metales alcalinos, entre otras. En algunos casos hay trazas fundentes y pigmentos, tales como: el magnesio y el flúor, que le otorgan al producto distintas tonalidades en su color, fluctuando desde el blanco, al beige, e incluso algunas alcanzan el negro, siendo esta última característica una propiedad física, que no altera sus propiedades de alcalinización ni su calidad en la capacidad o valor alcalinizante.

La presencia de estos elementos, puede ser muy importante en algunos usos o aplicaciones de la cal donde tanto el manganeso, como el flúor, afectan o perjudican el proceso en el que la cal es adicionada o quedan asociados en el residuo final que se genere (Culqui Romero, 2017).

1.8 Factores que afectan la calidad del CaO industrial

Las condiciones de calcinación afectan significativamente la calidad de cal viva, CaO disponible, que resulta de este proceso. Los siguientes factores son los más determinantes de la calidad del CaO total o disponible:

- Composición química de caliza.
- Tamaño de la Piedra Caliza
- Temperatura del horno durante el período de calcinación
- Tiempo de residencia de la cal en el interior del horno
- Concentración del anhídrido carbónico en la atmósfera del horno.

1.8.1 Composición química de la caliza, CaCO₃ más impurezas

Para obtener una cal de calidad, la caliza utilizada debe tener una cantidad mínima de impurezas del tipo partículas de Si, debido a que esta reacciona con el CaO formando silicatos, los cuales se acumulan en el fondo de los hornos, obstruyendo el paso del material, además, de que la dureza de la cal obtenida, depende de las impurezas de la caliza utilizada como también de la temperatura de calcinación. Una cal impura se transforma en una cal dura si se calcina a temperaturas elevadas.

Sin embargo, la composición química de la caliza, carbonato de calcio con impurezas, no se puede controlar sin un impacto del mayor costo en la fabricación de cal viva, por consiguiente, se aceptan generalmente variaciones.

De esta forma se opta por calentar uniformemente la caliza en el horno, por eso se debe controlar continuamente la temperatura de calcinación, el tamaño de partícula debe ser relativamente uniforme. Hay que evitar largos tiempo de residencia en el horno (González Gavilánez, 2012).

1.8.2 Tamaño de Piedra Caliza

El tamaño de partícula de caliza debe ser pequeño, típicamente alrededor de 38,1 mm. Sin embargo, debido a la naturaleza del funcionamiento del chancado, en realidad hay un rango en tamaño que va desde 38,1 mm a 50,8 mm. En las grandes industrias, la caliza para producir cal se encuentra en dos rangos de 6 mm a 15 mm y de 15 mm a 50 mm.

Aunque el tiempo de residencia y la temperatura en el horno son constantes, la penetración del calor en las partículas de caliza es diferente, debido a la variación del tamaño de ésta.

Con un tamaño de mineral más grande, el calor no penetra totalmente al centro, por consiguiente, el centro de estos minerales queda crudo, como carbonato de calcio, mientras se convierte el exterior a CaO; estos núcleos o centros son llamados “arena” en la lechada de cal. Para minerales de tamaño intermedio, la penetración del calor es algo más completo y se convierte todo el mineral en CaO, generándose una capa exterior de CaO enlazado a la sílice y alúmina presente en la materia prima. Para las partículas más pequeñas, el calor ingresa rápidamente al centro y se sobrecalienta la superficie, formando una capa externa, una cáscara exterior más gruesa y algo dura, donde el agua le cuesta penetrar, por consiguiente, según el equipo utilizado para la preparación de la lechada de cal, se puede retardar o prevenir el proceso de apagado.

Hay piedras calizas, de diferente tamaño y geometría, sometidas a temperatura y tiempo de residencia constante en un horno durante la calcinación, en el centro de la partícula queda material crudo y en la superficie el material quemado. Los productos obtenidos con las partículas de tamaño grandes y medio son altamente reactivas (cal viva quemado suave) y las partículas más pequeñas, cal viva quemado duro, generalmente son de reactividad media e incluso podrían alcanzar reactividad baja si son calcinadas a “muerte”. Reactividad se refiere en este caso al tiempo que demora una disolución de

cal con una concentración al 25 %, en peso, en alcanzar una diferencia de temperatura de 40 °C, ensayo utilizado para diseñar o elegir el equipo hidratador más adecuado con el fin de lograr como producto un polvo fino y seco (González Gavilánez, 2012).

1.8.3 Temperatura del horno

La temperatura teórica requerida para calcinación es de aproximadamente 900 °C, sin embargo, en la práctica encontramos que la temperatura es mucho mayor, alrededor de los 1 350 °C. La determinación de la temperatura correcta en el horno calcinador, es hoy más un arte que una ciencia, y esta dependerá del tamaño de la piedra caliza, del tipo de horno y el tipo de combustible usado.

El operador del horno calcinador debe experimentar para determinar la temperatura exacta necesaria, para el tamaño de la piedra caliza que se utiliza. En general, es mucho mejor usar una temperatura baja con el menor tiempo de residencia posible, para lograr la calcinación completa. Una temperatura alta de calcinación causara un alto encogimiento y una reducción del volumen de la cal. Una alta temperatura, causará también una recarbonatación de la superficie de los guijarros de cal debido a la presencia de CO₂ proveniente de la caliza y también producto de la combustión del horno calcinador, lo que hará que la cal no sea porosa, cal que no es conveniente para la hidratación.

La temperatura del horno afecta la calidad del CaO producido y por ende al hidróxido resultante desde el apagado de dicha cal viva. Tamaños de partícula muy pequeños con gran superficie específica, es el producto final más deseable de óxido del calcio.

En la operación industrial, el control de temperatura no se puede realizar directamente en la partícula, como tampoco es factible contar con un tamaño mono granular y una forma geométrica única de ésta, por lo que el tiempo de calcinación y el control en forma indirecta de la temperatura: son las variables que permiten de algún modo tener un control sobre una calcinación adecuada, para que el efecto sobre el área superficial sea menor.

Las variables que afectan el grado de disociación son:

- Características de la caliza
- Distribución de tamaño de las partículas
- Forma de las partículas
- El perfil de temperatura en la zona de calcinación y

- La velocidad de intercambio del calor entre los gases y las partículas (González Gavilánez, 2012)

1.8.4 Tiempo de residencia

Durante el proceso de calcinación, el tiempo de residencia de la caliza, CaCO_3 más impurezas, en el horno es muy crítico. Es importante que el tiempo de residencia sea lo más corto posible. Sin embargo, se debe dar margen para que el calor penetre las partículas de caliza por suficiente tiempo y conduzca el CO_2 fuera de ellas. La temperatura y el tiempo son variables de control de la calcinación, es decir, hay calcinaciones con baja temperatura y alto tiempo de residencia, o, con alta temperatura y bajo tiempo de residencia, siendo opción de cada fabricante elegir lo que satisface su sistema.

1.8.5 Atmósfera del horno

Además de la temperatura del horno y del tiempo de residencia, la atmósfera del horno afecta la calidad del producto obtenido, CaO disponible. Así como aumenta la temperatura en el CaCO_3 y el gas de CO_2 se suelta desde la caliza, para producir CaO disponible, se debe entregar al CO_2 la salida o escape necesario del horno hacia afuera. El CaO disponible tiene la afinidad de absorber humedad y CO_2 para convertirse en CaCO_3 . El efecto de esta conversión es más pronunciado en las partículas pequeñas de CaO debido a la mayor.

1.9 Descripción de los procesos generadores de emisiones de la producción de cal

La cal es un producto ampliamente empleado, por ejemplo, como fundente en el refinado del acero, como aglomerante en la construcción, en la industria de la producción de azúcar o en la fabricación de pasta de papel. Se emplea también en el tratamiento de aguas residuales para precipitar impurezas o como neutralizador de ácidos de efluentes líquidos y gaseosos de la industria.

La cal puede producirse en fábricas de cal, denominándose en este caso cal comercial, o bien en fábricas de diferente índole para emplearla como producto intermedio dentro de sus propios procesos, se denominaría en este caso cal intermedia. Independientemente del uso de la cal, su proceso de fabricación es común. Se obtiene por la calcinación de la piedra caliza a altas temperaturas (unos $900\text{ }^\circ\text{C}$) en hornos de diferente concepción y explotación, según sea la aplicación que se vaya a dar al material cocido (normalmente hornos de tipo vertical o rotativo). La piedra caliza contiene entre un 97 % y un 98 % de

carbonato cálcico (CaCO_3) en base seca, estando formado el resto por carbonato magnésico (MgCO_3), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y sílice (SiO_2). Sin embargo, algunas piedras calizas contienen del 35 % al 45 % de carbonato magnésico, siendo clasificadas entonces como dolomita. Previo a su entrada en el horno, la piedra caliza o dolomita es triturada y molida para reducirla a un tamaño adecuado para los diferentes diseños de hornos. Además, por regla general, el óxido de calcio obtenido en el horno se machaca, se tritura o se tamiza antes de transportarlo al silo de almacenamiento para su distribución (SNAP, 2019).

El proceso de fabricación de cal lleva asociadas las siguientes fuentes de emisión:

- Obtención de la caliza en canteras: lleva asociada la emisión de partículas.
- Pretratamiento de la caliza: se producen emisiones de partículas.
- Combustión en el horno: la quema de combustibles para la obtención de calor en el horno genera emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos.
- Calcinación de los carbonatos en el horno: se producen emisiones de CO_2 por la descarbonatación de la caliza y la dolomita.
- Postratamiento de la cal: se producen emisiones de partículas.

CONCLUSIONES PARCIALES CAPÍTULO I:

- La revisión bibliográfica y documental permite afirmar que el óxido de calcio es un reactivo ampliamente utilizado a nivel mundial.
- Cuba produce este reactivo con fines comerciales a nivel nacional y en pequeñas cantidades, que no satisface la demanda del sector educacional.
- Los países que se destacan en la comercialización de óxido de calcio son China y Estados Unidos
- La cal es el más ancestral y al mismo tiempo el más actual de los productos químicos de origen natural conocidos y utilizados por el hombre en todo el mundo.

Capítulo II

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA UTILIZADA PARA ELABORAR LA PROPUESTA DE TECNOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO EN LA EMPRESA QUÍMICA DE CIENFUEGOS (EQUIFA).

2.1 Características generales de la empresa.

2.1.1 Localización geográfica de la empresa

La Empresa Química de Cienfuegos (EQUIFA) se ubica en la Zona Industrial #2, O'Bourke, Cienfuegos donde anteriormente se encontraba la Empresa de Fertilizantes Nitrogenados de Cienfuegos (EFNC). La instalación tiene aproximadamente 367066,50 m² de superficie y limita al Este con Talleres de Reparaciones Automotor de la ECOI-6 y la Empresa de Petrocasas, al oeste el Río Salado, al Norte con el Hospital Psiquiátrico y al Sur con la Bahía de Cienfuegos. El medio ambiente donde se encuentra localizada la industria posee un alto grado de transformación antrópica, debido a las acciones constructivas anteriores, hay que destacar que la presencia de este tipo de establecimientos genera bienes a la comunidad y al estado, de acuerdo a las necesidades y a la política actual de contribuir con el desarrollo socioeconómico del país.

