

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE GRANULAR SULFATO DE AMONIO (SAM) EN LA INSTALACIÓN 390 DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO MORÓN

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Cárcamo R., Nora
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE GRANULAR SULFATO DE AMONIO (SAM) EN LA INSTALACIÓN 390 DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO MORÓN

TUTOR ACADÉMICO: Ing. Johliny Casanova
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Manuel Anaya

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Cárcamo R., Nora
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

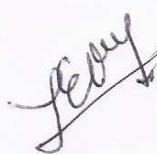
Caracas, 2012

Caracas, 19 de Marzo de 2012

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de grado presentado por la Bachiller, **Nora A. Cárcamo R.**, que tiene como título:

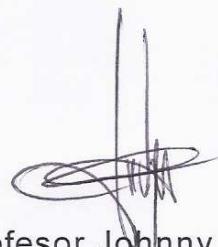
**“EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA
DE GRANULAR SULFATO DE AMONIO (SAM) EN LA
INSTALACIÓN 390 DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO MORÓN”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Titulo de Ingeniero Químico, y sin que signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran **APROBADO**.



Profesor Leonardo Oropeza

Jurado Principal



Profesor Johnny Vásquez

Jurado Principal



Profesora Johliny Casanova

Tutor Académico

Ingeniero Manuel Anaya



Tutor Industrial

A mis abuelos Manuel y Rosalba

Sé que desde el cielo, siempre me están cuidando.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Central de Venezuela por permitirme el ingreso a sus aulas y darme las herramientas para crecer profesionalmente.

Gracias al Ingeniero Manuel Anaya y a la Profesora Johliny Casanova por su enorme apoyo, brindarme su tiempo y ofrecerme una mano amiga durante la ejecución de este proyecto.

Gracias a la empresa PEQUIVEN S.A., por ofrecerme sus instalaciones, apoyo humano y técnico durante la ejecución de este Trabajo Especial de Grado.

Gracias a los Ingenieros Armando Blanco y José Revilla por brindarme su apoyo, amistad y confianza de gran importancia durante mi paso por PEQUIVEN S.A.

Gracias a los profesores de la Escuela de Ingeniería Química por su dedicación y esfuerzo al compartir sus conocimientos y permitirnos ser mejores profesionales.

A mis padres por ofrecerme siempre todo su apoyo y compresión incondicional durante mi vida, lo cual me ha permitido crecer y desarrollarme como persona y como profesional. Muchas gracias. Gracias a mi hermana, por escucharme, apoyarme y alentarme a seguir adelante. Los quiero.

Gracias a mis padrinos Ana y Armando, y a mis primos Fidel y Niurka, por brindarme su apoyo, y abrirme las puertas de sus casas especialmente durante el tiempo que estuve en PEQUIVEN, sin ustedes la ejecución de este proyecto hubiese sido casi imposible. De corazón, muchas gracias.

Gracias a Marina, por siempre estar pendiente de mi, brindarme su amor a pesar de la distancia. Gracias a Betzabeth por tu cariño, y darme felicidad a través de tus logros. Las quiero mucho.

Cárcamo R, Nora A

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-
ECONÓMICA DE GRANULAR SULFATO DE AMONIO (SAM)
EN LA INSTALACIÓN 390 DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO
MORÓN**

Tutor Académico: Prof. Johliny Casanova. Tutor Industrial: Ing. Manuel Anaya. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2012, 135 p.

Palabras Claves: Granulación, factibilidad, fertilizantes, SAM, matriz de selección, simulador, SolidSim.

