DISEÑO DE PROCESO CON CAPACIDAD DEFINIDA, PARA LA PLANTA DE ACIDULACIÓN DE MAGNESIO Y FOSFORITA EN LA EMPRESA PULVERIZAR S.A.

Iveth Zulena Colorado León

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia
2013

DISEÑO DE PROCESO CON CAPACIDAD DEFINIDA, PARA LA PLANTA DE ACIDULACIÓN DE MAGNESIO Y FOSFORITA EN LA EMPRESA PULVERIZAR S.A.

Iveth Zulena Colorado León

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Ingeniería Industrial

Director (a):
Dra. Ing. Diana María Cárdenas Aguirre

Línea de Profundización:
Dirección de Producción y Operaciones

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial
Manizales, Colombia
2013

Por su amor, apoyo y confianza incondicional, por estar ahí siempre y creer en mi…

Porque todo tiene un mejor significado a su lado y porque cada día, por ustedes, por mí, me levantaré pensando en cómo merecer mis metas y compartir con ustedes y la gracias de DIOS, la satisfacción de alcanzarlas.

A mi familia.

Resumen

La capacidad hace parte de las decisiones estratégicas en la dirección de Producción y Operaciones y como tal compromete recursos y soporta a otras decisiones que definen el futuro de la empresa a mediano y largo plazo. Dentro de este trabajo se selecciona los recursos necesarios para un proceso productivo, en torno a la especificación de la capacidad establecida por Pulverizar S.A, para una nueva planta de fertilizantes acidulados, tomando como minerales a tratar, la fosforita y el silicato de magnesio.

Se parte con una caracterización del diseño, evaluando diferentes aspectos con la empresa como las proyecciones de producción, decisiones de localización, requerimientos de producto y proceso, detectando variables que influían en el diseño, como Capacidad de la Maquinaria, Volumen de abastecimiento de las Materia Primas, área ocupada por los equipos, mano de obra, entre otras. Dichas variables se evalúan y definen dentro de la propuesta de diseño.

Para la construcción de la propuesta, se utilizaron herramientas como Diagrama de Flujo, Diagrama Pictórico, Balances de Materia y criterios de diseño. Estas herramientas fueron útiles para identificar las etapas del proceso productivo y su secuencia, la identificación de equipos necesarios y el conocimiento de la cantidad de materias primas y productos a la salida de cada etapa.

En consecuencia se obtiene un proceso de acidulación con capacidad de procesamiento de 200Ton/mes de sulfato de Magnesio y Superfosfato simple,

ubicando el proceso dentro de la planta actual, con una ocupación de espacio de equipos de 84,97 m2, un requerimiento de 4 operarios y 2 máquinas adicionales a las existentes en la planta actual de Pulverizar S.A. y un porcentaje de utilización del 97% y 83% de cada uno de los equipos.

Palabras clave: Diseño de Proceso, Capacidad, Balances de Materia, Diagrama de Flujo, acidulación de Fosforita, acidulación de Silicato de Magnesio.

Abstract

DESIGN PROCESS WITH DEFINED CAPACITY, FOR MAGNESIUM AND ROCK PHOSPHATE PLANT ACIDIFICATION IN PULVERIZAR S.A.

The capacity is one of the strategic decisions in the production and the Operations and as such he compromises resources and supports to other decisions that define the future of the company to medium and long term. Inside this work there are selected the resources necessary for a productive process, concerning the specification of the capacity established for Pulverizar S.A, for a new plant of acidulated fertilizers, taking as minerals to treating, the fosforita and the silicate of magnesium.

It begins with a characterization of the design, evaluating different aspects with the company as the projections of production, decisions of location, requirements of product and process, detecting variables that were influencing the design, as Capacity of the Machinery, Volume of supply, area occupied by the equipments, manpower, among others. The above mentioned variables are evaluated and are calculated inside the design.

For the construction of the design, tools as flow chart, pictorial graph, material balance, and criteria of design were useful to identify the stages of the productive process and your sequence, the identification of necessary equipments and the knowledge of the quantity of raw materials and products to the exit of every stage.

In consequence a process of acidulación is obtained with a processing capacity of 200Ton/mes of magnesium sulfate and Single superphosphate, locating the process inside the current plant, with an occupation of space of equipments of

84,97 m2, one requirement of 4 workers and 2 additional machines to the existing ones in the current plant of Pulverizar S.A. and a percentage of utilization of 97 % and 83 % of each one of the equipments.

Key Words: Design Process, capacity, Material Balance, Flow Diagram, Phosphate acidification, Magnesium Silicate acidification.

Contenido

Contenido

Capítulo 1. Planteamiento del Problema 15
1.1 Justificación.....15
1.2 Objetivos 17

Capítulo 2. Metodología.....19
2.1. Acopio de Información. 20
2.2. Caracterización del diseño.....20
2.3. Definición e identificación de Variables. 20
2.4. Identificación de Herramientas 21
2.5. Construcción de la propuesta de Diseño. 21
2.6. Validación y Análisis de Resultados. 21

Capítulo 3. Marco Teórico 22

Capítulo 4. Características del Diseño.....35

Capítulo 5. Diseño de Proceso.....39

Capítulo 6. Evaluación del Diseño…….....53

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones…….....56

Bibliografía……..58

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama conceptual. Ubicación del tema de estudio dentro de la Maestría en Ingeniería Industrial. Diseño propio. 23
Figura 2. Algunas máquinas Trituradoras y Molinos. Fuente: Vollrath Hopp. Fundamentos de tecnología química 28
Figura 3. Reactor tanque agitado y tubular. Fuente: Curso de química técnica. J. Costa López y otros..... 30
Figura 4. Diagrama Pictórico– Proceso de Obtención de Sulfato de Magnesio. Autoría propia. Elaborado usando el software libre ‘’Día’’. 39
Figura 5. Representación de un sistema confinado. 40
Figura 6. Representación de distribución orientada en flujo o al producto. 51

Lista de tablas

Tabla 1. Requerimiento de Materiales (masa y volumen) según demanda de producción y tipo de mineral a trabajar. 41
Tabla 2. Masa y tiempos de Reacción para la acidulación del silicato de Magnesio. 42
Tabla 3. Masa y tiempos de Producción en el reactor, teniendo en cuenta los tres factores de dimensionamiento. 43
Tabla 4. Datos técnicos equipos de Trituración. 47
Tabla 5. Datos técnicos equipos de Molienda. 47
Tabla 6. Masa y tiempos en la etapa de Trituración y Molienda. 47
Tabla 7. Especificaciones Técnicas Equipos de Granulación. 49
Tabla 8. Espacio Requerido para la instalación de equipos en planta. 52
Tabla 9. Utilización de la maquinaria y el recurso mano de obra del diseño 54
Tabla 10. Horas disponibles de trabajo en el triturador y molinos actuales de Pulverizar S.A. 55

Introducción

La empresa Pulverizar S.A., ubicada en el sector de Maltería de la ciudad de Manizales, ha estado desarrollando un plan de crecimiento como parte del mejoramiento continuo en la atención de las necesidades de minerales pulverizados en las grandes, medianas y pequeñas empresas del territorio Colombiano.

En el nivel estratégico, la empresa ha encontrado la necesidad de realizar el montaje de una nueva planta de acidulación que dé respuesta a una oportunidad de crecimiento, detectada en nuevos productos dentro de la línea de fertilizantes. Debido a esto, la empresa ha determinado que una capacidad de 200 Ton/mes de estos nuevos productos cumple con la demanda pronosticada.

El trabajo aquí presentado, se justifica en la necesidad de definir los recursos necesarios en torno a esta capacidad, y se aplica dentro de la Dirección de Producción y Operaciones, como parte de las decisiones estratégicas en el diseño de un sistema productivo. El abordaje de esta decisión desde una perspectiva técnica y en el marco del desarrollo de una maestría, resulta de gran utilidad para la academia y la empresa, pues se ha plasmado dentro de este trabajo una metodología de designación de recursos a una capacidad de producción definida, adaptable a la realidad de muchas empresas, en la que se combina las políticas, características, requerimientos y demás factores relevantes y únicos en cada organización.

De acuerdo a esto, se planteó como objetivo general el proponer un diseño de proceso con capacidad definida, para la planta de acidulación de magnesio y fosforita en la empresa Pulverizar S.A., de donde para lograr este objetivo principal, se definió como objetivos específicos la caracterización del diseño dentro de la empresa, la identificación de las herramientas requeridas para alcanzar las características del diseño y finalmente, la documentación de la propuesta de diseño.

Capítulo 1. Planteamiento del Problema

Pulverizar S.A. dentro de su plan de crecimiento, ha establecido la necesidad de implementar una planta dedicada a la acidulación de minerales, enfocando su proceso en el tratamiento de los minerales Silicato de Magnesio y Fosforita. A este nivel la empresa requiere un diseño de proceso que le permita visualizar los niveles de capital y de recursos humanos necesarios para evaluar la posibilidad del montaje de la planta.

1.1 Justificación

La capacidad es una de las decisiones estratégicas de mayor importancia en el diseño de un sistema de producción, pues de ella depende tanto el nivel de servicio que se ofrece al mercado como la magnitud de la inversión requerida para su implementación.

Para la empresa PULVERIZAR S.A., el abordaje de esta decisión desde una perspectiva técnica y en el marco del desarrollo de una maestría, resulta de gran utilidad, pues le permite obtener una propuesta analítica, para cuya elaboración se contó con diferentes perspectivas, una suficiente revisión bibliográfica y la utilización de herramientas que no están disponibles en la rutina de la organización.

El principal interés en el desarrollo de esta propuesta, radica en la posibilidad de obtener una metodología apropiada a la realidad de la empresa, que combine las políticas, características, requerimientos y factores relevantes de su entorno, que además se constituirá en un aporte al campo de estudio y servirá de material de

referencia en los cursos de pregrado y posgrado del departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional sede Manizales.

Se aportará en novedad, desde el punto de vista del diseño, pues en el diseño no se aplica una fórmula y se obtiene la solución. Se debe buscar de alguna forma entre caminos distintos, obtener una solución razonablemente buena, y al ser aplicado a un caso específico, significa que el diseño será único y diferente al cumplir con características propias de la empresa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Proponer un diseño de proceso con capacidad definida para la planta de acidulación de magnesio y fosforita en la empresa Pulverizar S.A.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Establecer las características del diseño de proceso de la planta de acidulación en Pulverizar S.A.