2.1.2 Misión y Visión de la empresa

Misión

Satisfacer de manera sustentable las necesidades de crecimiento en el sector agrícola del país con la producción de fertilizantes granulados del tipo NPK para mejorar el rendimiento de la tierra y su rentabilidad. Minimizar los impactos ambientales negativos a través del manejo y disposición final de los desechos peligrosos. Proporcionar al sector de la Salud Pública reactivos químicos y dispensariales de acuerdo a requerimientos y especificaciones de comercialización. Proveer al Comercio Mayorista productos de aseo, higiene y limpieza.

Visión

Alcanzar el liderazgo nacional en la realización de nuestras producciones, así como lograr la competitividad nacionalmente, mediante la formación integral y continua de sus especialistas, el desarrollo de la actividad científico-técnica, la experiencia acumulada en un clima laboral participativo y de mutuo compromiso, donde la mejora empresarial concilie tanto los objetivos económicos como la realización de las personas.

2.2 Metodología propuesta

Este capítulo permite identificar las principales tecnologías utilizadas en el país para la producción de óxido de calcio a partir de cal viva. Se construyó un diagrama heurístico (figura 2.1), donde se muestra el procedimiento metodológico que se empleó para determinar la viabilidad del proyecto para su implementación en EQUIFA

Se usaron varias herramientas ingenieriles bajo el principio de la convergencia metodológica, que se consideran complementarias y no antagónicas. En particular el balance de masa, herramientas del diseño de plantas y análisis técnico económico. Además, se emplearon softwares profesionales y se desarrollaron libros de cálculo Excel.

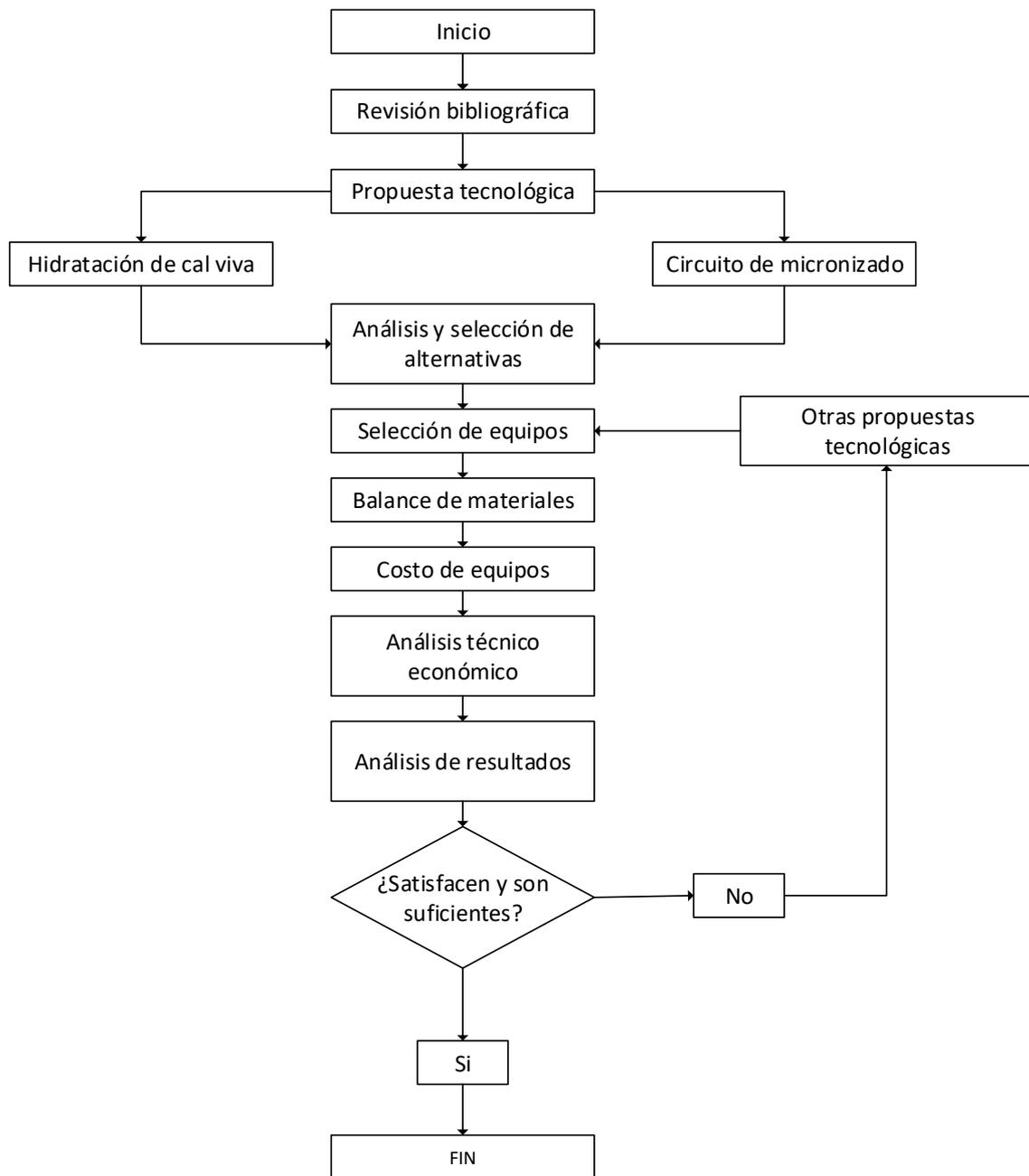


Figura 2.1 Metodología a seguir para la propuesta tecnológica. Fuente: Elaboración propia.

2.3 Producción de cal viva.

Los procesos para la obtención de cal que se presentan a continuación de forma simplificada. (González Gavilánez, 2012)

2.3.1 Extracción.

El proceso de producción de la cal comienza desde la exploración y selección del yacimiento de piedra caliza. Esta selección se realiza de forma tal que se asegure el abastecimiento de materias primas con las características físicas y químicas requeridas.

Es entonces que se procede a la extracción de las canteras de caliza con pico y pala o con cargas de explosivos.

2.3.2 Trituración.

En esta etapa es sometida a un proceso de trituración, el equipo empleado en el proceso es la machacadora primaria, esta tiene como función principal reducir la granulometría obteniéndose un producto final de caliza de entre 20-100 mm que es llevado mediante cintas transportadoras hacia silos de almacenamiento para un posteriormente ser calcinados en el horno a temperaturas superiores a 900 °C.

2.3.3 Calcinación.

La cal es producida por calcinaciones de la caliza y/o dolomita trituradas por exposición directa al fuego en los hornos (900 a 1 200 °C). En esta etapa las rocas sometidas a calcinación pierden dióxido de carbono y se produce el óxido de calcio (cal viva). Es importante que el tamaño de la roca sometida a calcinación sea homogéneo para que la calcinación se realice en forma efectiva y en su totalidad en todos los fragmentos. El horno empleado en el proceso es un horno shaft (tabla 2.1), se deben emplear los rangos de temperatura mencionados anteriormente de emplear una temperatura excesiva, además de las obvias consecuencias en los costes de producción, mayor consumo de energía y menor vida del horno.

Tabla 2.1. Requerimientos técnicos de Horno Shaft. Fuente: (Fernández Neira, 2013).

	Horno Shaft
Tamaño de piedra	15-150 mm
Forma de la piedra	6:1 (sándwich)
Consumo térmico	3 500 kj/kg
Consumo eléctrico	25-40 kWh/t
Consumo refractario	Bajo
Capital costs (basados en un horno de 500 t/día)	80%
Contenido de co2 en la cal	< 1 %
Reactividad	3-5 min
Emisión de polvo (% de la producción)	5-10 %

2.3.4 Cribado.

Se somete a cribado separando a la cal viva y obteniéndose tres clasificaciones granulométricas distintas: 0-3 mm, 3-10 mm y 10-40 mm.

2.3.5 Hidratación.

Consiste en agregar agua a la cal viva para obtener la cal hidratada. Este proceso de hidratación conlleva una reacción química exotérmica en la que se liberan grandes cantidades de calor. Durante la hidratación o apagado de la cal, las rocas de cal viva absorben agua desintegrándose y obteniéndose un polvo fino de color blanco. De este proceso se hablara en el epígrafe 2.4.1

2.3.6 Molienda y clasificación.

Para valorizar los rechazos del equipo separador se instala un molino de bolas (Figura 2.6) que recibe los materiales más gruesos generados en el proceso, los muele y los vuelve a introducir en el separador. De este proceso se hablara en el epígrafe 2.4.1.3

2.3.7 Envase y despacho.

El material obtenido ingresa a la empacadora donde es enfundado, pesado y despachado.

Para la obtención de la cal viva y de cal hidratada a partir de la piedra caliza es necesario seguir un proceso de manufactura controlado.

2.4 Propuestas tecnológicas

La propuesta tecnológica se analiza para su posible implementación en EQUIFA utilizando una de las áreas disponibles de la empresa

2.4.1 Instalación de un proceso de hidratado

La cal viva proveniente del proceso de calcinación va hacia un proceso de hidratación de la cal que se produce en una hidratadora de tres etapas constituidas por agitadores de doble hélice que trabajan a una velocidad elevada para disminuir la cantidad de aglomeraciones de la cal hidratada descargada y para aumentar la superficie específica de la cal hidratada (figura 2.2).

La alimentación de la hidratadora desde la tolva de alimentación se lleva a cabo mediante un sistema de dosificación constituido por tornillo sin fin de paso variable, tornillo de pesaje y pantalón de selección de proceso.

El hidratador está equipado con dispositivos para el control de la reacción de la hidratación y de la humedad de la cal hidratada que permite una regulación del proceso de hidratación de la cal.

La cal hidratada se envía a un separador centrífugo de alta eficiencia.

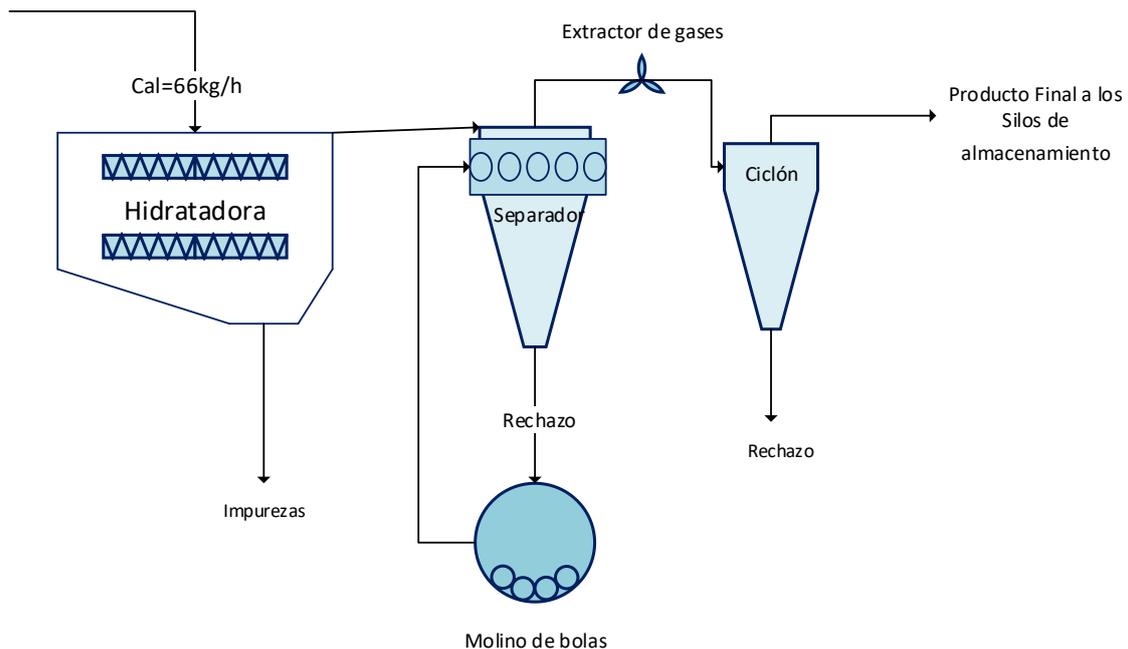


Figura 2.2. Proceso de hidratación y molienda. Fuente: Elaboración propia. Etapas del proceso: (Fernández Neira, 2013).