Resumen. El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la factibilidad técnico-económica de la granulación de Sulfato de Amonio (SAM) en la planta de fertilizantes granulados RPA/DAP (I-390) perteneciente al Complejo Petroquímico Morón, con la finalidad de mejorar los indicadores inherentes a la producción en dicha instalación, a la vez que se crea un fertilizante con mejores características físicas en comparación con el SAM en cristales producido actualmente en dicho complejo. La metodología empleada para el desarrollo de la investigación se divide en 5 actividades generales. La primera consistió en el estudio de la operación y estado actual de la Instalación 390. La segunda en la evaluación de diversas tecnologías de granulación de SAM. En tercer lugar se determinaron las condiciones de proceso de las tecnologías propuestas, con la finalidad de seleccionar la tecnología que mejor se adecúe a la instalación existente mediante la construcción de una matriz de selección. Para la cuarta actividad se simuló el proceso por medio del uso del simulador comercial SolidSim, el cual cuenta con los equipos y datos apropiados de manejo de sólidos. Finalmente, la quinta actividad consistió en la evaluación de la factibilidad técnico-económica de la tecnología seleccionada en la I-390.

Como resultado se obtuvo que para la implantación de la tecnología propuesta en la I-390 es necesario la adquisición de dos molinos de martillo adicionales, ya que los demás equipos requeridos se encuentran en condiciones de operar, por lo cual desde el punto de vista técnico es factible llevar a cabo el proceso. Por otra parte el valor actual del proyecto es de Bs 131.198.247 y el equivalente anual de Bs 28.800.213, lo cual indica que la ejecución del proyecto es rentable.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. ANTECEDENTES	5
1.3. OBJETIVOS	8
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	8
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	8
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. FERTILIZANTES	9
2.2. PROCESO DE GRANULACIÓN	10
2.3. PRINCIPALES EQUIPOS ASOCIADOS AL PROCESO DE GRANULACIÓN DE FERTILIZANTES	11
2.3.1. <i>Preneutralizador</i> :	11
2.3.2. <i>Granulador</i> :	12
2.3.3. <i>Secador rotatorio</i> :	12
2.3.4. <i>Enfriador rotatorio</i> :	13
2.4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE GRANULACIÓN DE FOSFATO DIAMÓNICO (DAP).....	13
2.5. MECANISMO DE FORMACIÓN DE GRÁNULOS	17
2.4.1. <i>Aglomeración</i>	18
2.4.2. <i>Acreación</i>	18
2.6. SIMULACIÓN	18
2.7. DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA	19
2.6.1. <i>Valor Actual (VA)</i> :.....	21
2.6.2. <i>Equivalente Actual (EA)</i> :.....	22
2.6.3. <i>Tasa Interna de Retorno (TIR o i^*)</i> :.....	23
CAPÍTULO III	24
MARCO METODOLÓGICO	24
3.1. ESTUDIO DE LA OPERACIÓN Y ESTADO ACTUAL DE LA PLANTA DE FERTILIZANTES GRANULADOS RPA/DAP (I-390)	24
3.1.1. <i>Revisión y comprensión del proceso de producción de DAP</i>	24
3.1.2. <i>Elaboración de una lista con los equipos más importantes de la Instalación 390</i>	25
3.1.3. <i>Definición de la condición actual de los equipos pertenecientes a la I-390 y definir su condición actual</i>	25