- Identificar en la teoría y en el contexto (realidad) las herramientas tecnológicas, metodológicas y potencialidades humanas requeridas para alcanzar las características de diseño planteadas.

- Documentar una alternativa de diseño del sistema de producción que dé respuesta a las características definidas dentro de las restricciones y potencialidades identificadas.

Capítulo 2. Metodología.

El título de maestría para el que se opta por medio de este trabajo, es una maestría del tipo de Profundización en Dirección de la Producción y las Operaciones y por tanto la propuesta de diseño se basa en una investigación aplicada, en la que se buscó comprobar teorías vistas dentro del aula de clases y aplicarlas en el mundo real, específicamente en una empresa de la ciudad de Manizales llamada Pulverizar S.A.

Los recursos y la forma de obtener la información necesaria para la caracterización del problema, se dio a través de entrevistas con la gerencia, el departamento de producción, el departamento de mercadeo y calidad de la empresa, así como de búsquedas de información en la base de datos de la Universidad Nacional y otras universidades, los recursos bibliográficos disponibles en la web, consultas con expertos y finalmente, el tiempo, el cual fue administrado por medio de un cronograma de actividades.

Una vez suministrado a este trabajo la información requerida se procedió con la construcción de la propuesta de diseño, en donde se buscó dar respuesta a los requisitos de capacidad en torno a maquinaria y número de trabajadores de acuerdo a las características establecidas.

De esta manera se puede identificar seis etapas dentro de la metodología, enumeradas y explicadas a continuación:

1. Acopio de Información
2. Caracterización del diseño
3. Definición e Identificación de variables

4. Identificación de herramientas
5. Construcción de la propuesta de diseño
6. Validación y Análisis de resultados

2.1. Acopio de Información.

Para desarrollar esta fase, se realizó una recopilación de la información teórica, en la que se compiló las obras de distintos autores que realizaron aportes sobre los temas que interesan a la propuesta de diseño y de esta manera soportar el mismo en los conocimientos e investigaciones plasmadas a lo largo del tiempo. El desarrollo de esta fase, se muestra dentro del Marco Teórico, capitulo siguiente dentro de este trabajo.

2.2. Caracterización del diseño.

Esta etapa fue constituida a través de distintas visitas realizadas a la empresa en donde se pudo detectar el carácter propio o específico del diseño y de esta manera se pudo establecer las necesidades concretas de la empresa, sus proyecciones de producción y su expectativa de capacidad para la nueva planta, conocer sus estudios de demanda, las decisiones previas de localización, los requerimientos tecnológicos de producto y proceso, etc

2.3. Definición e identificación de Variables.

Posterior a las inspecciones realizadas en la empresa, se pudo conocer que variables afectaban el proceso, analizando cada una de estas y trabajando su influencia sobre el diseño. Las variables, como podrá notarse más adelante, se

enfocaron en el entorno y el medio interno de la empresa, dejando como constante la capacidad definida de ante mano por la Gerencia de 200Ton/mes.

2.4. Identificación de Herramientas

La identificación de las tecnologías adecuadas y la distribución de las máquinas dentro de la planta juegan un papel importante dentro del diseño. Para definir adecuadamente esto, se utilizaron diagramas de flujo, balances de materia y la solución de ecuaciones, de manera que a medida que se desarrollaba el diseño se tomaban decisiones con respecto a la configuración del mismo.

2.5. Construcción de la propuesta de Diseño.

En esta etapa se consolida la información obtenida y se da respuesta a cada una de las variables detectadas, dejando como resultado un diseño de proceso para la planta de acidulación de Pulverizar S.A.

2.6. Validación y Análisis de Resultados.

Para realizar la validación del diseño se vale de la evaluación del porcentaje de utilización, como medida de la capacidad para de esta manera tomar decisiones y realizar los ajustes pertinentes para entregar la mejor opción de diseño.

Capítulo 3. Marco Teórico

Dentro de la maestría en Ingeniería Industrial y en especial en la temática hacia la Dirección de Producción y Operaciones se abarca dentro de la Estrategia de Operaciones, las decisiones de tipo estratégico, ver figura No.1 Diagrama Conceptual. Para Dominguez Machuca, et al., 1995, las decisiones de tipo estratégico son, Estrategia del producto, Estrategia del proceso, Estrategia de la capacidad, Diseño de los métodos de trabajo, Selección de localización y Diseño de la planta. Dentro de este trabajo, se presenta un diseño de proceso enfocado en proveer la capacidad definida por la empresa y responder a una capacidad a largo plazo. Esto significa poner a disposición instalaciones de producción como lo son, terrenos, maquinaria, materiales, personal, entre otras, que implican construcción, arranque y capacitación. Se debe garantizar que el proceso que se diseñe y las decisiones de maquinaria y otros recursos, permitan suministrar una capacidad suficiente para un período de 15 a 20 años posteriores a la construcción de la planta, debido a las inversiones que requiere, y por lo tanto el pronóstico de demanda debe ser de 10 a 30 años. (Gaither & Frazier, 2000). Un pronóstico de este tipo es bastante complicado y por lo general se conocen pronósticos que abarcan solo los 5 años debido al cambio que puede presentarse en las condiciones iniciales por variaciones en la economía, preferencias de los clientes, cambios tecnológicos, entre otros.

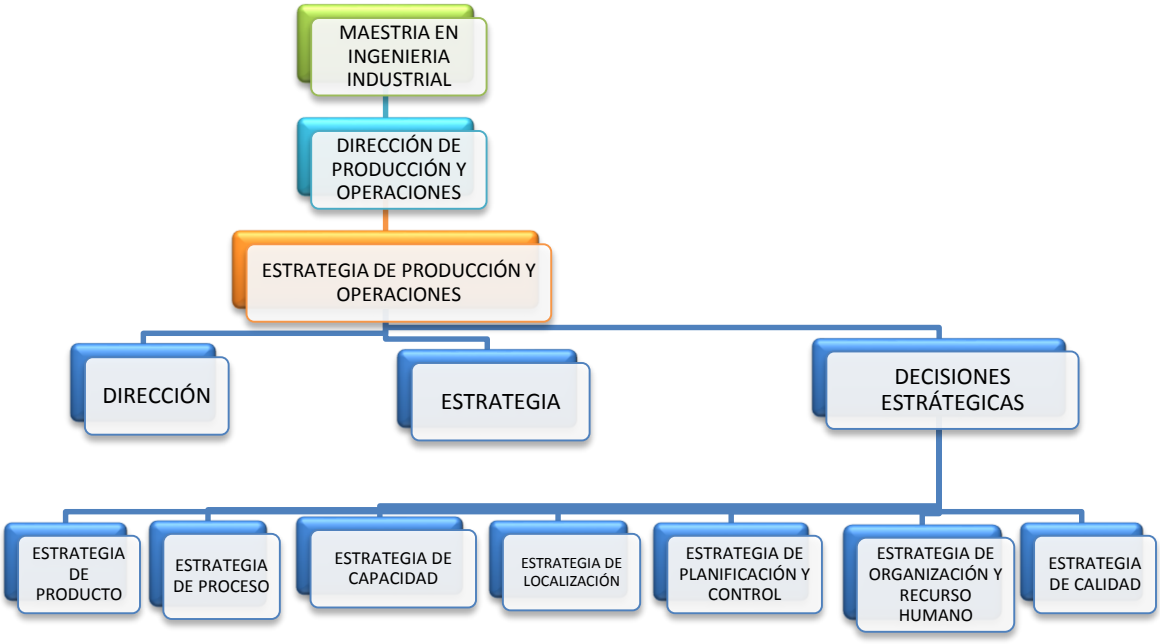


Figura 1. Diagrama conceptual. Ubicación del tema de estudio dentro de la Maestría en Ingeniería Industrial. Diseño propio.

Al presentarse esta condición inestable en el mercado, es necesario considerar el ciclo de vida del producto y prever los desarrollos tecnológicos para poder integrar estos dos factores cambiantes y determinantes en el diseño. Sin embargo, la empresa tiene prestablecido una capacidad deseada de acuerdo a estudios y pronósticos de demanda que ejecutaron con antelación, por lo que el modelo de filas de espera, el árbol de decisiones, el análisis de valor presente y el punto de equilibrio Krajewski & Ritzman, (2000), Heizer y Render, (2004), Gaither y Frazier., (2000), no serán herramientas de utilidad a este punto, pero que vale la pena mencionar, pues es necesario recalcar la importancia del análisis de capacidad como punto de partida para este tipo de decisiones.

Una vez revisada la demanda se determina la capacidad necesaria, a la que debe prestársele atención a los requerimientos de materiales, equipos y mano de obra, para finalmente evaluar como la capacidad determinada y el diseño de proceso establecido responde a las proyecciones realizadas. Esto corresponde a una planeación de capacidad, en donde al respecto se han planteado temas como demanda (incierta o conocida), Barahona et al (2005), Bermon et al (1999), Cakanyıldırım et al (2002), Woonghee et al (2006); cantidad de productos (uno o múltiples), Marquez et al (2003); maquinaria (tiempo de operación, tecnologías de fabricación),Geng & Jiang (2009); costos (de capital, pérdida de ventas), configuración de la manufactura (flexible, continúa, batch, etc.) y riesgos (inversión, pérdida de la ganancia) Du& Jiao (2006), Kostin et al (2012), Prasenjit & Venkat (2007), Wu et al (2005), Birge (2000), KeKre et al (2004).

De acuerdo a estos hallazgos bibliográficos se considera importante involucrar dentro de la estructuración de la propuesta de diseño, actividades que respondan a la cantidad de productos, la maquinaria más adecuada, entre otras y conocer acerca de las restricciones y bondades que se tengan, recordando, que el enfoque del presente trabajo es que a partir de una definición de capacidad, se establezca los recursos necesarios. También es importante considerar dentro del diseño, una capacidad adicional de producción, para poder satisfacer un aumento de demanda no previsto o producciones pico en temporadas altas.

Durante la fase de diseño de un bien o servicio se genera información sobre cómo debe ser éste, pero no sobre cómo organizar el proceso de transformación para producirlo, esto es, qué equipos se deben emplear, tipo de personal a asignar, etc. […] El diseño del proceso especifica cómo se desarrollarán tales actividades, guiando la elección y selección de las tecnologías de la Organización y dictando el momento y las cantidades de recursos productivos a adquirir. Domínguez Machuca et al, (1995).