Los rechazos del separador son enviados a un molino de bolas que trabaja en circuito cerrado con el propio separador, de forma que el producto más fino es separado y enviado a los silos de almacenamiento para su posterior venta y distribución, siendo los rechazos del separador enviados al molino donde una vez triturados son introducidos nuevamente en el separador para repetir el proceso (Fernández Neira, 2013).

2.4.1.1 Hidratadora

El cuerpo principal de la máquina se compone de tres cámaras superpuestas, llamadas ``etapas``

En la primera etapa, la cal viva recibe agua del rack de agua de alimentación a través de múltiples puntos de inyección de agua y se somete a una fuerte acción mezcladora (Figura 2.3).

Dos ejes de alta velocidad funcionando en contra-rotación, dispuestos con una amplia superposición de las palas, producen un fuerte efecto de agitación y, por consiguiente, una drástica disminución de las aglomeraciones en la salida.

Esta primera etapa es de velocidad variable, lo que permite adaptar la intensidad de mezcla y el tiempo de retención a una amplia gama de calidades de cal.

Al final de la primera fase, la cal cae en la segunda fase en la que finaliza la reacción de hidratación casi en su totalidad. Durante la transformación del óxido de calcio en hidrato, el peso específico aparente del material es básicamente reducido a la mitad. Por esta razón, la segunda etapa tiene un volumen dos veces más grande que el de la primera etapa.

La tercera etapa está diseñada para homogeneizar el producto acabado, o para permitir un tiempo de retención adicional que permita completar la reacción de la cal viva con media o baja reactividad.



Figura 2.3. Equipo de hidratación. Fuente: (Alibaba, 2021c).

Una esclusa ajustable permite que el hidrato más ligero descargue por rebosamiento, mientras que la mayoría de la cal, más calcinada, con una velocidad más lenta de reacción y un mayor peso específico se pueda mantener durante un periodo más largo, para que la reacción finalice. El material no procesado es recogido en la parte inferior de esta etapa, de donde es periódicamente retirado.

Durante la reacción de hidratación se libera a la atmosfera a vapor de agua que arrastra consigo gran cantidad de polvo, es por ello que la hidratadora se equipa con un filtro de mangas (Fernández Neira, 2013).

2.4.1.2 Circuito de separación

Para separar los finos de los materiales de tamaño más grueso se utilizará un separador centrífugo de alta eficiencia (Figura 2.4).



Figura 2.4. Separador centrífugo de alta eficiencia. Fuente: (Alibaba, 2021a).

Este separador está constituido por una unidad compacta preparada para funcionar en circuito cerrado. El equipo es alimentado por gravedad y el material se carga desde la parte superior.

El principio de operación consiste en dispersar el material de alimentación en un flujo de aire que lo transporta a través de una jaula giratoria para seleccionar el corte.

El separador cuenta con un alto grado de flexibilidad y un elevado rendimiento gracias a la posibilidad de ajustar tanto el flujo de aire transporte como velocidad de rotación de jaula, en cualquier combinación, para adaptarse a cada producto que se vaya a separar.

El circuito de separación se completa con un extractor de gases encargado de aportar el aire que transporta el producto y un separador ciclónico (Figura 2.5) que recoge el producto seleccionado para su envío al almacenamiento final (Fernández Neira, 2013).



Figura 2.5. Ciclón. Fuente: (Alibaba, 2021b).

2.4.1.3 Molino de bolas

Para valorizar los rechazos del equipo separador se instala un molino de bolas (Figura 2.6) que recibe los materiales más gruesos generados en el proceso, los muele, y los vuelve a introducir en el separador.

Se trata de un molino de acción periódica que está formado por un cuerpo cilíndrico de acero soldado eléctricamente, sostenido sobre cojinetes.

Para proteger al molino de un rápido desgaste, la cara interna del cuerpo se reviste mediante una chaqueta o forro realizado con chapas de acero de alta resistencia.

Como agente de molienda se usan bola de acero de diferentes diámetros, dureza y composición siderúrgica. Cuando el molino gira, las bolas junto con el mineral son elevados por las ondulaciones del forro, subiendo hasta una altura determinada, de donde caen girando sobre sí golpeándose entre ellos y contra las chaquetas o revestimiento interiores. Luego vuelven a subir caer y así sucesivamente. En cada vuelta del molino hay una serie de golpes producidos por las bolas, estos golpes son los que van moliendo el mineral.

El molino será accionado bien por una transmisión de correas trapezoidales y engranajes de mando o mediante una reductora, mediante una rueda dentada de acero con dientes fresados montada sobre el cuerpo cilíndrico del molino.



Figura 2.6. Molino de bolas. Fuente: (Alibaba, 2021d).

La carga de bola debe ser correcta y bien proporcionada, con bolas lo suficientemente grandes para triturar las partículas de mineral más grande y duras, pero no las muy finas.

El mineral ya molido hasta la finura indicada, circula hasta que terminen de molerse las pocas partículas de mineral grandes no fraccionadas. La capacidad de producción del molino de bola se determina por el peso de carga y la duración del ciclo de operación y trabajo, que es la suma de los tiempos de carga, molienda y descarga.

Normalmente los molinos de bolas trabajan con un 70 a 78 % de sólidos, dependiendo del peso específico del producto a moler. La cantidad de bolas que se coloca dentro de un molino está en un rango del 40 al 50 %, generalmente nunca se alcanza el 50 % del volumen.

La duración de la molienda es función de las dimensiones del molino, del tamaño de las partículas de mineral entrante y de finura de molido exigida a la salida.

La potencia necesaria para el accionamiento del molino es proporcional a su carga y es de aproximadamente 1,5 kW.h/t de la mezcla de producto y bolas.

La cantidad de mineral que se puede cargar oscila entre 0,4 y 0,5 toneladas por metro cúbico de capacidad (Fernández Neira, 2013).

2.4.2 Circuito de micronizado

El proceso de micronizado de la cal es una consecuencia del carácter polivalente de la misma. La cal tiene un uso como mortero en construcción pero también tiene un uso como neutralizante básico en muchísimos procesos industriales en los que se producen efluentes ácidos, de ahí su gran importancia medioambiental campo en el que cada vez encuentra nuevas aplicaciones y que está siendo uno de los motores de crecimiento de la

producción de cal, especialmente en los países desarrollados donde constantemente se van implantando nuevas exigencias legales en todo lo referente al tratamiento de residuos (Fernández Neira, 2013).

Tanto en su uso como material de construcción como en su uso de correctivo medioambiental la cal debe presentar una forma micronizada que al aumentar la superficie específica contribuya a mejorar y acelerar su eficiencia. Por ese motivo hoy en día, en prácticamente cualquier fábrica de cal moderna, una vez superado el proceso de calcinación la cal debe pasar por un proceso de transformación de su granulometría a fin de conseguir los efectos que se persiguen.

Para este proceso denominado micronizado (Figura 2.5), en el que la finura del grano debe estar por debajo de 200 micras, existen varias posibilidades tecnológicas. Se ha elegido un tipo de molino, llamado pendular, debido a que el micronizado se consigue por la fuerza centrífuga que mantiene los granos de cal entre unos péndulos con rodillos y un aro fijo de rodadura.

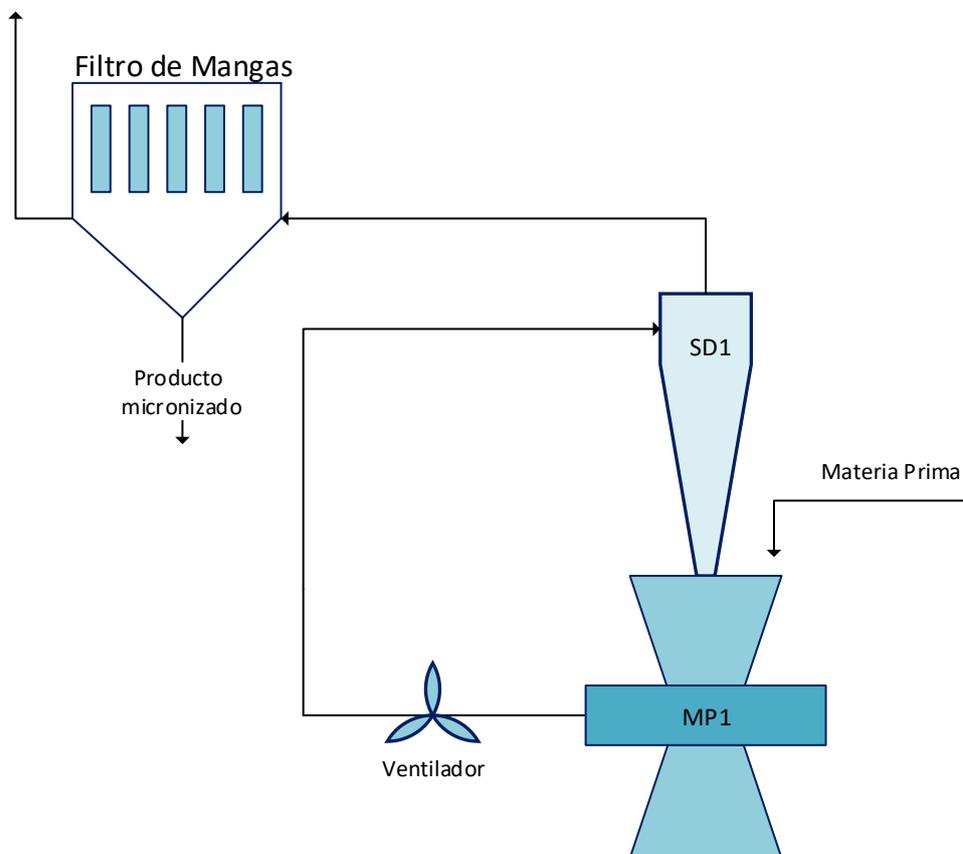


Figura 2.7. Circuito de micronizado. Fuente: Elaboración propia. Etapas del proceso (Fernández Neira, 2013)

El material a micronizar, cuya granulometría oscila entre cero y cuarenta milímetros, es introducido en el molino (MP1) (Figura 2.7) por un alimentador alveolar (regulado por la potencia del motor del molino, o bien por la potencia del ventilador de arrastre) depositándose en el fondo, de donde es recogido por las rejillas que giran conjuntamente con el grupo de estrella-péndulos y proyectado en forma de chorro continuo entre cada rodillo y el aro donde es pulverizado.