3.2. EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE GRANULACIÓN DE SULFATO DE AMONIO	25
3.2.1. <i>Búsqueda de tecnologías sobre granulación de SAM y selección de las tecnologías que se adapten a la Instalación 390</i>	26
3.2.2. <i>Análisis y descripción detallada de las tecnologías seleccionadas</i>	26
3.2.3. <i>Comparación de las tecnologías seleccionadas a través de la elaboración de una lista de los equipos y accesorios necesarios para llevar a cabo cada uno de los procesos</i>	27
3.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO DE LAS TECNOLOGÍAS PROPUESTAS	27
3.3.1. <i>Establecimiento de las condiciones de operación según lo propuesto en cada uno de los procesos pertenecientes a la lista de tecnologías seleccionadas</i>	27
3.3.2. <i>Evaluación del comportamiento de los principales materiales de construcción de los equipos existentes en la Instalación 390</i>	28
3.3.3. <i>Selección de la tecnología a desarrollar en la I-390</i>	28
3.3.4. <i>Evaluación del funcionamiento de los equipos identificados para lograr la granulación propuesta</i>	28
3.4. SIMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA	29
3.4.1. <i>Identificación del simulador comercial que cuenta con la data necesaria para la realización de la simulación de la propuesta</i>	29
3.4.2. <i>Comprender el funcionamiento del software</i>	30
3.4.3. <i>Realizar la simulación de la propuesta seleccionada</i>	30
3.4.4. <i>Analizar los resultados de la simulación mediante la comparación con los resultados obtenidos a partir de los balances y dimensionamientos</i>	30
3.5. DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA PROPUESTA SELECCIONADA	31
3.5.1. <i>Proponer los cambios a efectuar en la instalación</i>	31
3.5.2. <i>Determinación de la factibilidad técnica de la implantación de los cambios</i>	31
3.5.3. <i>Calcular el costo y la rentabilidad de la implementación de la tecnología seleccionada en la I-390</i>	31
CAPÍTULO IV	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	32
4.1. ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA DE FERTILIZANTES GRANULADOS RPA/DAP Y ESTADO ACTUAL DE LOS EQUIPOS	32
4.1.1. <i>Estudio de la operación actual de la I-390</i>	32
4.1.2. <i>Inventario de los equipos pertenecientes a la Instalación-390</i>	32
4.2. EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE GRANULACIÓN DE SAM PROBADAS QUE SE AJUSTAN A LA LÍNEA DE PROCESO DE LA INSTALACIÓN EXISTENTE (I-390)	36
4.2.1. <i>Búsqueda y selección de tecnologías de granulación de SAM</i>	36
4.2.2. <i>Descripción de las tecnologías seleccionadas</i>	40
4.2.3. <i>Comparación y análisis de las tecnologías seleccionadas</i>	47
4.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO DE LAS TECNOLOGÍAS EN ESTUDIO	50
4.3.1. <i>Condiciones de operación de las tecnologías seleccionadas</i>	50
4.3.2. <i>Evaluación del comportamiento de los materiales de construcción empleados en los equipos existentes de la I-390</i>	54
4.3.3. <i>Selección de la tecnología a emplear</i>	62
4.3.4. <i>Evaluación del funcionamiento de los equipos necesarios para lograr la granulación propuesta</i>	65

4.4. SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PROPUESTAS	70
4.4.1. <i>Selección del simulador comercial a emplear</i>	70
4.4.2. <i>Construcción del diagrama de flujo para la simulación y resultados</i>	71
4.4.3. <i>Resultados obtenidos en la simulación</i>	75
4.5. FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA IMPLANTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA	78
4.5.1. <i>Determinación de la factibilidad técnica de la implantación de los cambios a efectuar en la instalación</i>	78
4.5.2. <i>Determinación de la factibilidad económica de realizar los cambios planteados en la Instalación 390</i>	81
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87
APÉNDICE A	91
DIAGRAMAS DE LOS PROCESOS EN ESTUDIO	91
APÉNDICE B	97
CÁLCULOS TIPO	97
1) BALANCES DE MASA Y ENERGÍA. TECNOLOGÍA E: PATENTE N° 3168437	98
2) SECADOR CO-CORRIENTE Y ENFRIADOR CONTRACORRIENTE	108
3) FACTIBILIDAD ECONÓMICA	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Equipos pertenecientes a la Instalación, material de construcción y compuestos que manejan.....	33
Tabla N° 2 Inventario de los equipos y accesorios pertenecientes a la I-390	34
Tabla N° 3 Comparación de las tecnologías de granulación de SAM evaluadas	37
Tabla N° 4 Equipos mayores necesarios para ejecutar cada una de las tecnologías propuestas.....	47
Tabla N° 5 Equipos menores necesarios para ejecutar cada una de las tecnologías seleccionadas.....	48
Tabla N° 6 Condiciones de operación de las tecnologías seleccionadas	50
Tabla N° 7 Comparación del uso que se les dará a cada equipo al implementar las diferentes tecnologías en estudio	52
Tabla N° 8 Resistencia del acero al carbono a la corrosión por soluciones de sulfato de amonio, ácido sulfúrico y urea a distintas condiciones de concentración y de temperatura.....	55
Tabla N° 9 Velocidades de corrosión del acero al carbono y del acero inoxidable en ambiente de SAM.....	56
Tabla N° 10 Resistencia del acero inoxidable 316L y 317L a la corrosión por soluciones de SAM, ácido sulfúrico y urea a distintas condiciones de concentración y de temperatura.....	57
Tabla N° 11 Comparación de la resistencia que presentarán los equipos mayores y menores al llevar a cabo los distintos procesos.....	60
Tabla N° 12 Ponderación de los criterios influyentes en el proceso de selección de tecnología	63
Tabla N° 13 Matriz de selección de tecnología	64
Tabla N° 14 Flujo másico requerido de materias primas.....	65
Tabla N° 15 Criterios empleados para el diseño de granuladores tipo tambor	66
Tabla N° 16 Evaluación del desempeño del granulador	66
Tabla N° 17 Condiciones del sólido a la entrada y salida del secador rotatorio.....	67
Tabla N° 18 Condiciones del aire caliente en la entrada y en la salida del secador rotatorio	67
Tabla N° 19 Distribución de tamaño de los granos producidos.....	68
Tabla N° 20 Condiciones del sólido a la entrada y salida del enfriador rotatorio	68
Tabla N° 21 Condiciones del aire a la entrada y salida del enfriador rotatorio	69