Para esto, es necesario calcular los requerimientos de equipo y mano de obra para cumplir con las proyecciones de productos establecidas por los requerimientos de demanda y las proyecciones de ventas obtenidas. La

capacidad de manufactura se ve influenciada por la capacidad tecnológica que exista dentro de la planta, la cual está estrechamente relacionada con el tipo de material, tal como puede evidenciarse en Pulverizar S.A., donde debido a los procesos que dispone, el diseño y manufactura de sus productos, las tecnologías de fabricación están adaptadas y especializadas a sus materiales.

Groover (1997), menciona que la capacidad de Manufactura tiene como pilares los materiales, procesos y sistemas, que la eficacia de la manufactura se refiere a las limitaciones físicas y técnicas de la empresa y que la capacidad y aptitud de manufactura se puede dimensionar en la capacidad tecnológica de proceso, en las limitaciones físicas del producto y en la capacidad de producción, refiriéndose esta última a la cantidad de elaboración que pueda generarse en un periodo establecido.

La capacidad tecnológica de proceso de una planta es el conjunto de procesos de manufactura del cual dispone una empresa […], Un taller de maquinado no puede laminar acero y el de laminación no puede construir carros. Groover (1997).

Por tanto la selección de las tecnologías de fabricación es fundamental para que la capacidad del proceso sea eficiente, permita obtener de acuerdo al diseño del producto y proceso, las cantidades y calidades esperadas y se obtenga una producción con las especificaciones planteadas, además de un sistema de producción funcional al producto a fabricar.

Por otro lado, los equipos que se elijan, limitan la capacidad, pues una máquina puede procesar cierta cantidad de material por hora y bajo ese rango se debe gestionar la producción, por lo que para la elección del equipo se tomará en cuenta la capacidad de cada etapa de operación.

Una vez en este punto, se considera necesario introducir un poco al lector de esta tesis, en el proceso que se llevaría a cabo en la planta de acidulación de Pulverizar S.A y de esta manera poder reconocer las tecnologías de fabricación y las condiciones de operación a las que se da lugar. La ingeniería de proceso es la responsable de definir cómo se fabricará el producto diseñado, con qué tipo de

proceso, que herramientas y tecnologías de producción son necesarias. (Suñe Torrents, et al, 2004).

El diseño del proceso productivo se relaciona con la planificación de la producción, la capacidad, la distribución en planta y la tecnología del proceso. De esta manera, se explicarán las etapas de transformación por las que deban pasar los materiales y poder reconocer los requerimientos de capacidad.

Lo primero que debe conocerse es que la empresa desea obtener dos productos, uno a partir del Silicato de Magnesio y otro a partir de Fosforita, sometiendo ambos minerales a un proceso de hidrólisis por acidulación y los mismos puedan aplicarse al suelo y dársele un uso agrícola.

El proceso de producción de minerales acidulados como uso para fertilizantes se divide en cuatro etapas:

- Trituración,
- Molienda y secado
- Acidulación
- Granulación

La etapa de trituración consiste básicamente en disminuir de tamaño de partícula los materiales que se procesaran, la molienda y secado permitirá realizar una clasificación a un tamaño de partícula de finos con un grado de humedad inferior al que trae el material. La acidulación es la etapa química del proceso, en la que se da paso a la reacción del mineral con el ácido sulfúrico y ocurre la transformación en el fertilizante deseado. La granulación gracias a unos aditivos permite la formación de pellets como presentación final del producto. Para ampliar un poco este tema, se indaga en este tipo de operaciones

Molienda y Trituración de Minerales.

La molienda y trituración de minerales, hace parte de las operaciones de reducción de tamaño, operación que consiste en someter un material a un fuerte impacto, donde se obtiene como resultado una distribución de tamaño de partícula, variando su dimensión en grandes, medianas y pequeñas piezas. Costa Lopez y otros (2004), (Hopp, 1994), (García Castello, 2006).

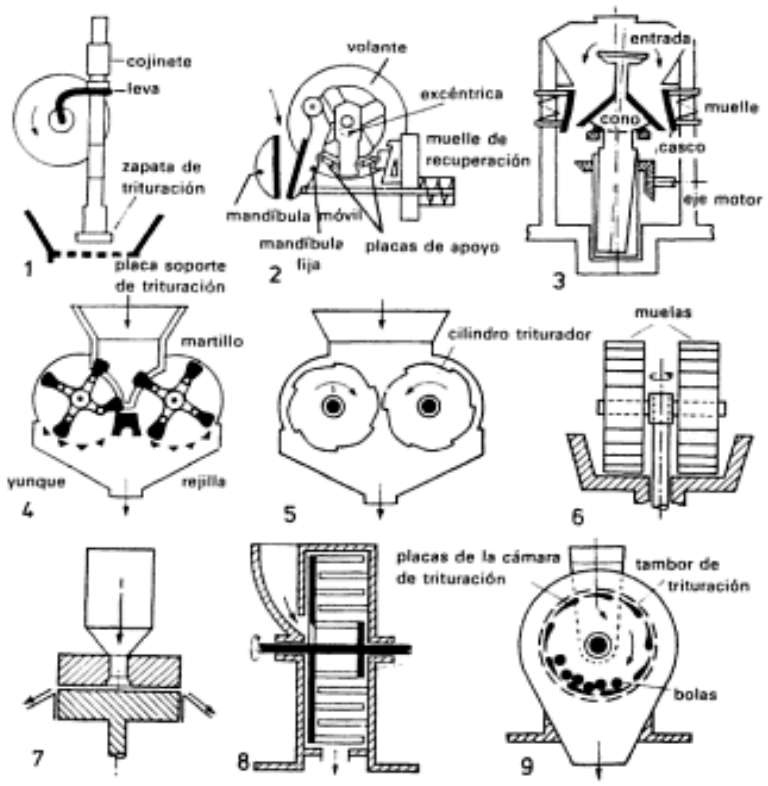
Si se aumenta la energía de golpe, las partículas mayores serán de un tamaño, ligeramente inferior y algo más numerosas, y el número de partículas finas aumentará notablemente aunque variando muy poco su tamaño. Parece, por tanto, que el tamaño de las partículas finas está estrechamente relacionado con la estructura interna del material, mientras que el tamaño de las partículas mayores está ligado al proceso por el cual se efectúa la reducción de tamaño. […], *la eficacia aparente de la operación de reducción de tamaño depende del equipo utilizado*. (Coulson & Richardson, 2004).

Algunos de los métodos y equipos utilizados en la molienda y en la trituración son mostrados en la figura 2, donde se ilustra equipos que operan bajo los métodos de presión, impacto, fricción y escisión. Las propiedades físicas del material, indicarán que método utilizar de acuerdo a la dureza y fragilidad del mismo.

Aparte de una definición de la trituración y molienda de minerales y una vista general de los equipos utilizados es importante considerar los avances que se han dado durante estos años en el procesamiento de los minerales. Malhotra y otros, (2009), compila en su obra, varias consideraciones respecto a este tema, dentro de los cuales encontramos por ejemplo el aporte de Harris (2009), acerca de lo que no debe hacerse en el diseño de una planta de molienda de minerales. Este aporte se basa en la larga experiencia que el autor ha tenido durante su desempeño laboral dentro de plantas de procesamiento de minerales, y menciona algunos errores que finalmente se ven reflejados en la producción final y el funcionamiento exitoso de la planta, errores como la falta de confirmación del

abastecimiento de material, caso de la planta *Cerro Corporation en New York City*, errores como ausencia de un test mineralógico, falta de equipos dentro de la instalación, o el exceso de automatización dentro de la planta, como el caso que se presentó en Mount Morgan gold, donde la planta era altamente automatizada, pero con la falla de que el operador, no podía apagar el sistema, cuando el circuito entraba en problemas.

Halbe (2009), establece unas reglas generales para las plantas de este tipo, donde la primera regla tiene que ver con una de las cosas que no pueden dejar de hacerse, mencionada por Leonard Harris anteriormente, y es el test mineralógico, pues para Doug Malhotra, lo primero es conocer la alimentación que se llevará a los equipos de reducción de tamaño.



1. Machacador. 2. Triturador de mandíbulas. 3. Triturador de conos. 4. Triturador de martillos. 5. Triturador de cilindros. 6. Triturador de muelas. 7. Molino de muelas.8. Molino de púas de percusión. 9. Molino de bolas.

Figura 2. Algunas máquinas Trituradoras y Molinos. Fuente: Vollrath Hopp. Fundamentos de tecnología química

Esta regla también tiene que ver con lo que se menciona dentro de las tecnologías de fabricación, pues el conocimiento del material, es uno de los pilares para esta área y la capacidad de manufactura.

Puede concluirse entonces, que dentro de las tecnologías de Molienda y trituración de minerales, debe conocerse el material a procesar, considerarse la posibilidad de extracción del mismo en la mina y con esto, el aseguramiento de abastecimiento. Debe considerarse también la selección de equipos, su capacidad y la consolidación de esta con la capacidad de proceso.

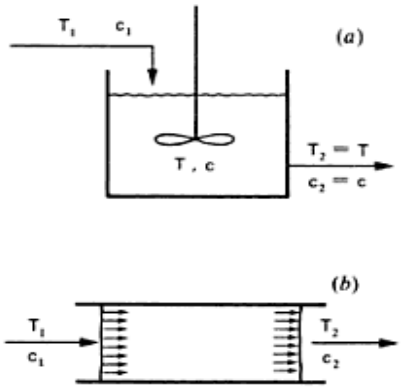
Tecnologías de acidulación de Minerales.

La tecnología del proceso de acidulación, consiste en un recipiente denominado reactor, dentro del cual se pone en contacto el ácido con la roca, bajo condiciones de temperatura, pH y dosificación controladas. Para un sistema de reacción es importante conocer el comportamiento de los materiales a través de sus propiedades físicas y químicas, y decidir qué datos registrar o procesar dentro del avance de la reacción.