Al mismo tiempo el aire de circulación entra a la base del molino a través de una serie de alabes tangenciales que provocan el remolino ascendente que arrastra las partículas finas y medias.

La corriente de aire cargada de partículas llega al separador dinámico (SD1) (Figura 2.7) que clasifica el material pulverizado, rechazando las partículas gruesas hacia la cámara de molienda. Las partículas molidas al tamaño requerido son entonces arrastradas hacia el ciclón o filtro de mangas colector, de cuyo interior son recogidas como producto final.

Un conjunto de tuberías, diseñadas adecuadamente para limitar las pérdidas de carga y las deposiciones de material, une los diversos elementos de la planta: molino-separador, ciclón-filtro-ventilador, etc. Todo el conjunto de la instalación funciona al vacío (Fernández Neira, 2013).

2.4.2.1 Molino pendular

Los molinos pendulares se emplean para el molido de materias primas de diversa naturaleza, peso específico y humedad, hasta durezas de tipo medio (arcillas, caliza, bentonita, yeso, dolomitas, etc.) produciendo materiales finales de una calidad excepcional (Fernández Neira, 2013).

El molino se realiza mediante péndulos de grandes dimensiones, que al rodar y bajo la acción de la fuerza centrífuga ejercitan una fuerte presión sobre la pista situada en la base del molino (Ilustración 2.5).

Respecto a otros molinos el molino pendular presenta las siguientes ventajas:

- Breve tiempo de permanencia del producto en la zona de molienda.
- Mayor ventilación interna que en los demás tipos de molinos.

Estas características se traducen por su parte en las siguientes ventajas:

- Molienda controlada, permitiendo alcanzar la finura requerida con la mínima producción de extrafinos.

- Menos consumo energético.
- Manejo y ajuste más fácil y eficaz.



Figura 2.8. Molino pendular. Fuente: (Schianchi, 2021).

2.4.2.2 Filtro de mangas

Los filtros de mangas son los elementos encargados de la recuperación de productos en polvo del gas que los contiene. Algunas veces estos productos a recuperar son partículas contaminantes mientras que en otros casos se ha de recuperar el material producido, que es trasladado de un punto a otro por medio neumático (Figura 2.9).

Los filtros de mangas son uno de los equipos más representativos de la separación sólido-gas mediante un medio poroso. Aparecen en todos aquellos procesos en los que sea necesaria la eliminación de partículas sólidas de una corriente gaseosa, haciéndolas pasar a través de un tejido.

En ocasiones el condicionante de la separación será un factor de seguridad, ya que algunos productos en estado de partículas muy finas forman mezclas explosivas con el aire.

Los filtros de mangas son capaces de recoger altas cargas de partículas resultantes de procesos industriales en muy diversos sectores, tales como: cemento, yeso, cerámica, caucho, química, petroquímica, siderúrgica, automovilística, cal, minera, amianto, hierro, coque, silicatos, almidón, carbón, anilina, fibras de granos, etc.

El funcionamiento del equipo consiste en provocar el paso del aire con partículas en suspensión mediante un ventilador, a través de un tejido en forma de bolsa o cilindro, de

esa forma las partículas quedan retenidas entre los minúsculos poros que no dejan pasar el producto, pero si el gas.



(Figura 2.9). Filtro de mangas. Fuente: (Grup, 2021).

A mayor acumulación de producto en el filtro habrá mayor pérdida de carga en el sistema. Para evitar disminuciones en el caudal se procede a efectuar una limpieza periódica de las magas por medio de aire comprimido a alta presión que se inyecta en la parte limpia de las mangas.

Los filtros de mangas constan de una serie de bolsas con forma de mangas, normalmente de fibra sintética o natural, colocadas en unas jaulas que les dan consistencia. El gas sucio, al entrar al equipo generalmente por la parte inferior, fluye por filtro con tendencia a salir por las mangas, obligando al producto a quedarse en la tela filtrante. En la parte inferior del filtro se encuentra una tolva que recoge el producto decantado.

2.4.2.3 Separador dinámico

El separador es la solución aportada por la industria a la separación de partículas menores de $150\ \mu\text{m}$. Dentro de los separadores tenemos dos tipos de sistemas, los estáticos y los dinámicos (Figura 2.10).

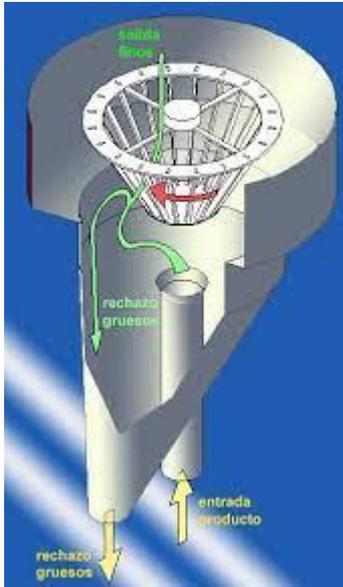


Figura 2.10. Separador dinámico. Fuente: (Hermanos, 2021).

Los estáticos corresponden a los ciclones. Estos para funcionar necesitan trabajar con un ventilador a depresión.

El funcionamiento consiste en que junto al aire de succión se desplaza el material hasta el ciclón. En el ciclón el producto entra de forma tangencial y debido a su forma cónica se acelera. Gracias a esa aceleración el producto más grueso es desplazado por efecto centrífugo hacia el exterior de la carcasa y decantado en la parte inferior del ciclón. El producto más fino no obtiene la suficiente energía para poder vencer la fuerza de succión, por lo que es arrastrado con el aire. Generalmente los ciclones se utilizan para separar productos gruesos con poca resistencia de finos.

2.5 Selección de alternativas

Ventajas del proceso de hidratación de la cal viva

- Al ser la cal viva es un producto inestable debido a su naturaleza, al momento de entrar en contacto con el ambiente es muy higroscópico, lo cual quiere decir que absorbe la humedad del ambiente y con el CO_2 presente se produce el fenómeno de carbonatación por medio del cual, la cal viva busca llegar a su estado natural como Carbonato de calcio (CaCO_3), mientras que la cal hidratada es un producto más

estable (Horcalsa, 2021). Por esta razón se aprovechan las condiciones de la cal viva para establecer un proceso de hidratado.

- Al tener la cal hidratada, agua añadida molecularmente, esto hace que, en cualquier aplicación industrial o como reactivo de laboratorio sea menos reactiva que la cal viva, lo cual se solventa con la adición de mayor cantidad de cal hidratada al proceso, aunque la efectividad del uso de ambas es bastante similar.
- La cal hidratada es el segundo producto más importante dentro de la industria de la cal (Cimprogetti, 2018).
- El separador centrífugo es un equipo de gran sencillez, capacidad, fácil mantenimiento, elevada eficiencia, su costo de mantenimiento y los productos recolectados comúnmente son útiles y reutilizables (Delgado Trujillo, 2021)
- Los ciclones de pequeño diámetro tienen pequeños radios de curvatura por lo que producen mayores aceleraciones radiales para una misma velocidad tangencial, debido a esto tienen alta eficiencia, pero baja capacidad. Algunas de sus ventajas son el bajo costo de inversión, de mantenimiento, permite la separación en condiciones drásticas de temperatura y presión y puede ser construido de varios materiales (Delgado Trujillo, 2021).
- El molino de bolas (Figura 2.6) es un equipo importante en la industria de molienda y de especial importancia en los procesos de tratamiento de cal debido a su capacidad para moler material de alta dureza, tiene un funcionamiento estable, es fácil de instalar y la capacidad y finura se pueden ajustar a través del ajuste del diámetro de bolas (Scribd, 2020).

Desventajas del proceso de hidratación de la cal viva

- Los ciclones de pequeño diámetro tiene baja capacidad. Una solución a este problema sería instalar un conjunto de pequeños ciclones en paralelo lo que da como resultados en mayor costo en equipamiento. Entre sus principales desventajas se encuentra la baja eficiencia para partículas de tamaño menor que el diámetro de corte, cuando operan en condiciones de bajas cargas de sólido y está sujeto a erosión o ensuciamiento, si los sólidos procesados son abrasivos. La capacidad no afecta este proyecto porque la demanda es en pequeñas cantidades (Delgado Trujillo, 2021).
- El separador centrífugo es poco versátil, ya que no se adapta a cambios en las condiciones de operación, los rangos de pérdidas de presión en el equipo son mayores respecto a otros dispositivos de separación convencionales y no son

recomendados para grandes producciones debido a que son sensibles a cambios de razón de flujo (Sierra Doroteo, 2014).

Ventajas del proceso de micronizado

- Entre las ventajas del filtro de mangas se encuentra la alta eficiencia de filtración (> 99,9 %) y la ocupación de un espacio reducido.
- En el separador dinámico las principales ventajas son ahorro del consumo energético (Firigua Puyo, 2020).

Desventajas del proceso de micronizado

- El molino pendular se emplean para el molido de materias primas hasta durezas de tipo medio (Fernández Neira, 2013).
- Entre las desventajas del filtro de mangas se encuentran las pérdidas de carga (entre 1000 y 1500 Pa), entonces consumo energético más importante del aspirador de humos y riesgo de incendios y explosiones debido a la inflamabilidad del tejido filtrante.
- Entre las desventajas del separador dinámico esta la aparición de desgaste en sus piezas y escaso tiempo para el proceso de dispersión, adicional a la alta presión. Presenta gran consumo energético al presentarse caídas de presión (Firigua Puyo, 2020).

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados se decide seleccionar el proceso de hidratación como la mejor tecnología para los propósitos de esta investigación, pues las desventajas de este proceso no afectan la calidad del producto terminado, requiere menos consumo energético y el ciclo de mantenimiento es más largo.

2.6 Control de impurezas a escala de laboratorio

Se establece un control de impurezas con el objetivo de obtener un producto de mayor calidad la que depende de la materia prima que se procesa ver tabla 2.2:

Tabla 2.2: Clasificación de los tipos de cal (Avalos Miñano, 2016).

Tipo de cal	Altamente Cálcica	Cálcica	Dolomítica
CaO + MgO	90 %	80 %	80 %
MgO	4	6	6
CO ₂ (en planta)	5	5	5
CO ₂ (en mina)	7	7	7
CaO+MgO (libre)	8	8	8
Humedad en planta	3	3	3

Es importante tener en cuenta además entre los criterios de calidad, la granulometría de la materia prima a partir de los tipos de cal (tabla 2.3).

Tabla 2.3. Requisitos granulométricos de los tipos de cal (Avalos Miñano, 2016).

Según AASHTOT (192) (ASSHTO, 2019)	Grado A	Grado B	Grado C
Máximo residuo sobre tamiz #30	2 %	3 %	4 %
Máximo residuo en tamiz #200	12	14	18
Según ITINTEC	Altamente cálcica	Cálcica	Dolomítica
Residuo obtenido sobre tamiz #30	No mayor de 0,5 %		
Residuo obtenido sobre tamiz #200	No mayor de 1,5 %		

La cal que se analiza contiene cierto grado de impurezas que quedan descritas en la tabla 2.4

Tabla 2.4. Impurezas de los tipos de cal (Avalos Miñano, 2016).