Tabla N° 22 Características del molino de martillo a emplear para la reducción de tamaño de las partículas gruesas	69
Tabla N° 23 Características del molino de martillo a emplear para la reducción de tamaño de las partículas de tamaño óptimo recirculadas	70
Tabla N° 24 Comparación de los simuladores comerciales.....	70
Tabla N° 25 Variables de operación empleadas como entrada para la simulación	73
Tabla N° 26 Comparación de los flujos obtenidos en la simulación del proceso	76
Tabla N° 27 Comparación de la relación de reciclo obtenida en la simulación	77
Tabla N° 28 Comparación de temperaturas obtenidas en la simulación del proceso .	77
Tabla N° 29 Flujo de Caja del proyecto en miles de Bolívares	84
Tabla N° B 1 Humedad máxima permitida y flujo másico del producto final	98
Tabla N° B 2 Distribución del tamaño de las partículas a la salida del granulador....	98
Tabla N° B 3 Composición mísica de la alimentación de materia prima en base seca.....	103
Tabla N° B 4 Condiciones del sólido a la entrada del secador	109
Tabla N° B 5 Condiciones ambientales del aire	109
Tabla N° B 6 Temperatura de entrada y salida del gas de calentamiento.....	109
Tabla N° B 7 Resultados obtenidos en el secador	115
Tabla N° B 8 Resultados obtenidos en el enfriador	116
Tabla N° B 9 Precio de los equipos presentes en la I-390	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Diagrama de bloques del proceso de granulación de DAP	15
Figura N° 2 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología A	41
Figura N° 3 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología B	42
Figura N° 4 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología C	43
Figura N° 5 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología D	44
Figura N° 6 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología E	46
Figura N° 7 Diagrama de bloques modificado del proceso descrito por la tecnología E.....	47
Figura N° 8 Diagrama de flujo del proceso en el simulador SolidSim.....	72
Figura N° 9 Mecanismo de formación del grano	73
Figura N° 10 Esquema del proceso actual manejado en la I-390	79
Figura N° 11 Esquema del proceso de granulación de SAM propuesto para la I-390	80
Figura N°A 1: Esquema del proceso descrito por la tecnología A	92
Figura N°A 2: Esquema del proceso descrito por la tecnología B.....	93
Figura N°A 3: Esquema del proceso descrito por la tecnología C.....	94
Figura N°A 4: Esquema del proceso descrito por la tecnología D	95
Figura N°A 5: Esquema del proceso descrito por la tecnología E, adaptado a la I-390	96
Figura N° B 1 Volumen de control en el área de cribado	99
Figura N° B 2 Volumen de control en el granulador.....	104
Figura N° B 3 Balance de masa y energía en el secador.....	108

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento poblacional trae consigo una mayor demanda de alimentos, fibras y combustibles. Para cubrir esta demanda es necesario aumentar el rendimiento de los cultivos, lo cual trae como consecuencia un aumento en la extracción de nutrientes de los suelos y el agotamiento de los mismos. Todo lo anterior, hace que sea necesario un incremento en la producción de fertilizantes con las características físicas y químicas apropiadas.