Como primera medida al conocimiento de los materiales, debe determinarse las cantidades y las respectivas entidades que entran y salen del sistema de reacción, lo cual es posible utilizando como herramienta para ello, los balances de moles o masa eligiendo una superficie de control. De acuerdo al flujo de entrada de reactivos y de salida de productos, así como la variación espacial de factores como concentración, temperatura, presión y velocidad de reacción, puede recurrirse al dimensionamiento del reactor. Si se ha establecido el tipo de reactor, puede obtenerse, de acuerdo al factor de conversión esperado, el volumen necesario del reactor. Esto en términos de la ingeniería industrial, sería equivalente a la definición de la capacidad teórica de producción, debido a que el

dimensionamiento que se le otorgue al reactor dará como resultado la conversión máxima con que se calculó el volumen del mismo. Es importante recordar que la conversión se encuentra dentro del rango de 0% a 100%.

Los reactores industriales más comunes se clasifican en reactores por lotes, tanque con agitación continúa y tubular, (Levenspiel, 2001), (Fogler, 2001) y de acuerdo a las condiciones de reacción, se elige uno u otro. La figura 3. Muestra algunos de estos.



a) Reactor de tanque agitado b) Reactor de flujo pistón

Figura 3. Reactor tanque agitado y flujo piston. Fuente: Curso de química técnica. J. Costa López y otros.

Como puede observarse, nuevamente el conocimiento de los materiales, y sus propiedades son importantes para la operación a ejecutar y la selección del equipo a utilizar.

De acuerdo a esto, es de considerar que al acidular el silicato de Magnesio y la fosforita, obtenemos productos con magnesio (Mg) y fosforo (P) más solubles en el suelo. Gómez L (1976), realiza un análisis de la solubilidad del Fosforo (P) en las plantas, a través de un estudio con distintos fertilizantes fosfatados y explica que una alternativa para aumentar la solubilidad de la Roca Fosfórica es mezclándola con azufre o con fuente de nitrógeno, (Khasawneh & Doll, 1978).

Gómez L (1976), explica que al acidular la roca fosfórica, esta se hace soluble y Vera y otros (1987), indica que el fosforo de la Roca Fosfórica se disuelve lentamente en el cultivo, pero al mezclarlo con azufre se acelera el proceso de disolución debido a la producción de un medio ácido. Arnold Finck (1988), Elsea Kogel et al (2006), clasifican los abonos magnésicos, en fácilmente solubles, casi insolubles o insolubles en agua.

La empresa está interesada en la obtención de sulfato de magnesio y superfosfato, de donde, Arnold Finck (1988), de acuerdo a la clasificación anterior, deja al sulfato de magnesio como un abono con un alto contenido de Magnesio (Mg) y muy soluble en agua (hasta 60%).

En cuanto a las condiciones de reacción, siguiendo los resultados obtenidos por Rashad & Baioumy (2005), se considerará dentro del diseño, para la obtención del sulfato de magnesio las siguientes: tamaño de partícula de 150µm, Temperatura de reacción de 60˚C, tiempo de reacción de 50min, razón solido/liquido 1:4 g/ml, razón molar de ácido sulfúrico a óxido de calcio y oxido de magnesio 1 y un pH de 8.5.

De la misma manera, para el caso de la producción de Superfosfato simple, las condiciones a considerar, serán: tamaño de partícula bajo malla 100, Temperatura de reacción de 95˚C a 110˚C, (temperatura es alcanzada por el calor de reacción en la etapa de curado), tiempo de reacción de 1 y 3min, (después pasa a la etapa de curado entre 15min a varias horas), razón roca a ácido entre 0.82 a 0.95, según Miranda C, (2002)

Pasando ahora a los requerimientos de mano de obra para el proceso de producción que se espera plantear para la empresa Pulverizar S.A., se ha considerado la calidad de la calificación de la mano de obra necesaria.

Dentro del proceso de transformación logran identificarse de acuerdo a lo anterior, operaciones de separación, operaciones mecánicas y operaciones químicas. De acuerdo a las características de estas operaciones para la acidulación de los minerales objeto de este proceso, se puede deducir que se

debe contar con mano de obra especializada en una pequeña cantidad, es decir, un profesional encargado de dirigir, coordinar y planear la producción y una mano de obra menos especializada, que contribuya al manejo y operación de la maquinaria que se establezca para este proceso, teniendo en cuenta que dentro de la propuesta de diseño se establezca las cantidades, una vez se realice la caracterización.

Hasta el momento se ha tenido en cuenta como recursos a definir la maquinaria y la mano de obra, sin embargo la empresa ha sugerido un espacio cercano a la ubicación actual para construir allí la planta de acidulación de minerales. Debido a que esto implica un costo de inversión y que el tamaño del sistema productivo, se espera sea adecuado para responder al volumen de producción deseada o responder de manera eficiente al volumen especificado, se espera establecer un tamaño de instalación.

Un tamaño que dé como resultado un sobredimensionamiento, daría lugar a una capacidad instalada que este subutilizada o el caso contrario si se diseña una planta con un tamaño inferior al esperado. Para determinar el tamaño, es necesario determinar una variable que de referencia a la dimensión de la planta.

La dimensión y por tanto la capacidad de las plantas de producción, es un input decisivo en el diseño e implantación de procesos de acuerdo con un volumen de producción (carga de trabajo) a obtener y las posibilidades de la planta para absorberlo (su capacidad). […] (Cuatreacasas Arbós, 2012).

El volumen de producción, puede ser una de estas variables, sin embargo este es un valor normalmente fluctuante ya que la demanda interviene bastante en él y la demanda es muy dependiente del mercado. El número de trabajadores, es una variable que podría ser determinante o no, de acuerdo al modelo de producción del proceso, sin embargo este proceso productivo se creería es acompasado por equipo (lo que se definirá en la caracterización) y no por trabajadores, por lo que la medida podría ser más exacta en este caso hacia las máquinas que compongan el proceso. *Como medida más cercana al diseño de plantas productivas podría utilizarse la capacidad de producción de acuerdo con las máquinas, equipos e instalaciones que compongan la planta. Esta es una buena*

medida por su carácter estructural, pues la dimensión estará inevitablemente ligada a la estructura, mientras que otras medidas como el volumen de producción y el número de trabajadores son evidentemente coyunturales.[…] (Cuatrecasas Arbós, 2012)

Para consolidar toda esta información y poder mostrar a la empresa, además de dimensionamiento de equipos, de cantidad de operarios o mano de obra y dimensionamiento de planta, se encuentra que el porcentaje de utilización es una medida de capacidad que permitirá evaluar este diseño, pues se podrá observar si la capacidad de producción definida está realizando uso de la mejor manera de los recursos dispuestos.

Capítulo 4. Caracterización del Diseño

Este capítulo muestra la información que la empresa ha establecido como información de entrada para el diseño del proceso, de acuerdo a las expectativas y decisiones estratégicas que se han tomado al interior.
La información que la empresa establece dentro de su caracterización de diseño se puede resumir en:

- Cantidad de productos
- Maquinaria necesaria
- Tipo de proceso

Las entrevistas sostenidas con la gerencia de Pulverizar S.A. y la consulta con otros miembros de la empresa, como el departamento de producción, el departamento de mercadeo y ventas y el departamento de calidad, logran establecer que la empresa desea obtener un fertilizante a base de fosforita y otro a base de silicato de magnesio, sometiendo el mineral a un tratamiento con ácido y obtener así superfosfato y sulfato de magnesio.
De esta manera se reconocen dos productos, los cuales tienen características diferentes y aplicaciones distintas, pero enfocados hacia la nutrición del suelo.
De acuerdo a esto, debe establecerse el modo de obtención de los mismos, por lo que la indagación realizada dentro del marco teórico hacia la acidulación de minerales, permite reconocer que ambos pueden ser tratados con el mismo tipo

de ácido, es decir, ácido sulfúrico, además de conocer unas condiciones de operación, como pH, Temperatura, razones de alimentación, etc,

Sin embargo, cuando se realiza el montaje de una planta se debe tener presente que algunos equipos que conforman el proceso productivo, son útiles para distintos procesos, lo que puede evidenciarse en los equipos de molienda y trituración de Pulverizar S.A., en los que se realiza tratamiento a diferentes materiales, variando las condiciones de proceso. Esto surge para establecer o definir dentro de las características del diseño, si los equipos utilizados para obtener sulfato de magnesio, serán los mismos utilizados para obtener superfosfato o no.

Según las etapas de producción para la acidulación de minerales descritas anteriormente, los diferentes materiales usados, son compatibles con los equipos a utilizar, por lo que la gerencia solicita que dentro del diseño los equipos usados para el tratamiento de la fosforita, sean usados para el tratamiento del silicato de Magnesio.

Para identificar los equipos necesarios para el proceso, las etapas de producción nuevamente son útiles, pues estas permitirán reconocer las diferentes transformaciones por las que el material debe pasar para convertirse en el producto final y los equipos que harán parte de esta transformación.

Como etapa inicial se encuentra la trituración, etapa en la que se busca una reducción del tamaño de la roca de mineral, sometiendolo a un esfuerzo por medio del paso de martillos, con una configuración de apertura tal que se alcance el tamaño necesario para la alimentación al molino, pues el mineral no puede ingresar al molino con el tamaño con el que llega de la mina.

Ingresado el material al molino, el tamaño de partícula descrito dentro del marco teórico de 150 µm (o 147 µm para 100mesh) podrá ser alcanzado.

Al realizar la molienda de un material, el tamaño de partícula, no es uniforme, y lo que se presenta es una distribución promedio, así como la formación de los llamados finos y gruesos, es decir, tamaños de partícula menores y mayores al tamaño esperado, por lo que se hace necesaria una clasificación de tamaño y

pasar solo al proceso de acidulación el mineral que cumpla con la especificación dada.

Hasta ahora pueden reconocerse equipos como, una trituradora, un molino y un clasificador de tamaño de partícula.

Posterior a ésto, el material clasificado y secado pasa al reactor, etapa que debe disponer de un tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico y un tanque de paso que permita controlar la concentración y densidad del ácido para alimentar al reactor químico.

Todos los materiales acidulados cuando salen del reactor son llevados a una bodega de curado donde se completan las reacciones químicas y se disminuye la acidez libre de los productos y finalmente pasar a la etapa de granulación, donde se le adiciona agua para formar las esferas o gránulos.

Finalmente se identifican los equipos restantes, como un reactor y un granulador.

En cuanto al tipo de proceso, la clasificación está muy ligada al producto, volumen de producción, tecnología y nivel de automatización y la heterogeneidad en la fabricación. La complejidad en la fabricación del producto, su tamaño, el de los materiales, el uso de las instalaciones, la especialización de los equipos, la secuencia, etc, han dado paso a las diferentes configuraciones productivas.