Tipo 1 según norma AASHTO T (219) (ASSHTO, 2019)	Tipo 2 según ASTM C (25) (International, 2019)	Según ITINTEC (ITINTEC, 2019)
Determinación de: a) Alcalinidad aparente. b) Alcalinidad total. c) Pérdida por ignic. Sustancias obtenidas a. CaCO b. Ca(OH) ₂	Determinación de: a. Sílice + Resid. Insol. b. M ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) c. CaO d. MgO e. SO ₃ f. CO ₂ g. Humedad h. perdida por ignición Sustancias calculadas a) CaCO ₃ b) Ca(OH) ₂ c) MgCO ₃ d) Mg(OH) ₂ e) CaSO ₄ f) CaO y MgO libres	Determinación de: a. Humedad b. Mat insol + SiO ₂ +Pérdida por ignición. c. CaO d. MgO e. SO ₃ f. CO ₂ Sustancias calculadas a) Ca(OH) ₂ b) MgO y CaO libre c) CaCO ₃ d) CaSO ₄

2.6.1. Parte Experimental

Se pueden realizar los siguientes ensayos para verificar la calidad y las impurezas presentes en la cal (Avalos Miñano, 2016).

2.6.1.1 Método Gravimétrico y Complejo métrico para la determinación de Óxidos de Sílice, Aluminio, Hierro y Calcio (Avalos Miñano, 2016).

- **Equipo**

- ✓ Mufla de 1 150 °C
- ✓ Crisoles de platino
- ✓ Vasos de diferentes medidas
- ✓ Matraces Erlenmeyer
- ✓ Embudos
- ✓ Papel filtro para finos y medios

- ✓ Platos de calefacción (250 °C)
- ✓ Buretas triple vía de 50 mL
- ✓ Pipetas de 50, 20 y 5 mL
- ✓ Frascos de vidrio y plástico
- ✓ pH-metro

- **Reactivos**

- ✓ Acetato de amonio
- ✓ Ácido acético concentrado
- ✓ Ácido calconcarboxílico (indicador)
- ✓ Ácido clorhídrico concentrado
- ✓ Ácido sulfosalísílico (indicador)
- ✓ Amoníaco concentrado
- ✓ Complexon III (Titriplex III, EDTA)
- ✓ Hidróxido de potasio
- ✓ Pirilidazo-2-naftol (PAN indicador)
- ✓ Sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- ✓ Trietanolamina

- **Procedimiento**

- ✓ Lavar y secar bien un crisol de platino y llevar a la mufla a 1 000 °C por 15 minutos
- ✓ Sacar y llevar al desecador hasta obtener peso constante.
- ✓ Añadir 1 g de muestra fundente (0,5 g de Na_2CO_3 + 0,5 g de K_2CO_3) mezclar y homogenizar. Cubrir la muestra con 2 g de mezcla fundente.
- ✓ El crisol con la muestra fundir en el mechero Fischer, luego colocar la tapa de platino e introducir en la mufla a 1 000 °C por 30 minutos.
- ✓ Sacar la muestra, enfriar violentamente en agua fría, la base del crisol, colocar el crisol en un plato ancho de porcelana previamente limpio.
- ✓ Añadir lentamente 1 mL de agua destilada y 10 mL de Ácido clorhídrico concentrado, con ayuda de una varilla de vidrio disgregar los grumos formados o pegados en el crisol.
- ✓ Vaciar la muestra en el plato de porcelana lavando bien el crisol con la menor cantidad posible de agua caliente y seguir disgregando si es necesario los grumos formados.
- ✓ Colocar el plato de porcelana en baño maría y evaporar a sequedad.

- ✓ Disolver con 10 mL de HCl concentrado y 50 mL de agua destilada caliente, tratando de homogenizar la muestra luego poner 10 minutos en baño maría
- ✓ Preparar el filtro, banda blanca para gruesos y un balón aforado de 250 mL. Filtrar cuidadosamente la muestra contenida en el plato de porcelana.
- ✓ El filtrado recoger en el balón, lavando con agua destilada caliente, hasta que el residuo no de reacción de cloruros con AgNO_3 .



Figura 2.11. Tara de la muestra. Fuente:(Avalos Miñano, 2016).



Figura 2.12. Muestras en la mufla. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

- **Residuo: Determinación de Sílice**

- ✓ Colocar en un crisol de platino (tarado y pesado) – Calentar y quemar cuidadosamente el papel filtro (que no se forme llama) hasta coloración

blanquecina (500 a 600 °C) con la ayuda de un mechero fisher - Calcinar por 30 minutos en una mufla a 1 000 °C - Enfriar en el desecador y pesar

$$\%SiO_2 = (\text{peso crisol} + \text{precipitado calcinado}) - \text{peso crisol vacío} * 100$$

(Ecuación 2.1)



Figura 2.13. Crisol con muestra. (Avalos Miñano, 2016).

- **Determinación de Cationes**

- ✓ Recibir el filtrado obtenido anteriormente
- ✓ Agitar y homogenizar
- ✓ Pipetear para

HIERRO (Fe): 50 mL

ALUMINIO (Al): 50 mL

CALCIO (Ca): 20 mL

MAGNESIO (Mg): 20 MI

2.6.1.2. Determinación de Óxido De Hierro Fe_2O_3 .- Método Complejo métrico (Avalos Miñano, 2016).

- ✓ 50 mL de alícuota de solución preparada.
- ✓ Determinar el pH de 1,5 a 1,7 con solución de amoníaco (controlar con pH-metro).
- ✓ Agregar indicador ácido sulfosalisílico (0,5 a 0,8 g) hasta coloración violeta intenso.
- ✓ Calentar ligeramente la solución.
- ✓ Titular con EDTA (hasta cambio de coloración de violeta a amarillo).

$$\%FeO_3 = 1,996 * ml\ EDTA\ consumidos * factor\ EDTA \quad (\text{Ecuación 2.2})$$



Figura 2.14. Preparado de muestra para titulación. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

2.6.1.3. Determinación de Óxido De Aluminio Al_2O_3 .- Método Complejo métrico (Avalos Miñano, 2016).

- ✓ 50 ml de solución preparada.
- ✓ Determinar pH 3 con buffer de acetato de amonio.
- ✓ Agregar 10 ml de EDTA (en caso de crudo clinker y cemento) y 15 ml en caso de arcillas arenosas.
- ✓ Calentar hasta ebullición por 5 minutos.
- ✓ Agregar 5 a 6 gotas de indicador PAN.
- ✓ Titular con solución de Sulfato de Cobre ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) 0,05 M hasta cambio de coloración de amarillo a azul intenso.

$$\%Al_2O_3 = 1,27 * [(ml\ EDTA\ total - ml\ EDTA\ Fe_2O_3) * factor\ EDTA - (ml\ CuSO_4 * f\ CuSO_4)] \quad (\text{Ecuación 2.3})$$



Figura 2.15. Titulación de la muestra. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

2.6.1.4. Determinación de Óxido de Calcio CaO: Método Complejo métrico (Avalos Miñano, 2016).

- ✓ En un Erlenmeyer agregar 20 ml de hidróxido de potasio al 20 % (controlar que el pH. sea menor a 12).
- ✓ Agregar 5 ml de solución de trietanolamina al 20 %.
- ✓ De la solución obtenida en el filtrado, tomar una alícuota de 20 ml.
- ✓ Agregar pocos mg de indicador ácido calconcarboxílico.
- ✓ Titular con EDTA 0,05 M hasta cambio de coloración de violeta a azul.
- ✓ El viraje también se lo puede realizar utilizando como indicador calceína, hasta cambio de coloración de anaranjado a rosado.

$$\%CaO = 3,505 * ml EDTA * factor EDTA \quad \text{(Ecuación 2.4)}$$



Figura 2.16. Indicador de calceína. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

2.6.1.5. Determinación de Óxido de Magnesio MgO: Método Complejo métrico (Avalos Miñano, 2016).

- ✓ Agregar con una probeta 25 ml de cloruro de amonio y 10 ml de trietanolamina al 10 %.
- ✓ Adicionar una pequeña cantidad de ácido ascórbico (0.5 mg) y agitar.
- ✓ 20 ml de alícuota de solución preparada.
- ✓ Pocos mg de indicador thymophtalexon.
- ✓ Titular con EDTA hasta viraje con cambio de coloración de azul a café claro.

$$\%MgO = 2,52 * (ml EDTA - ml CaO) * factor EDTA \quad (\text{Ecuación 2.5})$$



Figura 2.17. Medición de los insumos. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

2.6.1.6. Determinación de las Pérdidas por Calcinación (Avalos Miñano, 2016).

- **Equipo Necesario**

- ✓ Balanza analítica
- ✓ Mufla
- ✓ Crisol
- ✓ Desecador
- ✓ Espátula
- ✓ Pincel
- ✓ Pinza de metal

- **Procedimiento**

- ✓ Pesar 1 g de muestra sobre el crisol tarado y pesado.
- ✓ Calcinar por treinta minutos en la mufla a 1 000 °C.
- ✓ Sacar, dejar enfriar el crisol en el desecador por 20 minutos
- ✓ Pesar el crisol.
- ✓ Calcular el porcentaje de pérdida por calcinación.

- **Cálculos**

$$\%PPC = \frac{(\text{peso crisol más muestra} - \text{peso crisol más muestra calcinada}) * 100}{100} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

2.6.1.7. Método para Determinación de Carbonatos de Calcio Totales a Través de la Titulación de la Piedra Caliza (Avalos Miñano, 2016).

- **Reactivos**

- ✓ Ácido clorhídrico 0,5 N
- ✓ Hidróxido de sodio 0,5 N
- ✓ Agua destilada
- ✓ Fenolftaleína

- **Equipos**

- ✓ Bureta
- ✓ Pinzas
- ✓ Erlenmeyer

- **Titulación**

- ✓ Pesar 1 gr de muestra.
- ✓ Añadir 20 ml de Ácido clorhídrico 0,5 N.
- ✓ Hacer hervir la solución.
- ✓ Enfriar con agua destilada.
- ✓ Enfriar con agua destilada.
- ✓ Añadir unas gotas de fenolftaleína y titular con hidróxido de sodio 0,5 N.