Por medio de la granulación se genera un producto con mejores características físicas que los fertilizantes cristalinos, ya que los cristalinos generan polvos durante las operaciones de carga y descarga, se apelmazan durante su transporte y almacenamiento, difunden hacia áreas vecinas y no pueden emplearse en mezclas físicas, debido a que se produciría segregación de las partículas y por consecuencia, una baja uniformidad de los nutrientes en el campo.

La presente investigación, tiene por objetivo principal evaluar la factibilidad técnico-económica de la granulación de sulfato de amonio (SAM) en la planta de fertilizantes granulados RPA/DAP (I-390), ubicada en el Complejo Petroquímico Morón, con la finalidad de mejorar los indicadores inherentes a la producción en dicha instalación y a la vez generar un producto más atractivo para el mercado.

La metodología empleada para el desarrollo de esta investigación, comienza con el estudio del proceso de producción de fosfato diamónico (DAP), ya que este es el proceso que se desarrolla en la I-390 actualmente, y la evaluación del estado actual de la instalación. Seguidamente, se buscaron y evaluaron las tecnologías de granulación de SAM que emplean sulfato de amonio cristalino como parte de sus materias primas, para luego determinar las condiciones de proceso de las tecnologías propuestas, con la finalidad de seleccionar la que mejor se adapta a la línea de proceso de la I-390. Una vez seleccionada la tecnología, se procedió a realizar los balances de masa y energía correspondientes para luego verificar si era posible operar con los equipos

existentes. Seguidamente, se procedió a realizar la simulación digital de la tecnología propuesta y comparar los resultados obtenidos por medio de los balances con los arrojados por la simulación, con la finalidad de conocer si dicha simulación podría ser utilizada en estudios posteriores. Finalmente, se determinó la factibilidad técnico-económica de la tecnología seleccionada, mediante discusiones con los ingenieros de proceso encargados y por medio de la aplicación del modelo económico de valor actual y de equivalente anual, para determinar la rentabilidad del proyecto propuesto. Se determinó que la implantación de la tecnología seleccionada en la Instalación 390 es factible tanto técnica como económica.

Para una mejor comprensión, el trabajo se estructuró en cuatro capítulos. En el primero, se presenta el planteamiento del problema, los antecedentes y los objetivos de la investigación. En el capítulo II se encuentran los fundamentos teóricos que han servido como base para el desarrollo de la investigación. El capítulo III describe detalladamente la metodología a utilizar para el logro de los objetivos planteados. En el capítulo IV se presentan los resultados obtenidos y la discusión de los mismos. Finalmente, se indican las conclusiones de este trabajo y las principales recomendaciones realizadas a la empresa.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se presenta el planteamiento del problema objeto de estudio, así como el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación. En esta sección, también se muestran los antecedentes que servirán de apoyo en este Trabajo Especial de Grado.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sulfato de amonio (SAM) es un compuesto químico que puede ser utilizado como fertilizante debido a sus propiedades físicas y químicas favorables, siendo una manera económica para suplir nitrógeno. Además de esto, el SAM provee azufre en forma de sulfato lo que permite que pueda ser tomado directamente por las plantas. El nitrógeno y el azufre tienen una relación muy estrecha en el papel nutricional de las plantas, esto se debe a que ambos nutrientes son constituyentes de las proteínas y están asociados con la formación de la clorofila.