En el caso de este proyecto que tiene Pulverizar S.A., se distingue dos productos diferentes que utilizarían los mismos equipos (por tanto las mismas instalaciones para su fabricación) y una alta estandarización para su obtención, con el uso de equipos especializados para cada finalidad de las cuatro etapas mencionadas.

Las operaciones de transformación son realizadas por las máquinas, donde la manipulación de los trabajadores va dirigida hacia la configuración de los equipos, su encendido y apagado (sin mencionar mantenimientos, alistamientos, etc), y donde la secuencia de obtención de los productos deseados es similar, siguiendo una disposición de las maquinas una tras otra.

Según las características del proceso de acidulación de fosforita y silicato de Magnesio, este es del tipo de proceso por lotes, en línea y acompasado por equipo, (Domínguez Machuca et al, 1995, Miltenburg, 1996, Silver, E., 1998).

Capitulo5. Diseño de Proceso.

Dentro de este capítulo se presentan variables y se hace uso de herramientas, que concluyen en la manifestación de un proceso, que cumpla con las características del diseño.

Este trabajo ha estado orientado hasta el momento en la identificación de aspectos como las materias primas, el flujo de trabajo de acuerdo a las características de producción y los métodos de obtención del producto deseado, para responder a una selección de inputs, de factor humano y de equipos que intervendrán en las operaciones de producción.

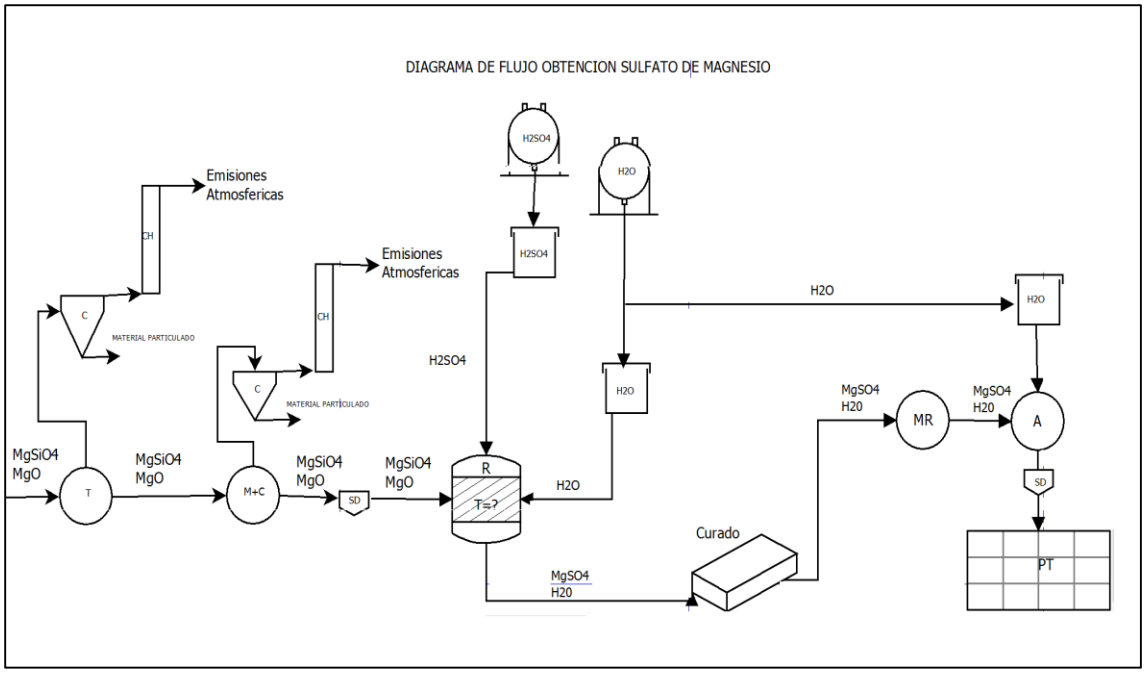


Figura4. Diagrama Pictórico– Proceso de Obtención de Sulfato de Magnesio. Autoría propia. Elaborado usando el software libre ‘’Día’’.

La figura 4, ilustra los equipos y materiales que conforman el proceso, así como el flujo del mineral a través de cada una de las etapas de producción.

Teniendo presente que este es un diseño con capacidad definida, de 200Ton/mes y asignando una disponibilidad de producción de 26 días, se obtiene la demanda diaria de materia prima de 7,692 Ton/día, la cual se aproximará a 7,7 Ton/día para cada producto.

Definido esto, se abarcará el dimensionamiento de equipos, tomando una a una las etapas del proceso, iniciando con la etapa de reacción como etapa critica dentro de la planta de producción.

Reacción

El sistema de reacción consiste de un reactor de tanque agitado, con sistemas de enfriamiento y calentamiento que utiliza el agua como agente refrigerante y el vapor como calefactor, asi como de entradas de materia prima y salidas de productos terminados. En este caso, la figura 5, ilustra el sistema de reacción y la ley de conservación de masas, que se tiene en cuenta para la estequiometria de la reacción.

De acuerdo a la caracterización realizada, se tiene información suficiente para conocer la masa de entrada y salida del sistema de reacción.

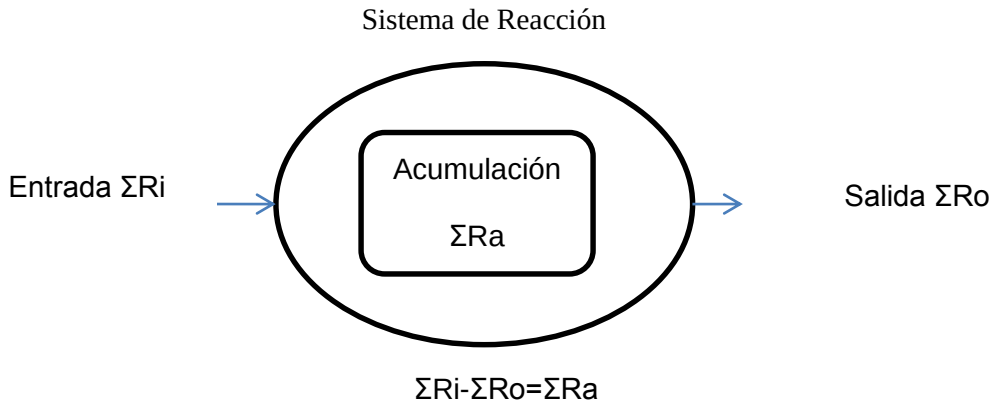


Figura 5. Representación de un sistema confinado.

Aplicando el principio de conservación de masas y las relaciones sólido-líquido o roca-líquido para los procesos de sulfato de magnesio y superfosfato simple mencionados anteriormente, así como retomando la producción mensual de 200Ton/mes fijada por la empresa, se obtiene la cantidad de mineral y ácido a alimentar en la etapa de reacción, tal y como se muestra en la Tabla 1, así como el volumen ocupado por el material.

Con el conocimiento de estas variables, es posible dimensionar el reactor, pero es necesario para esto, tomar en cuenta algunos factores.

El primero, la gerencia de Pulverizar S.A., ha determinado que el mismo equipo que se utilice para acidular el silicato de Magnesio, sea el mismo que se utilice para la acidulación de la Fosforita. El segundo factor, está relacionado con la capacidad y seguridad del reactor, pues se debe tomar un 40% adicional en la capacidad volumétrica del reactor para los factores de seguridad y criterio de diseño. (Palacio Santos, 2005).

	Razón Roca-ácido	**Relaciones**
Producción Superfosfato	0,95	Relación 1.
Producción Sulfato de Mg	¼	Relación 2.
masa total	200	Capacidad deseada
masa roca	200-macido	Relación 3.

	Variables a despejar	
Proceso	**Masa Roca (Ton)**	**Masa Acido (Ton)**
Producción Superfosfato	102,56	97,44
Producción Sulfato de Mg	160	40

Proceso	**ρ mezcla(Kg/L)**	**m(kg) total x lote**	**V mezcla (L)**
ACIDULACIÓN FOSFORITA	1,768208	96,15384615	54,37926203
ACIDULACIÓN SILICATO MG	2,528	266,6	105,4588608

Tabla 1. Requerimiento de Materiales (masa y volumen) según demanda de producción y tipo de mineral a trabajar.

El tercer factor, el cual tiene que ver con la Dirección de Producción y Operaciones, es la administración de la producción, es decir, si solo se toma en cuenta los dos factores de dimensionamiento del reactor mencionados anteriormente, se podría hablar de un reactor de 147L, aproximadamente (volumen a ocupar por la mezcla de componentes y la aplicación de los factores de diseño y seguridad). Sin embargo los tiempos de trabajo y la cantidad de recambios necesarios para la producción deseada de ambas acidulaciones de 200Ton/mes no son posibles con un volumen de este tamaño.

Para visualizar lo que se desea plantear, es preciso considerar el número de lotes en cada producción. Para el caso de la acidulación de silicato de Magnesio, la cual solo en tiempo de reacción, tarda 50min (como se menciona en la caracterización), es decir, sin tener en cuenta tiempos de parada, de mantenimiento, de limpieza, de alimentación y descargue de materia prima y producto terminado, tiempo de recambio de una producción a otra, etc., serían posibles 28,8 lotes, trabajando las 24horas del día, obteniéndose una cantidad de 7,7Ton diarias.

Parámetro	Producción de Sulfato de Mg
Horas del día	24
Minutos en 1 día	1440
tiempo de reacción de silicato (min)	50
Numero de lotes posibles por 24h	28,8
Masa por lote (Ton)	0,27
masa a obtener en 1dia (Ton)	7,7
Volumen de reactor (m3)	0,1479

Tabla 2. Masa y tiempos de Reacción para la acidulación del silicato de Magnesio.

Esta producción equivaldría a la obtención de 200Ton/mes del producto terminado proveniente de la acidulación de silicato de Magnesio, es decir, no hay

tiempo de obtener durante el mes las 200Ton del producto terminado al acidular la fosforita.

Si se disminuye los tiempos de producción, para dar holgura a tiempos de recambio, limpieza y otros, así como espacio para la producción del segundo fertilizante, se tendría que contar con un reactor de mayor volumen, lo que favorece en tiempos de producción, capacidades de producción, no solo para el reactor, sino para el resto de equipos que dependen del dimensionamiento del reactor, y como tal, mucho más funcional.