2.6.1.8. Método de Ensayo para Determinar las Propiedades de Plasticidad (Avalos Miñano, 2016).

- **Equipo**

- ✓ Aparato de Vicat Modificado
- ✓ Molde
- ✓ Placa base

- **Procedimiento de mezclado**

- ✓ Añadir 300 g de muestra a una cantidad medida de agua contenida dentro del tazón de mezclado.
- ✓ Mezclar manualmente 10 s con una espátula rígida. Cubrir la pasta para evitar la evaporación del agua.
- ✓ Insertar la paleta en el equipo y mezclar la pasta por 30 con la mezcladora mecánica
- ✓ Remezclar por 30 segundos y determinar la consistencia. Si la penetración es menor que 15 mm retornar toda la pasta al recipiente, añadir agua y mezclar por 15 s. Si la penetración es mayor que 25 mm, repetir el ensayo. Para determinar la consistencia, colocar el molde con su base mayor descansando sobre la placa base y llenarlo con pasta de muestra. Luego enrazar la pasta nivelándola con la espátula. Centrar el molde con la pasta que descansa sobre la placa de vidrio, bajo la varilla del aparato modificado de Vicat. Colocar la varilla del aparato en contacto con la pasta y liberar la varilla. Registrar la lectura final 30 s después de que la varilla fue liberada.

$$CN = \frac{V}{M} * 100 \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

CN = Consistencia normal

V = volumen utilizado en la muestra

m = masa de la muestra

2.6.1.9. Método para la Determinación de la Densidad por Medio del Frasco de Le Chatelier (Avalos Miñano, 2016).

- **Equipo**
 - ✓ Frasco de Le Chatelier
- **Reactivos.**
 - ✓ Alcohol etílico.
- **Procedimiento.**
 - ✓ Llenar el frasco con alcohol etílico hasta el punto en el cuello situado entre las marcas 0 cm³ y 1 cm³. Secar el interior del frasco por encima del nivel del líquido, si es necesario, después del vertido. Registrar la primera lectura después de haber sumergido el frasco en un baño de agua.

- ✓ Introducir aproximadamente 50 g de muestra. Evitar salpicaduras y observar que la muestra no se adhiera al interior del frasco sobre el líquido. Se puede utilizar un aparato de vibración para acelerar la introducción de la muestra en el frasco y para evitar que la muestra se pegue al frasco.
- ✓ Después de que se ha introducido toda la muestra, colocar el tapón en el frasco y rodar el frasco en una posición inclinada, o girar suavemente describiendo un círculo para liberar el aire de la muestra. Si se añade una cantidad adecuada de muestra, el nivel del líquido debe estar en su posición final en algún punto en la serie superior de graduaciones.
- ✓ Tomar la lectura final después de sumergir el frasco en el baño de agua.
- ✓ Calcular la densidad mediante:

$$\rho = \frac{V_2 - V_1}{m_2 - m_1} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

ρ = densidad en g/cm³

V_2 = Volumen final

V_1 = Volumen inicial

m_1 = masa del frasco con el alcohol

m_2 = masa del frasco con la muestra

2.6.1.10. Método De Ensayo Para El Tamizado (Avalos Miñano, 2016).

- **Equipos.**

- ✓ Tamices que deben cumplir con la NTE INEN 154 (INEN, 2013). Preferiblemente los tamices deben tener una profundidad de 10 cm

- **Análisis por tamizado de la muestra.**

- ✓ Seleccionar los tamices deseados y acoplarlos colocando el de mayor tamaño de malla en la parte superior.



Figura 2.18. Selección de tamices. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

- ✓ Pesar una muestra de 100 g del material a ser ensayado y colocarla sobre el tamiz superior.



Figura 2.19. Ensayado de muestras. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

- ✓ Realizar la operación de tamizado por medio de un movimiento lateral y vertical del tamiz acompañado de agitación para mantener la muestra en movimiento continuo sobre la malla del tamiz.
- ✓ Continuar el tamizado hasta que la cantidad que pase durante un minuto cualquier tamiz, no sea mayor al 1 % de residuo. Si se emplea el tamizado mecánico, el equipo debe ser capaz de impartir el tipo de

agitación descrito en el tamizado manual. Mantener la agitación por 15 minutos.



Figura 2.20. Tamizado de muestras. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

- ✓ Pesar el residuo retenido en cada tamiz.



Figura 2.21. Pesado del residuo. Fuente: (Avalos Miñano, 2016).

CONCLUSIONES PARCIALES CAPÍTULO II:

- La metodología propuesta permite definir los alcances de la investigación.
- Para el proceso de obtención de óxido de calcio a partir de la cal viva se analizaron dos propuestas tecnológicas: proceso de hidratación y circuito de micronizado. El proceso de hidratación resultó ser el que mejor se ajusta a los propósitos de la investigación.
- Se caracterizó el proceso de hidratación de cal viva y su tecnología permitiendo encontrar entre sus regularidades que necesita pocos equipos tecnológicos, ocupa un área relativamente pequeña, requiere menor consumo de energía y ciclos de mantenimiento más largos, hay disponibilidad de materia prima; lo que permite su aplicación para los fines de esta investigación.

Capítulo III

CAPÍTULO 3: PRESENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados relacionados con los cálculos de balance de masa y de energía de la tecnología propuesta (Hidratación de cal viva) para la producción de óxido de calcio a partir de cal viva en la Empresa Química de Cienfuegos

“EQUIFA”. Además, se presentan las propuestas de los equipos del proceso tecnológico seleccionado y se realiza el análisis técnico económico.

3.1 Resultado de los niveles de operación estimado.

Los niveles de producción esperados que se plantean para el esquema tecnológico propuesto son los siguientes:

- Se estima que la capacidad de producción es de 420 kg/semana lo que equivale a 60 kg/día.
- Se proponen una hidratadora de una capacidad de 66 kg/día.

3.2 Propuesta de equipamiento

Equipamiento:

- Hidratadora.
- Separador centrífugo de alta eficiencia.
- Ciclón.
- Molino de bolas.

3.3 Balance de materiales en la etapa de hidratación.

A continuación, se plantean los balances de masa total del proceso de hidratación de cal viva, para lo cual se presenta en la figura, que representa el diagrama de bloque del proceso tecnológico:

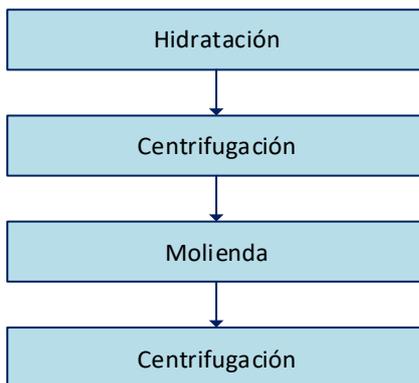


Figura 3.1. Diagrama de bloque proceso tecnológico. Fuente: Elaboración propia. Etapas del Proceso (Avalos Miñano, 2016).

La etapa de hidratación de cal viva de la propuesta tecnológica está compuesta por una hidratadora, separador, ciclón y un molino de bolas.

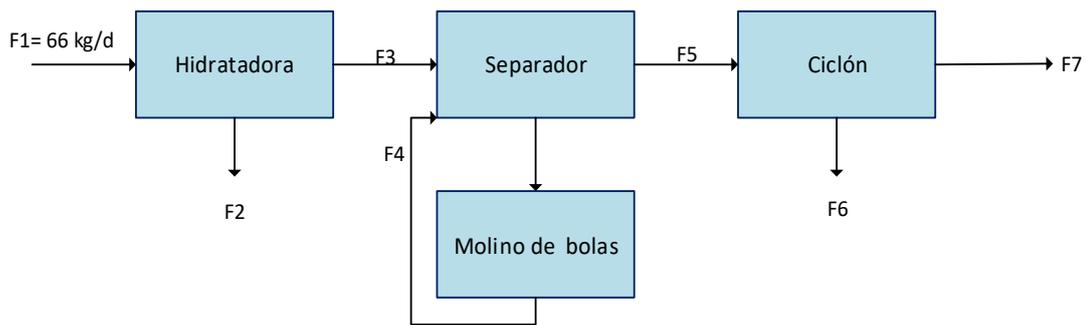


Figura 3.2. Diagrama de flujo de proceso de hidratación de cal. Fuente: Elaboración propia.

Siendo

- F1: Corriente de entrada de cal a la hidratadora. $F1 = 66 \text{ kg/d}$
- F2: Impurezas. Se toma 10% de la corriente de entrada (F1) por diseño del equipo.
- F3: Corriente de salida de la hidratadora.
- F4: Rechazo proveniente del separador que pasa por un molino de bolas y se recircula en el separador
- F5: Corriente de salida del separador
- F6: Rechazo del ciclón. Se toma el 10 % por el diseño del equipo
- F7: Corriente de salida del ciclón y producto obtenido del proceso de hidratación

Se plantea un balance total, se tiene en cuenta las diferentes corrientes del proceso para la etapa de hidratación y queda planteado de la siguiente manera:

Ecuaciones restrictivas

$$F2 = 0,10 * F1 \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

$$F6 = 0,10 * F5 \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

3.3.1 Balance en la hidratadora

Se despeja la ecuación 3.1 sustituyendo F1 se obtiene de impurezas:

$$F2 = 6,6 \text{ kg/d}$$

Se obtiene de esta manera la corriente de F3 por la ecuación 3.3

$$F1 = F2 + F3 \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Se despeja la ecuación y se obtiene:

$$F3 = 59,4 \text{ kg/d}$$

3.3.2 Balance de materiales en el separador centrífugo.

No ocurren pérdidas en el proceso porque el rechazo proveniente del separador centrífugo se recircula en el proceso por lo tanto:

$$F_3 = F_5 = 59,4 \text{ kg/d}$$

3.3.3 Balance de materiales en el ciclón

Se obtiene el rechazo proveniente del ciclón por la ecuación 3.2

$$F_6 = 5,94 \text{ kg/d}$$

Se obtiene de esta manera la corriente de F7 por la ecuación 3.4

$$F_5 = F_6 + F_7 \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Se despeja la ecuación y se obtiene:

$$F_3 = 53,46 \text{ kg/d}$$

3.4 Energía necesaria en la etapa de hidratación. Molino de bolas

Para el cálculo de la potencia requerida por el molino de bolas se debe conocer la granulometría de entrada y la granulometría de salida, es decir, el factor de reducción.

Teniendo en cuenta los siguientes datos:

- $W_i = 11.1 \text{ kW/h*t}$
- $D_{80} = 40 \text{ mm}$
- $d_{80} = 5 \text{ mm}$

Siendo:

- W_i = índice de ``Bond Work'', trabajo específico de molienda.
- D_{80} = Tamaño en micrones por debajo del cual el 80 % de la alimentación inicial permanece.
- d_{80} = Tamaño en micrones por debajo del cual el 80 % del producto permanece.

Por lo tanto a partir de la siguiente ecuación para calcular la potencia del molino de bolas:

$$P = 10 * W_i * \left(\frac{1}{d_{80}} - \frac{1}{D_{80}} \right) \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Tendremos:

$$P = 10 * 11,1 * \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{40} \right) = 19,42 \text{ kW}$$

Se estima el 10 % de los equipos obteniéndose 1,942 kW

3.5 Cálculo económico

El análisis económico se establece como base de cálculo en USD (United State Dollar)

3.5.1 Costo – Beneficio

Se suministran 66 kg/d de materia prima (cal viva) por una semana.

Precio de cal viva \$70 USD.

Precio de óxido de calcio \$100 USD.

Tabla 3.1 Costo del óxido de calcio y de cal. Fuente: Elaboración propia. Excel

	CaO	Cal
costo (USD)	37 800	36 000

Obteniéndose un beneficio de \$1 800 USD.