En el Complejo Petroquímico de Morón (CPM) se produce SAM en forma de cristales, siendo esta forma de fertilizantes más polvorrientas, más difíciles de secar, manejar y utilizar, en comparación con los fertilizantes granulados. Este complejo petroquímico forma parte de Pequiven (Petroquímica de Venezuela, S.A.), la empresa del Estado que se encarga de producir y comercializar productos químicos y petroquímicos para los mercados tanto nacional como internacional.

El mayor progreso en la industria del fertilizante mezclado es la granulación, ya que a partir de este proceso se elaboran fertilizantes en los que al menos 90% de sus partículas presentan tamaños entre 1 y 4 mm, esta presentación permite un manejo más cómodo, un mejor funcionamiento de las abonadoras, una dosificación más exacta y una distribución más uniforme sobre el terreno, además por poseer mayor

peso, se mantienen en los sitios pre establecidos sin mayor difusión a áreas vecinas, se disuelven más lentamente proporcionando al suelo el nutriente en una forma racionada; mientras que los cristalinos quedan a expensas del viento al momento de aplicarlos, producen una mayor cantidad de terrones durante su almacenamiento y posterior traslado en los envases o sacos, por lo que su transporte a larga distancia no es viable. Por estas razones, los fertilizantes granulares favorecen tanto al productor como al consumidor desde el punto de vista físico y económico (Petroquímica de Venezuela S.A., 2007).

Por lo antes expuesto, se requiere estudiar la posibilidad de granular el SAM, para de esta manera crear un producto más atractivo para el mercado nacional e internacional, ya que el mismo podría ser transportado largas distancias sin que se presente formación de terrones durante el almacenamiento y posterior traslado. Incluso se podría exportar a otros países de América del Sur que actualmente importan este producto de países europeos.

Actualmente en el CPM se produce SAM cristalino en la Instalación 330 (I-330), pero es necesario granularlo por las razones antes expuestas, para esto se plantea la posibilidad de realizar la granulación en la Instalación 390 (I-390) debido a que el factor de servicio de esta instalación se encuentra por debajo de lo establecido en el diseño para la producción de fosfato diamónico (DAP) granulado, sin embargo debido a problemas en el suministro de parte de las materias primas, la producción de dicha instalación se encuentra por debajo de la producción deseada. Es por este motivo que se desea evaluar la factibilidad técnica y económica de emplear la I-390 para realizar el proceso de granulación de SAM, y de esta manera aumentar el factor de servicio de la instalación a la vez que se crea un nuevo producto en el mercado nacional de fertilizantes. Para esto es necesario realizar una investigación sobre las tecnologías existentes de granulación de SAM, y evaluar cuál o cuáles de estas tecnologías se adaptan mejor a la instalación existente, esto se llevará a cabo mediante el estudio de factibilidad técnico-económica con la finalidad de determinar cuál de estas tecnologías es la más viable para ser implementada en la I-390.

1.2. ANTECEDENTES

Entre los antecedentes de esta investigación, se tienen aquellos trabajos que permiten establecer las bases teóricas y metodológicas para la realización del estudio de factibilidad técnico-económica.

Uno de estos trabajos es el de William Fung (2008), quien evaluó la factibilidad técnico-económica de colocar un sistema de recuperación del amoníaco proveniente de los gases de salida de la sección de saturación de la planta de sulfato de amonio (I-330) del CPM, con la finalidad de aumentar la rentabilidad del proceso y disminuir la emisión de amoníaco al ambiente. En esta investigación se evaluaron cuatro alternativas: (a) purificación de amoníaco haciendo uso de membranas permeables, (b) recuperación de amoníaco mediante resinas de intercambio iónico, (c) instalación de lavadores de gases y (d) la instalación de condensadores de vapor. La escogencia de la tecnología se realizó mediante la construcción de una matriz de selección, la cual toma en cuenta características tecnológicas, operacionales y económicas de las diferentes tecnologías dándole a cada una distintas ponderaciones. Como resultado se obtuvo que la tecnología de condensadores de vapor era la más adecuada para ser implementada, obteniendo el mayor puntaje en la matriz de selección. Una vez seleccionada la tecnología se realizaron los cálculos de indicadores económicos (Valor Presente Neto y Tasa Interna de Retorno) y de diseño necesarios para la implementación de la misma en la planta de sulfato de amonio.