Por lo tanto, disminuyendo el número de lotes de acidulación de silicato de magnesio, necesarios para obtener 7,7 Ton/día, a 14,4, es decir, intensificando la labor en el reactor a 12 horas, se aumenta en la cantidad de materia a procesar por lote. Significa que es necesario un volumen mayor en el reactor y esto significa pasar de 28 lotes de 0,26Ton cada uno, un volumen de reactor 147L en 24horas, a 14,4 lotes de 0,52Ton cada uno y un volumen de reactor de 295L en 12 horas. Para la acidulación de fosforita, significaría pasar de 480Lotes de 0,096Ton cada uno y un volumen de 147L en el reactor en 24horas, a 20,64 lotes de 0,373Ton cada uno y un volumen de reactor de 295L en 1 hora. Finalmente esto se traduce, en disponer de 13 horas diarias para la etapa de reacción y dar holgura de 11 horas diarias para las demás etapas del proceso y los demás procesos de la empresa, como mantenimiento, controles de calidad, pruebas de verificación y control, etc.

Parámetro	Producción de Sulfato de Mg	Producción de superfosfato
Masa por lote (TON)	0,534188034	0,372946403
Masa Roca por lote (TON/día)	3,944773176	6,153846154
Numero de lotes por día	14,4	20,6257726
Tiempo de producción(min)	720	61,87731781
Volumen de reactor(m3)	304,5238674	295,2848101

Tabla3. Masa y tiempos de Producción en el reactor, teniendo en cuenta los tres factores de dimensionamiento.

Para continuar entonces con el dimensionamiento del reactor, teniendo presentes ya los factores mencionados y seleccionando un volumen de reactor de 295L (debe recordarse q el volumen máximo de mezcla a adicionar debe ser los factores de seguridad aplicados) y tomando en cuenta, que la altura del reactor debe aportar a la fácil manipulación del mismo, el descargue de de 210L, pues el resto del volumen debe conservarse vacío para cumplir con producto y la limpieza de este, se determina que la altura máxima del reactor corresponda a 2 veces el diámetro. De acuerdo a la geometría de un cilindro, se tiene que:

$$D = \sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} \qquad (7).$$

$$d = 0{,}57m \qquad (8).$$

$$h = 1{,}14m \qquad (9).$$

Estas dimensiones del reactor, se refieren al volumen y diámetro del mismo como tal, es decir, el reactor debe contar con un sistema de agitación y de intercambio de calor, de manera tal que logre alcanzar las condiciones de mezcla y temperaturas de trabajo determinadas anteriormente, de 60 ˚C para sulfato de magnesio y de 95˚C a 110˚C para la producción de superfosfato.

Trituración y Molienda

El mineral extraído de la mina, es llevado directamente a la planta, sin clasificación ni distribución de tamaño uniforme, así como una dimensión superior a la deseada para utilizar en la alimentación al reactor.

Para obtener el tamaño deseado, se hace necesario unas etapas de tratamiento del mineral en las que a través de esfuerzos mecánicos, se logre fraccionarlo. Según se definió ya, se debe lograr un tamaño de partícula de 150µm, es decir,

que debemos llegar hasta una reducción fina o molienda. Para llegar hasta la molienda, es necesario realizarle al mineral una trituración preliminar, ya que la alimentación en la molienda no puede ejecutarse con el tamaño que el mineral posee a la llegada de la planta. Esto significa que se utilizarán dos equipos, una trituradora y un molino, de donde, para definir la capacidad de estas etapas, es necesario considerar diferentes variables mencionadas anteriormente, como la dureza del material, la humedad inherente del mismo, el tamaño de alimentación y descarga de la máquina a utilizar y la capacidad nominal del equipo, así como la capacidad mínima requerida por el proceso.

De acuerdo a la escala de Mohs, el silicato de Magnesio, presenta una dureza de 1 y la fosforita de 5, así como humedades inferiores al 6%. Según estas dos características, el empleo de trituradoras de impacto o de martillos, en las cuales la fragmentación se realiza por choque, son las más adecuadas, pues los intervalos de dureza del material están comprendidos entre una dureza baja a media. Las máquinas de movimiento lento, como trituradoras de mandíbula o giratorias, no son las más recomendadas, pues estas se utilizan para materiales con dureza media a alta, además de ser muy susceptibles a la humedad y formar debido a esto, atascos en la trituración.

Para el caso de la molienda, el tamaño de alimentación y del producto permite clasificar los equipos que pueden utilizarse, en este caso, al esperarse una dimensión de 0,15mm en nuestro producto, los equipos más útiles son los de molienda de finos, dentro de los cuales se encuentran los molinos tradicionales como el molino de rodillos, el molino de anillo y rodillos, molino Raymond y el molino de bolas, sin embargo, este tipo de industria ha conjugado el principio del funcionamiento de alguno de estos y ha mejorado su rendimiento, disminuido su ruido y emisiones atmosféricas gracias a la investigación tecnológica. Para sugerir entonces el tipo de máquina a utilizar en la molienda, es conveniente tomar como criterio la capacidad necesaria de producción, el tamaño de la alimentación (el cual es el de salida del triturador de martillos), y el tamaño de

salida del molino seleccionando dentro de las opciones del mercado, el que más se acerque a estas condiciones.

De acuerdo a los cálculos de la cantidad de roca necesaria para cada reacción, se tiene que se hace necesario 3,94 Toneladas diarias de silicato de Magnesio y 6,15Ton diarias de Fosforita para procesar en la etapa de reacción. Por lo tanto se debe buscar un equipo que favorezca el procesamiento de esta cantidad de roca y tenerla disponible para las etapas siguientes a la trituración y molienda. Nuevamente se hace uso del factor de seguridad en los flujos promedios (del 10%), mencionado por Palacios Santos, con el fin de tener un margen de seguridad por pérdida en el transporte y permanencia de material en equipos.

De acuerdo a la capacidad definida por el proceso y el diámetro del material, se encuentra dentro del mercado, un triturador de martillos generalizado por varios proveedores, bajo el modelo PC 400X300[1], con una capacidad de 3-10Ton/h como capacidad mínima. En Colombia la empresa NPO Special Technologies, podría realizar el diseño y construcción de la máquina requerida, bajo la capacidad de 4-8 Ton/h de producción. De acuerdo a las especificaciones técnicas mostradas en la tabla 4, para ambas alternativas de adquisición de las trituradoras, se realiza la búsqueda del molino de acuerdo al tamaño de alimentación y la cercanía con la capacidad definida por el proceso.

Como se mencionó anteriormente, para los equipos de molienda, se encuentra una gran variedad de modelos dentro de la molienda de finos, los cuales se enuncian en la tabla 5, tomando como proveedores los mencionados en la búsqueda de los equipos de trituración y la empresa colombiana NPO Special Technologies.

[1] Se enuncian algunos proveedores, así como el link web, donde se puede observar las especificaciones técnicas del triturador de martillos a continuación:

- Joyal Crusher: http://www.joyalcrusher.com/es/products/Crushing/Hammer-Crusher.html
- Oriental Crusher: http://www.orientalcrusher.com/es/Hammer-Crusher.html
- Formats Construction Machinery Co., Ltd: http://trituradoras-de-roca.com/Trituradora-Fija/Trituradora-de-martillos.html
- Liming Heavy Industry: http://www.break-day.com/es/hammer_crusher.htm
- Henan Hongji Mine Machinery Co., Ltd: http://www.sinocrusher.es/a3-hammer-crusher.html

Modelo	Tamaño alimentación (mm)	Tamaño salida (mm)	Capacidad (Ton/h)	Potencia (KW)	Dimensiones LXWXH (mm)
PC 400X300	100	<15	3-10	11	900x670x860
MMST	150	<25	4-8	8.5	896x745x935

Tabla 1. Datos técnicos equipos de Trituración.

Modelo	Tamaño de alimentación (mm)	Tamaño de descarga (mm)	Capacidad (ton/h)	Potencia (kW)	Dimensiones LXWXH (mm)
3R21153	15mm	0.044-0.165	0.6-1.8	15	4500x2800x5800
YGM75	≤15	0.613-0.033	0.4-3.1	35.7	5000×4100×4850
YGM85	≤20	0.613-0.033	0.5-4.0	42.7	5150×5000×5200
MPST	≤25	0.075-0.89	0.8-2	18.5	4700x3200x5900

Tabla 2. Datos técnicos equipos de Molienda.

El molino seleccionado en la empresa NPO Special Technologies, presenta una ventaja adicional, pues este combina los procesos de secado, molienda y separación en una sola unidad, simplificando el diseño de la planta.

Toneladas diarias en Trituración y Molienda con margen de seguridad del 10% en flujos	
Masa Roca Silicato de Mg	Masa Roca Fosforita
4,339250493	6,769230769

Tiempo de Trituración y Molienda			
Roca	Tiempo de Trituración (h)	Tiempo de Molienda (h)	Tiempo total (h)
Silicato de Mg	0,60267368	2,410694718	3,013368398
Fosforita	0,94017094	3,760683761	4,700854701

Tabla 3. Masa y tiempos en la etapa de Trituración y Molienda.

De acuerdo a esto, se tendría la masa necesaria para un día de trabajo de Silicato de Magnesio procesada en un tiempo de aproximadamente 3,01h y la masa necesaria de Fosforita en un tiempo aproximado de 4,7h, tal como puede observarse en la tabla 6. Este cálculo se hizo asumiendo una tasa de producción máxima con una eficiencia del 90%.

Granulación.

En la etapa de granulación, ocurre un proceso de adhesión entre las partículas, el cual puede presentarse por vía seca o húmeda, debido a la adición de agua o adherente a la sustancia a tratar. Este proceso se denomina aglomeración, el cual, si se presenta por vía húmeda, consiste en adicionar agua al mineral para aumentar la tensión superficial, de manera tal que al colisionar las partículas entre sí, los finos se adhieren a los gruesos; Si por el contrario se presenta por vía seca o aglomeración por adherentes, el proceso consiste en utilizar aglutinantes, de manera que se pueda dar un fenómeno parecido al de la floculación, formando una especie de coagulación por la unión de las partículas arcillosas.

Para este proceso especifico, se seguirá una aglomeración por vía húmeda, pues la aglomeración por adherentes es utilizada en componentes sensibles a la humedad, componentes que no soportan altas temperaturas y/o sean excesivamente solubles.

De esta manera se hace necesario utilizar un equipo denominado, granulador de disco, el cual por efecto de rotación le da forma granular al mineral alimentado.