3.5.2 Índice de costos

La mayoría de la información disponible para ser usada en un diseño preliminar o estimado inicial de costos, está basado en la experiencia anterior acumulada al respecto. Dado que los precios cambian considerablemente en el tiempo, debido fundamentalmente a la variación en las condiciones económicas existentes, es que se hace necesario la utilización de índices de costo estimados, para tener en cuenta estas fluctuaciones en cuanto a costos de plantas, equipos, etc., se refiere. Un índice de costo es un valor para un punto dado en el tiempo, que muestra el costo relativo de un producto, tomando como referencia un cierto tiempo base.

Así, si el costo de un equipo en un momento dado ya pasado se conoce, puede estimarse su costo equivalente para un tiempo presente o futuro, multiplicando el costo original del recurso por la relación entre el índice de costo en el tiempo presente o futuro y el índice de costo original (Ecuación 3.5). Lo anterior pudiera representarse en la tabla 3.2.

$$\text{Costo presente} = \text{Costo Original} * \left(\frac{\text{Índice actual}}{\text{Índice original}} \right) \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

$$\text{Índice de costo actual} = 541,7 \quad (2016) \text{ (Scribd, 2017)}$$

$$\text{Índice de costo original} = 540,8 \quad (2010) \text{ (Scribd, 2017)}$$

Tabla 3.2 Estimación de costo de equipo para el tiempo presente. Fuente: Elaboración propia. Excel

Equipos	Costos USD	Año	No. de equipos	Costo actual (USD)
Hidratadora	130 000	2021	1	13 0216,34
Separador	14 000	2021	1	14 023,29
Ciclón	2 000	2021	1	2 003,32
Molino de bolas	9 000	2021	1	9 014,97
Total				155 257,95

3.5.3 Estimación de costo de equipos

Cuando es necesario estimar el costo de un equipo para una capacidad o tamaño dado y la información necesaria al respecto disponible para este mismo equipo pero de diferente magnitud se conoce, es posible determinar el costo de adquisición deseado, usando los índices de escalado y aplicando la denominada regla del factor 0,6 o fórmula de Williams (Ecuación 3.6). Lo anterior puede expresarse en la tabla 3.3

$$C_2 = C_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^n \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Tabla 3.3 Estimación de costo de equipos. Fuente: Elaboración propia. Excel.

Equipo	costo (C1) (USD)	capacidad (Q1) (kg/d)	capacidad requerida (Q2) (kg/d)	n	costo estimado (C2) (USD)
Hidratadora	130 000	240 000	66	0,6	949,60
Separador	14 000	2 160 000	66	0,6	27,36
Ciclón	2 000	36 000	60	0,6	43,06
Molino de bolas	9 000	144 000	6	0,6	21,18
Total					1 041,22

3.5.4 Costo total de inversión

Costos directos

Los costos directos son aquellos que se asignan de forma inequívoca y directa al objeto de coste. Normalmente están directamente relacionados con la obtención del producto o servicio entorno al cual gira el desempeño de la actividad. En general, los costes directos tienen carácter variable y no fijo (tabla 3.4).

Tabla 3.4. Costos directos de la sección de hidratación de la cal viva. Fuente: (Peters, Timmerhaus, & West, 2003).

Factores	Fracción utilizada del equipamiento	Costos
Compra de equipamiento		1 041,00
Fracción de entrega	0,90	936,90
Subtotal: equipo entregado		1 041,90
Instalación de equipos adquiridos	0,45	468,85
Instrumentación y controles (instalados)	0,18	187,54
Tubería (instalada)	0,16	166,70
Sistemas eléctricos (instalados)	0,10	104,19
Edificios (servicios incluidos)	0,25	260,47
Mejoras en el patio	0,15	156,28
Instalaciones de servicio (instaladas)	0,40	416,76
<i>Costos directos totales</i>	<i>1,69</i>	<i>2 802,71</i>

Costos indirectos

Los costos indirectos afectan el proceso productivo en general del producto, por lo que no se puede asignar directamente a un solo producto sin usar un criterio de asignación. Es decir no lo podemos asignar únicamente, a una unidad de referencia concreta. Sino a criterios más generales, que dependen en cierta manera del tipo de producción (tabla 3.5).

Tabla 3.5. Costos indirectos de la sección de hidratación de la cal viva. Fuente: (Peters et al., 2003).

Factores	Fracción utilizada del equipamiento	Costos
Ingeniería y supervisión	0,80	833,52
Gastos de construcción	0,39	406,34
Gastos legales	0,04	41,67
Honorario del contratista	0,17	177,12
Contingencia	0,70	729,33
<i>Costos indirectos totales</i>	<i>2,10</i>	<i>2 187,99</i>

Costo del capital de inversión

El costo del capital es una tasa de rendimiento esperando que se determina para evaluar una inversión, la cual depende íntimamente de la naturaleza de los flujos de la caja de negocios, principalmente la volatilidad de los mismos.

Tabla 3.6 Costos de Inversión de capital total. Fuente: (Peters et al., 2003).

Factores	Fracción utilizada del equipamiento	Costos
Inversión de capital fijo (FCI)		4 990,701
Capital de trabajo (WC)	0,70	20,838
<i>Inversión de capital total (TCI)</i>		<i>5 011,539</i>

El total de capital de inversión es de \$5 000 US aproximadamente

Costos de Operación

Los costos de operación son los gastos que están relacionados con la operación de un negocio, o para el funcionamiento de un dispositivo, componente, equipo o instalación. Ellos son el costo de los recursos utilizados por una organización solo para mantener su existencia.

Tabla 3.7. Costos de Operación. Fuente: (Peters et al., 2003).

Costo de fabricación		
Costos Directos		
Componentes	%	Costo (USD)
Materia prima (50 % de total MP)	0,5	18 000,00
Mano de obra		3 528,00
Supervisión	0,15	2 500,00
Requerimientos	0,01	10,41
Mantenimiento y reparación (2 % CFI)	0,3	10 800,00
Suministro Agua	0,1	104,12
Electricidad	0,5	520,61
laboratorio	0,01	10,41
CD	1,57	35 473,56
Cargos Fijos		
Componentes	%	Costo (USD)
Depreciación	0,1	499,07
Impuestos	0,01	49,91
Seguros	0,004	19,96
CF	0,11	568,94
Costos Indirectos		
Otros costos	0,05	52,06
Costos de Operación		
		36 094,56

3.5.6 Indicadores dinámicos de rentabilidad

La determinación de los indicadores dinámicos de rentabilidad: VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa de Rendimiento Interna) y PRD (Plazo de Recuperación al Descontado) se realiza para valorar económicamente la inversión de la planta (tabla 3.8). El cálculo de estos indicadores se puede desarrollar con la ayuda de Microsoft Excel, en el cual se programan los datos previos para calcular el VAN y la TIR,

determinándose estos con la ayuda de funciones financieras. Se toma una tasa de interés de un 10 %.

Valor actual neto (VAN): Es uno de los indicadores financieros para valorar y determinar la rentabilidad de un proyecto de inversión, más conocidos y utilizados. Si el resultado de esta operación es positivo, es decir, si refleja ganancia se puede decir que el proyecto es viable.

De esta manera se puede evaluar desde el inicio y con proyección a futuro la viabilidad de su proyecto y los resultados de su inversión. El VAN permite conocer la posible rentabilidad a través de una fórmula matemática.

El dinero disminuye su valor real con el paso del tiempo, a una tasa aproximadamente igual a nivel de inflación, esto implica que deben ser analizados los métodos que tienen en cuenta el cambio del valor con el tiempo.

El valor del dinero varía a través del tiempo mediante Ecuación 3.7:

$$P_n = P_i(1 + tg)^n / (1 + ti)^n \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Siendo:

- P_n – Capital dentro de un tiempo futuro.
- P_i – Capital inicial o actual.
- Tg – tasa de ganancia
- ti – tasa de descuento.
- n – número de periodos (años).

El VAN es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial.

$$VAN = -P_i + FNE_1/(1 + ti)^1 + FNE_2/(1 + ti)^2 + FNE_3/(1 + ti)^3 + FNE_4/(1 + ti)^4 + FNE_5/(1 + ti)^5. \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Siendo:

- FNE – Flujo neto efectivo.

Los criterios de aceptación de evaluación son: si $VAN \geq 0$, se acepta el proyecto; si $VPN < 0$, se rechaza.

Como puede observarse en la fórmula el valor del VAN, es inversamente proporcional al valor de ti de modo que si se pide un gran rendimiento a la inversión (es decir, si la

tasa mínima aceptable es muy alta), el VAN puede volverse negativo, y en ese caso se rechazaría el proyecto.

El resultado de VAN es positivo ($VAN > 0$) lo que refleja la ganancia del proyecto o sea se puede asumir que el proyecto será rentable (Tabla 3.8).

Tasa interna de rendimiento (TIR): Es uno de los métodos de evaluación de proyectos de inversión más recomendables se utiliza frecuentemente para analizar la viabilidad de un proyecto y determinar la tasa de beneficio o rentabilidad que se puede obtener de dicha inversión. Estrechamente ligado al VAN, el TIR también es definido como el valor de la tasa de descuento que iguala el van a cero, para un determinado proyecto de inversión. Su resultado viene expresado en valor porcentual.

Es sumamente confiable cuando la empresa quiere determinar la rentabilidad y viabilidad de un proyecto de inversión. El TIR utiliza el flujo de caja neto proyectado y el monto de la inversión del proyecto. En conclusión el TIR es el porcentaje de beneficio o pérdida que se puede obtener de una inversión.

El TIR es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial, o sea el VPN es igual cero.

$$Pi = FNE_1/(1 + ti)^1 + FNE_2/(1 + ti)^2 + FNE_3/(1 + ti)^3 + FNE_4/(1 + ti)^4 + FNE(1 + ti)^5. \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

Si el $TIR > r$ entonces el proyecto será viable y puede ser aprobado.

Siendo

r – costo de oportunidad

El TIR y el VAN puede ser calculado mediante técnicas computacionales, por ejemplo con el EXCEL.

Aproximadamente una TIR alrededor de 35 % sería más que correcta. El proyecto da como resultado una $TIR = 34,08 \%$ (tabla 3.8) por lo que se puede afirmar que es viable.

Período de recuperación (PRD): Es cuanto tiempo le toma recuperar la inversión.

El Período de recuperación = 3,78 (tabla 3.8).

Para reflejarlo en días, lugar de fracciones de año se multiplicará estas fracciones por los 365 días del año $78 * 365 = 28\ 470$, por tanto el período de recuperación será de 3 años y 284 días.

Tasa de rendimiento actualizada (RVAN): Es la relación de beneficio/inversión o relación de beneficio/costo

$$RVAN = \frac{VAN}{C_0} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Siendo

- C_0 – Inversión inicial.
- VAN – Valor actual neto.

Si el $RVAN > 0$ se puede afirmar que el proyecto es viable (tabla 3.8).