Para buscar el equipo que cumpla con la capacidad dada por el proceso, se debe recordar que la etapa de granulación es posterior al curado del material, por lo que la cantidad de material a procesar, es el procedente de la acidulación, Es decir que diariamente se deben procesar 7,7 Ton de cada uno de los productos terminados.

Modelo	Diámetro interno (mm)	Altura de costado (mm)	Volumen (m^3)	Velocidad (rpm)	Potencia (KW)	Capacidad (T/h)
ZL25[2]	3600	600	6.1	11.3	15	3-5
ADPP[3]	3600	400	5.8	10.5	13	2-4

Tabla 4. Especificaciones Técnicas Equipos de Granulación.

Realizando la búsqueda de equipos en el mercado se encuentran los modelos mostrados en la tabla 7, de donde se obtiene que en un tiempo aproximado de 4,27h se procesan los dos productos.

Mano de Obra.

Este sistema de producción se ve influenciado por un sistema en el que hay baja flexibilidad, poca variedad en el número de productos, un nivel de automatización medio-alto y equipos especializados. En las máquinas de las que se compone el sistema, se procesan diferentes materiales, sin embargo, esta variedad no representa cambio dentro de las etapas por las que los materiales pasan a través del proceso hasta su transformación en producto final. Significa que para este tipo de configuración, la intensidad de mano de obra es baja, contrario a la intensidad de maquinaria. El personal operativo realiza tareas simples, donde el ritmo de producción es dado por los equipos del sistema productivo.

Esto lleva a que, para la producción de los fertilizantes superfosfato simple y sulfato de magnesio, se requiera poca mano de obra, con un nivel de polivalencia medio, que permita atender las diferentes operaciones del proceso.

De acuerdo a las capacidades establecidas en el ítem anterior por los equipos, la trituradora tarda 0,6h, en procesar 4,33Ton de roca de silicato de Magnesio y

[2] HYLEN: http://www.farmingmachine.es/3-5-2-disc-pelletizer.html
[3] NPO Special Technologies: Cra 23 No. 55-04. Oficina 7. Manizales- Colombia.

0,94h, en procesar 6,76 Ton de roca de Fosforita, y el molino, tarda 2,41h, en procesar el silicato de Magnesio derivado de la trituradora, así como 3,76h en procesar la fosforita que proviene de la Trituradora. Esto quiere decir, que durante los 12min posteriores al encendido de esta maquinaria se obtienen los 165Kg de silicato de Magnesio necesarios para el primer lote de reacción. Una vez se alimenta el reactor con esta masa, 55min después se obtiene la primera cantidad de sulfato de Magnesio, y el operario que se encuentra en el reactor (operario 2), puede ser ayudado del operario de la etapa de Molienda y Trituración (operario 1), para vaciar el primer lote producido en el reactor y supervisar su transporte al cuarto de curado, para luego retornar a las actividades de trituración y molienda. El operario 1 repite esta operación cada vez que se finalice el tiempo estimado de reacción.

Para el caso del operario 2, es necesario un total de dos operarios de este tipo, que cumpla cada uno con una jornada laboral de 8h y esté a su cargo, sólo la reacción para obtener el fertilizante sulfato de Magnesio y Superfosfato. Esto debido a que la etapa de reacción necesita supervisión constante, medición de parámetros y avance de la reacción, control de pH, temperatura, tiempo de reacción, limpieza del puesto de trabajo y de los equipos utilizados, etc.

El operario 3, durante la operación de granulación, podrá colaborar al descargue de material del reactor cada que la reacción respectiva llegue a su punto final. Esto cuando el operario 1 termine su jornada laboral.

Durante las primeras 2 horas de trabajo, el operario 3 ha terminado de granular el sulfato de Magnesio, de esta manera puede una vez finalizada la segunda reacción, granular el superfosfato triple, operación que tarda otras 2 horas aproximadamente. Sumando tiempos de transporte de material, limpieza del puesto de trabajo y mantenimiento preventivo de las máquinas, lubricación, etc., el operario 3 terminaría su turno de 8 horas.

Espacio Físico.

La disposición en planta, es un aspecto relevante para la obtención del producto final en cuanto a flujo de material, tiempos y costos, de donde se pueden distinguir dos tipos de distribuciones comunes, la distribución en planta orientada al proceso y la distribución en planta orientada al producto.

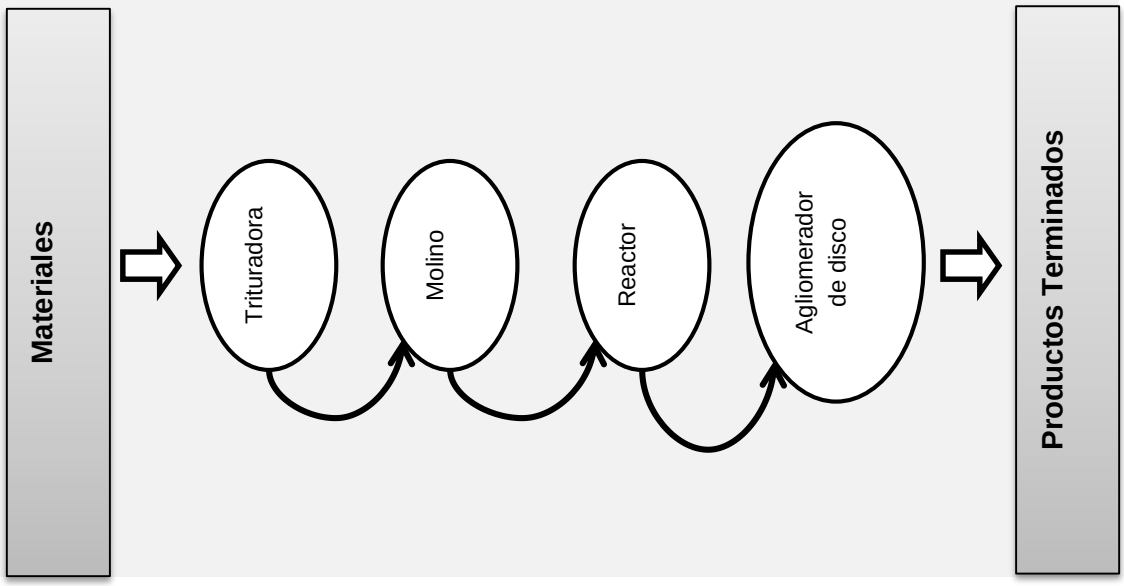


Figura 6. Representación de distribución orientada en flujo o al producto.

De acuerdo a las características de este proceso, los puestos de trabajo estarán dispuestos en flujo y el puesto de trabajo se sitúa de acuerdo a las operaciones del producto. También se puede distinguir un alto grado de homogeneidad en el producto, así como el uso de equipos especializados, por lo que la disposición en planta será del tipo orientada al producto. *En ella, los puestos de trabajo (y los equipos que estos requieran), están situados uno junto a otro, de acuerdo con la secuencia de operaciones del producto a obtener,* (Cuatrecasas Arbós, 2012).

Esta distribución en planta es importante considerarla para la orientación o ubicación de los equipos y puestos de trabajo dentro de la planta de Pulverizar S.A, así como también esta distribución debe conjugarse de acuerdo al espacio requerido y al espacio disponible en planta. El espacio requerido puede obtenerse con la información que se dispone del tamaño de los equipos y según la tabla 8, el área total ocupada por los equipos equivale a 84,97 m2.

Estación de Trabajo	Zonas y Equipo	Ancho (m)	Longitud (m)	Área (m2)
Trituración	Recepción de Materia Prima	2,86	2,86	8,18
	Triturador	0,745	0,896	0,67
	Silo	3	3	9
	Transporte de producto en proceso	1	3	3
Molienda	Molino	3,2	4,7	15,04
	Silo	3	3	9
	Transporte de producto en proceso	1	3	3
Reacción	Reactor	0,57	0,57	0,3249
	Tanque de Acido	3,20	3,20	10,25
	Cuarto de Curado	-	-	2,26
	Transporte de producto en proceso	1	3	3
Granulado	Granulador	3,6	3,6	12,96
	Transporte de producto en proceso	1	3	3
	Almacenamiento	2,2	2,4	5,28
			Área Total	84,97

Tabla 8. Espacio Requerido para la instalación de equipos en planta.

Capítulo 6. Evaluación del diseño.

El diseño fue estructurado bajo los requisitos de capacidad de producción mensual de 200 Ton/mes, el procesamiento de los diferentes materiales de cada tipo de fertilizantes en los mismos equipos y máquinas y un recurso de mano de obra polivalente y de baja intensidad.

El diseño cumple con estos requisitos, pudiendo validarse su configuración. Sin embargo, recordando lo mencionado anteriormente, acerca del sub o sobre dimensionamiento en el que podría recaer un diseño de este tipo, se evalúa el porcentaje de utilización de las máquinas y de la mano de obra, para analizar de esta manera si el diseño responde adecuadamente a estas mediciones de capacidad. Si no lo hace, se espera presentar la configuración apropiada.

El porcentaje de utilización de la maquinaria, será evaluado en los equipos de trituración, molienda, reacción y aglomeración y los porcentajes de utilización de mano de obra, serán evaluados en los operarios 1, 2 y 3 del sistema de producción presentado.

1. Capacidad de Maquinaria

Maquina	Tiempo de Utilización [h/mes]	Pérdidas de Tiempo por mantenimiento programado [h/mes]	Pérdidas de tiempo por factores organizacionales, [h/mes]	Pérdidas de tiempo por ausentismo [h/mes]	pérdidas de tiempo por factores externos [h/mes]	Tiempo disponible [h/mes]	%Utilización
Trituradora	40,114	60	4	2	2	348	12%
Molino	160,456	60	4	2	2	348	46%
Reactor	338,000	60	4	2	2	348	97%
Aglomerador	111,222	60	4	2	2	348	32%

2. Capacidad de Mano de Obra

Operarios	Tiempo de Utilización [h/mes]	Pérdidas de Tiempo por mantenimiento programado [h/mes]	Pérdidas de tiempo por factores organizacionales, [h/mes]	Pérdidas de tiempo por ausentismo [h/mes]	pérdidas de tiempo por factores externos [h/mes]	Tiempo disponible [h/mes]	%Utilización
Operario1	208	60	4	2	2	348	60%
Operario2	312	60	4	2	2	348	90%
Operario3	208	60	4	2	2	348	60%

Tabla 95. Utilización de la maquinaria y el recurso mano de obra

De esta manera la tabla 9, muestra los resultados de los cálculos mencionados y se infiere por consecuencia, que aunque el porcentaje de Utilización de la mano de obra se encuentra entre el 60% y el 90%, este es influenciado por la maquinaria asignada al operario y por tanto puede mejorar. El porcentaje de utilización de las máquinas no muestra unos porcentajes satisfactorios, respecto a la Trituradora, el molino y el aglomerador, los cuales muestran un valor de 12%, 46% y 32%, respectivamente.