Tabla 3.8. Indicadores dinámicos de rentabilidad: VAN, TIR y PRD. Fuente: (Peters et al., 2003)

INDICADORES ECONÓMICOS							
TIR	34,08 %		Período de recuperación	3,78 años			
MP	al %		Costo Inv. Act. en: MP				
VAN:	5 509,3	10,00	RVAN:	1,10	5 000,0	<= al	10,0 %
VAN:	5 045,6	11,00	RVAN:	1,01	5 000,0	<= al	11,0 %
VAN:	4 616,4	12,00	RVAN:	0,92	5 000,0	<= al	12,0 %
VAN:	4 218,8	13,00	RVAN:	0,84	5 000,0	<= al	13,0 %
VAN:	3 850,0	14,00	RVAN:	0,77	5 000,0	<= al	14,0 %

El **análisis de sensibilidad** es una herramienta de gestión que permite a las organizaciones predecir los resultados de un proyecto, ayudando a comprender las incertidumbres, las limitaciones y los alcances de un modelo de decisión. El resultado ratifica que aunque suba la tasa de interés bancaria el VAN y el RVAN siguen siendo positivos por lo que el proyecto es viable.

CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO III:

Se realizaron los cálculos según las metodologías descritas en el capítulo II y los resultados fueron los siguientes:

- Los cálculos económicos indican un beneficio de inversión de \$ 1 800 USD.
- La inversión de capital total es de \$ 5 000 USD.
- El análisis técnico económico arrojó que

- El resultado de VAN es positivo ($VAN > 0$) lo que refleja la ganancia del proyecto o sea se puede asumir que el proyecto será rentable.
- la inversión es rentable en 3 años y 284 días.
- El proyecto da como resultado una TIR = 34,08 % por lo que se puede afirmar que la inversión es viable.
- El $RVAN > 0$ se puede afirmar que el proyecto es viable.

Conclusiones

CONCLUSIONES

1. Existen suficientes elementos científico que fundamentan la investigación planteada.
2. Un sistema de hidratado y molienda es adecuado, viable y conveniente para el proceso tecnológico propuesto, debido a la poca complejidad tecnológica en cuanto a cantidad y diversidad de equipos del proceso
3. El esquema tecnológico propuesto es adecuado a los propósitos de la investigación, de ahí que la producción estimada sea de 420 kg/semana satisfaciendo de esta manera la demanda del MINED
4. El análisis económico arrojó valores del VAN y el TIR que ratifican la factibilidad de la inversión. El período de recuperación de la inversión es de 3 años y 284 días lo que ratifica que la inversión es factible.

Recomendaciones

RECOMENDACIONES

1. Continuar la investigación atendiendo al diseño de los equipos, la condiciones ambientales y sociales
2. Poner a disposición de la Empresa Química de Cienfuegos, los resultados de esta investigación.
3. Socializar los resultados obtenidos en diferentes espacios académicos para difundir el conocimiento logrado en la dirección de trabajo que se asume en la presente investigación.

Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alibaba. (2021a). Cal hidratada separador de polvo para la clasificación de material en 200 a 600 de malla. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/hydrated-lime-powder-separator-for-classifying-material-into-200-to-600-mesh-1600135057671.html>

Alibaba. (2021b). Industrial separador ciclón colector de polvo de carbón, polvo de Lima. https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-cyclone-separator-dust-collector-for-coal-lime-powder-1600068683869.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.4c8e1810m5sTDU&s=p

Alibaba. (2021c). Máquina hidratante de cal para producir $\text{Ca}(\text{OH})_2$ polvos de hasta 600 de malla. https://spanish.alibaba.com/product-detail/lime-hydrator-machine-to-produce-ca-oh-2-powder-up-to-600-mesh-62471448665.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.173d1c40iQb6Oi

- Alibaba. (2021d). Molino de bolas de molienda en seco para Cal/carbonato de calcio, 1500x5700. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/1500-5700-dry-grinding-ball-mill-for-lime-calcium-carbonate-502686955.html>
- ASSHTO. (2019). Standard method of test for fineness of Hydraulic Cement. American Association of State Highway and Transportacion officials
- Avalos Miñano, L. J. (2016). Propuesta de mejora en la producción de cal viva para reducir costos operativos en la empresa Phuyo Yuraq II- Cajamarca. (Tesis de grado), Universidad privada del Norte, Laureate International Universities Trujillo. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10262/Avalos%20Mi%c3%blano%20Luis%20Jos%c3%a9.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro Ruz, F. (1960). El futuro de nuestra Patria tiene que ser necesariamente un futuro de hombres de ciencia Discurso, Granma. https://www.granma.cu/granmad/secciones/fidel_en_1959/fidel_en_1960/art-001.html&ved=2ahUKEwip0_rg3dHzAhWIRDABHS-tC2wQFnoECAcQAQ&usg=AOvVaw1ELsCcgHxr6DA7zQB-yyfF
- Castro Ruz, F. (1964). Ciudad universitaria, Jose Antonio Echeverria. http://www.cuba.cu/gobierno/discursos/1964/esp/f021264e.html&ved=2ahUKEwjLk_Sn39HzAhWuQzABHauIApYQFnoECAsQAQ&usg=AOvVaw1ugmshscb3DLP6-YNtULY
- Cimprogetti. (2018). Hidratadores Multi-Estadio. https://es.cimprogetti.com/html/lime_hydration_esp.htm
- Corathers, L. A. (2015). Mineral Resource of the Month: Lime. (5-11). <https://www.earthmagazine.org/article/mineral-resource-month-lime>
- Culqui Romero, M. A. (2017). Influencia de la calidad de las calizas para la producción de cal viva en la calera La Conga del caserío de sogorón alto distrito de la encañada, cajamarca 2017. (Tesis de grado), Universidad Privada del Norte Cajamarca. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/11358/Culqui%20Romero%20Marco%20Antonio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Delgado Trujillo, J. (2021). Separador centrifugo. <https://es.scribd.com/presentation/139877473/Separador-Centrifugo>
- EQUIFA. (2021). Norma de Empresa Óxido de Calcio Reactivo Químico MED - Proceso Tecnológico (NE 01014-03:2021). Cuba Ministerio de Industrias Grupo Empresarial de la Industria Química.

- Fernández Neira, A. (2013). Caracterización y determinación del proceso para la producción de cal comercial a partir de la piedra caliza (Tesis de Grado), Instituto Superior de Ingeniería de Porto. https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/7584/1/DM_AlexanderNeira_2013_MEGG.pdf (1120914)
- Figueredo Reinaldo, O., & Sifonte Díaz, Y. J. (2019). ¿Cuál es el potencial de la Industria Química cubana?. <http://www.cubadebate.cu/especiales/2019/11/27/cual-es-el-potencial-de-la-industria-quimica-cubana-video/>
- Firigua Puyo, E. J. (2020). Propuesta de diseño de un separador dinámico para obtener cemento referencia ART en Planta Cementos del Oriente en Sogamoso. (Tesis de Grado), Universidad Antonio Nariño. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://186.28.225.13/bitstream/123456789/4653/2/2021EdinsonJairFiriguaPuyo.pdf&ved=2ahUKEwjZoP_GchdH0AhV0SjABHaU-DGIQFnoECAsQAQ&usg=AOvVaw394VEG-Q7m-fESp6QE0C-
- García Capote, E. (1997). Fundamentos de la Ciencia y la Innovación Tecnológica. centro de estudios de historia y organización de la ciencia.
- González Gavilánez, L. I. (2012). Optimización del proceso de combustión para el tratamiento de la caliza en la obtención de cal y derivados de la corporación los nevados. (Tesis de Grado), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2028/1/96T00170.pdf>
- Grup, C. (2021). Filtro de mangas. <https://www.calero-group.com/filtro-de-mangas/>
- Hermanos, G. (2021). Clasificadores dinámicos. <https://www.gruberhermanos.com/images/Catalogos/17-Clasificacion.pdf>
- Horcalsa. (2021). ¿Cuál es la diferencia entre cal viva y cal hidratada?. <https://www.horcalsa.com/blog/cual-es-la-diferencia-entre-cal-viva-y-cal-hidratada/>
- INEN. (2013). Mallas y tamices para ensayo y requisitos (NTE INEN 154). <https://es.scribd.com/document/246515290/154-2>
- International, A. (2019). Métodos de prueba estándar para el análisis químico de piedra caliza, cal viva y cal hidratada(10.1520/c0025-19). <https://www.astm.org/c0025-19.html>
- ITINTEC, N. (2019). Instituto de investigación Tecnología Industrias y de de Normas Técnicas. <https://vlex.com.pe/tags/normas-itintec-2534250>

- López Rua, A. M., & Tamayo Alzate, O. E. (2012). Las prácticas de laboratorio en la enseñanza de las ciencias naturales, *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos*, (8), (145-166). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=134129256008>
- MINED. (2020). Informe sobre las afectaciones del bloqueo al sistema educacional cubano, Ministerio de Educación.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). Plant design and economics for chemical engineers (5).
- Quimica Pima, S. A. (2013). Hoja de seguridad de materiales (NOM-018-STPS-2000). http://www.quimicapima.com/industrial/Oxido_de_calcio_HDS.pdf&ved=2ahUKEwish72puYH0AhURSjABHR2oDCcQFnoECAQQAQ&usg=AOvVaw3sPmCrCRs dNas2xC52Hp1w
- Scribd. (2017). Chemical engineering plant cost index (CEPCI). Economic Indicators. <http://es.scribd.com/document/352561651/CEPCI-June-2017-Issue>
- Scribd. (2020). Trituración de minerales. <http://es.scribd.com/document/404980782/Trituracion-de-Minerales-SEMANA-4-doxc>
- Schianchi, M. (2021). Molinos pendular, Molomax. <http://www.manfredinieschianchi.com/301-01-3ES-molinos-pendular.htm>
- Sierra Doroteo, K. (2014). Diseño y construcción de un separador de flujos para un ciclo de generación geotermoeléctrica (Tesis de Grado), Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5871/Tesis.pdf%3Fsequence%3D2&ved=2ahUKEWj89tuCg9H0AhUhTTABHskxBEkQFnoECAcQAQ&usg=AOvVaw2MKANu3VieFQb9EI2M4mQi>
- SNAP. (2019). Fabricación de cal, Emisiones de proceso. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040614-descarbonatac-fabric-cal_tcm30-429852.pdf
- Soto Lopez, T. (2013). Diseño del Proceso de Elaboración de un Producto para Acabado de Paredes, a Partir del Hidróxido de Calcio Resultante de la Combustión de la Piedra Caliza. (Tesis de Grado). <https://1library.co/document/yj7m792y-diseno-proceso-elaboracion-producto-acabado-hidroxido-resultante-combustion.html>

- Soto Rubio, M. H. (2020). Evaluar la factibilidad técnica, económica y estratégica para comenzar una operación de importación y comercialización de cal y sus diferentes tipos en el mercado minero (Tesis de Maestría), Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/177545/Evaluar-la-factibilidad-tecnica-economica-y-estrategica-para-comenzar-una-operacion-de-importacion-y-comercializacion-de-cal-y-sus-diferentes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Trino Suárez, B. (2004). Química Industrial y procesos industriales. http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16719/procesos.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&ved=2ahUKEwj4_ZaniMDzAhXOTjABHTUFDwUQFnoECAYQAQ&usg=AOvVaw1HksDVOULOoE5XQUkS2ebw
- Velázquez Cobiella, E. E. (2020). Carta Aceptación de reactivos, Demanda MINED: Ministerio de Educación.

Anexos

ANEXOS.

Anexo 1. Valor de la cal en EEUU (USD/ton) (Fuente: (Soto Rubio, 2020))

US\$/ TON Exwork