Debido a esto, se decide consultar con la gerencia, la capacidad del triturador y el molino actual de Pulverizar S.A, de donde según la tabla (11), es posible llevar a cabo las operaciones de Molienda y Trituración dentro de la planta existente, sugerencia que fue aprobada por la empresa. De esta manera, las 40,11h de trituración y 160,456h de Molienda, pueden ser abarcadas. Para el caso del aglomerador se decide disminuir la capacidad de operación del equipo a 1,5 Ton/h y aumentar su porcentaje de utilización de 32% a 85%.

3. Capacidad utilizada en los Equipos de Pulverizar S.A.

Maquina	Tiempo de Utilización [h/mes]	Pérdidas de Tiempo por mantenimiento programado [h/mes]	Pérdidas de tiempo por factores organizacionales, [h/mes]	Pérdidas de tiempo por ausentismo [h/mes]	pérdidas de tiempo por factores externos [h/mes]	Tiempo disponible Total [h/mes]	Tiempo disponible para otras operaciones [h/mes]
Trituradora	470	60	4	2	2	556	86
Molino LHG	520	60	4	2	2	556	36
Molino Bradley	360	60	4	2	2	556	196

Tabla 60. Horas disponibles de trabajo en el triturador y molinos actuales de Pulverizar S.A.

Esta decisión final permite disminuir costos de infraestructura, costos de adquisición y compra de equipos, disminución en la cantidad de espacio requerido para la instalación de maquinaria y puestos de trabajo, así como prescinde de una operación necesaria pero subutilizada, llevando a cabo la trituración y molienda con los equipos existentes en la trituradora y el molino Bradley de Pulverizar S.A.

Capítulo 7.Conclusiones y Recomendaciones.

7.1. Conclusiones.

- El diseño de proceso de la planta de acidulación de silicato de magnesio y fosforita en la empresa Pulverizar S.A., permitió definir los requerimientos de equipos, mano de obra y espacio físico ocupado por los equipos, dejando para este diseño una necesidad de adquisición total de 2 máquinas (un reactor y un aglomerador), la designación de cuatro operarios al proceso y un área total de 37 m2 ocupada por el área de reacción y aglomeración.

- El diseño presentado, conjuga los conocimientos vistos dentro de la maestría en ingeniería Industrial y el pregrado de Ingeniería Química, aportando de esta manera en las decisiones estratégicas y técnicas para el montaje de una nueva planta de producción.

- La ubicación de la planta de acidulación, de acuerdo a la capacidad definida, el tamaño de los equipos y la cantidad de producto, puede ser ubicada dentro de las instalaciones de la empresa, evitando la adquisición de un nuevo terreno.

- El uso de diagramas pictóricos y de flujo permitió identificar las etapas y secuencias de las mismas en el proceso productivo, así como establecer en términos generales la clase de equipos necesarios para las operaciones productivas.

- Los factores de diseño y de seguridad abarcados dentro de este diseño facilitaron el dimensionamiento de los equipos una vez establecidos los requerimientos de materiales dados por los balances de materia.

7.2. Recomendaciones

- Es necesario tener presente que dentro de la producción de superfosfato se desprende en forma gaseosa ácido fluorhídrico, HF, por lo que la empresa debe considerar dentro del montaje de la planta un depurador de gases y hacerlos pasar por una cortina de agua en contracorriente que elimine completamente el HF. El licor ácido que se obtiene en este depurador puede neutralizarse con cal, la cual está disponible dentro de la empresa.

- La distribución de los equipos debe realizarse de acuerdo a lo dispuesto para que el flujo de los materiales muestre el paso de un equipo a otro en la secuencia establecida para cada etapa del proceso.

- La empresa debe establecer el espacio para pasillos y paso de personal en la distribución de planta.

- La empresa debe continuar con la *administración de la capacidad*, con el fin de poder prever las necesidades de evolución del proceso y poder ser competitivos constantemente dentro del mercado.

BIBLIOGRAFIA

Arnold, F. (1988). *Fertilizantes y fertilización: fundamentos y métodos para la fertilización.* Barcelona, España: Editorial Reverté.

Barahona, F., Bermon, S., Gunluk, O., & Sara, H. (2005). Robust Capacity Planning in Semiconductor Manufacturing.

Bermon, S., & Hood, S. J. (1999). Capacity Optimization Planning System. *Interfaces, 29*(5), 31-50.

Birge, J. R. (2000). Option Methods for Incorporating Risk into Linear Capacity Planning Models. *Manufacturing & Service Operations Management, 2*(1), 19-31.

Cakanyıldırım, M., & Robin O., R. (2002). Optimal Capacity Expansion and Contraction under Demand Uncertainty. *IIE transactions, 34*(5), 449-465.

Costa Lopez, J., Cervera March, S., Cunill García, F., Esplugas Vidal, S., Mans Teixidó, C., & Mata Alvarez, J. (2004). *Curso de Ingeniería Quimica.* Barcelona, España.

Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (2004). *Ingeniería Quimica.* Barcelona, España: Editorial Reverté.

Cuatrecasas Arbós, L. (2012). *Organización de la producción y dirección de operaciones: Sistemas actuales de gestion eficiente y competitiva.* Madrid: Ediciones Dias de Santos S.A.

Dominguez Machuca, J., García González, S., Alvarez Gil, M., Dominguez Machuca, M., & Ruiz Jimenez, A. (1995). *Dirección de Operaciones, aspectos Estrategicos en la Producción y los Servicios.* McGraw Hill.

Du, J., Jiao, Y. Y., & Jiao, J. (2006). A real-option approach to flexibility planning in reconfigurable manufacturing systems. *Int J Adv Manuf Technol, 28*, 1202-1210.

Elsea Kogel, J., & al, e. (2006). *Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses.* littleton, Colorado: SME, Inc.

Fogler, H. S. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Quimicas.* Pearson Educacion.

Gaither, N., &, Frazier,G. (2000). *Administración de Producción y Operaciones.* Mexico: Thomson Editores S.A.

García Castello, E. (2006). *Operaciones básicas: manual de aula.* Valencia: Editorial de la UPV.

Geng, N., & Jiang, Z. (2009). A review on strategic capacity planning for the semiconductor. *47*(13).

Gómez L, F. (1976). Algunos factores por considerar en la selección de la fuente de fósforo (P) por su alta o baja solubilidad en el agua. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA)*, 25-32.

Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufctura Moderna.* Naucalpan de Juarez: Prentice Hall.

Halbe, D. (2009). A Few General Rules for Plant Design. In D. Malhotra, P. R. Taylor, E. Spiller, & M. LeVier, *Recent Advances in Mineral Processing Plant Design* (pp. 9-14). Littleton, Colorado: SME.

Harris, L. (2009). Plant Design, What Not to Do. In M. Deepak, P. R. Taylor, E. Spiller, & M. LeVier, *Recent Advances in Mineral Processing Plant Design* (pp. 2-8). Littleton, Colorado: SME.

Heizer, J., & Render, B. (2004). *Principios de Administración de Operaciones.* Mexico: Pearson Educación.

Hopp, V. (1994). *Fundamentos de Tecnología Quimica.* Barcelona, España: Editorial Reverté.

KeKre, S., Rao, U., Sarthi, S., & Yi, J. (2004). Risk-Based Integration of Strategic and Tactical Capacity Planning. *Annals of Operations Research, 132*, 85-108.

Khasawneh, F., & Doll, E. (1978). The use phosphate rock for direct application to soil. *Adv. Agron, 30*, 159-206.

Kostin, A., Guillen Gozalbez, G., Mele, F., Bagajewicz, M., & Jimenez, L. (2012). Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty. *Chemical Engineering Research and Design, 90*, 359-376.

Krajewski, L. J., & Ritzman, L. P. (2000). *Administración de Operaciones, Estrategia y Análisis.* México: Pearson Educación.

Levenspiel, O. (2001). *Ingeniería de las reacciones químicas.* Mexico: Reverté Ediciones, S.A.

Malhotra, D., Taylor, P. R., Spiller, E., & LeVier, M. (2009). *Recent Advances in Mineral Processing Plant Design.* Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Marquez Uribe, A., Cochran, J. K., & Shunk, D. L. (2003). Two-stage simulation optimization for agile manufacturing capacity planning. *Internacional Journal of Production Research, 41*(6), 1181-1197.

Miltenburg, J. (1996). *Estrategia de Fabricación.*

Miranda, S. (2002). Curso de Quimica Industrial II. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Quimica.

Palacio Santos, L. A. (2005). *Metodos y Algoritmos de diseño en Ingenieria Quimica.* Medellin: Universidad de Antioquia.

Prasenjit, S., & Venkat, A. (2007). Evaluating Product Plans Using Real Options. *The Engineering Economist, 52*, 215-253.

Rashad, M., & Baioumy, H. (2005). Chemical processing of dolomite associated with the phosphorites for production of magnesium sulfate heptahydrate. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection* , 174-183.

Silver, E. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling.* USA: John Wiley & Sons.

Suñe Torrents, A., Gil Vilda, F., & Arcusa Postils, I. (2004). *Manual práctico de diseño de sistemas productivos.* Madrid: Ediciones Diaz de Santos S.A.

TVera, J., Casanova, E., & Sanchez, C. (1987). Evaluación de la efectividad agronómica de rocas fosfóricas modificadas (Lobatera y Riecito). *Instituto de Edafología. Jornadas Técnicas, 7*, 127-130.

Woonghee, T. H., Robin, O. R., & Metin, Ç. (2006). A General Strategic Capacity Planning Model under Demand Uncertainty. *Naval Research Logistics., 53*, 137-150.

Wu, S. D., Ercok, M., & Karabuc, S. (2005). Managing Capacity in the High Tech Industry. *Engineering Economist, 50*(2), 125-158.