La similitud más relevante entre este antecedente y el presente trabajo, es el método de selección de tecnología empleado y el análisis de factibilidad técnico-económica de la implantación de la misma.

Además del estudio mencionado anteriormente, también se tiene la investigación de Carlos Jaimes (2009), la cual tuvo como objetivo principal evaluar la factibilidad técnico-económica de la adaptación de la tecnología WSA (Wet Gas Sulphuric Acid) de producción de ácido sulfúrico en la instalación 215 del CPM con la finalidad de reducir su impacto ambiental. Para llevar a cabo esta investigación fue necesario realizar un diagnóstico de la planta, y de esta manera determinar los equipos

existentes que podrían ser empleados usando la nueva tecnología, los equipos que habría que adquirir, y aquellos equipos existentes que necesitaban ser modificados antes de poder ser usados; para luego realizar un estudio económico de la adaptación de esta tecnología. Como resultado se obtuvo que la implantación de esta tecnología en la instalación existente posee una Tasa Interna de Retorno de 54,27%. Esta tasa es mayor que la tasa mínima de rendimiento del Banco Central de Venezuela para el 2009, la cual era de 17,1%, esto implica que para el momento de la evaluación, era rentable invertir el dinero en ese proyecto.

Este estudio se relaciona con el presente en la metodología empleada para realizar el estudio de factibilidad técnico-económica, ya que en el mismo se estudia la factibilidad de la implantación de una tecnología diferente en una instalación existente.

Por otra parte, también se cuenta con las investigaciones que se han realizado en el área de granulación de SAM, y aunque estas fueron realizadas entre los años 1965 y 1986, las mismas se estudiarán con el propósito de identificar cuál de estos procesos se adapta mejor a la instalación existente.

Por último se tiene la investigación de Arthur Galloway (1965), el cual propone un proceso para producir fertilizante granular a partir de sulfato de amonio en cristales y yeso como material de relleno, también se añade un componente biológicamente activo en caso de requerir características pesticidas en el producto final. Este proceso se realiza en los equipos convencionales de granulación de fertilizantes, una vez obtenido los gránulos, éstos son enviados a un secador, en el cual el material sólido se pone en contacto co-corriente con un flujo de aire caliente. Luego los granos producidos se enfrián y se muelen para formar polvo fertilizante, finalmente es clasificado por tamaño y los granos de tamaño óptimo serán el producto final, mientras que los gruesos y finos se recirculan al proceso de granulación.

Gordon Hicks (1969), propone un proceso de básicamente dos pasos: (a) neutralización parcial del ácido sulfúrico para preparar una solución caliente (300°F), y (b) finalización del proceso de neutralización con granulación simultánea

en un granulador rotatorio. Este proceso se puede llevar a cabo mezclando el ácido sulfúrico con soluciones de sulfato de amonio. Los gránulos resultantes del proceso de granulación no requieren secado posterior, pero debido a las altas temperaturas a las que sale el producto, es necesario un paso de enfriamiento, en el cual se hacen pasar los gránulos a través de un tambor rotatorio por el cual circula aire a temperatura ambiente en un flujo en contracorriente. Finalmente el producto pasa a través de un proceso de clasificación donde los finos y gruesos se recirculan al sistema y el material dentro del tamaño deseado pasa a ser el producto final.

Joseph Wilson (1970), propone de manera general el siguiente proceso: Se añade una solución acuosa de ácido sulfúrico a los cristales de sulfato de amonio en el granulador, luego la mezcla pasa al *amonizador* donde se agrega amoníaco para terminar la neutralización. A pesar de que el proceso es explicado usando equipos diferentes para la granulación y posterior neutralización con el amoníaco, estos podrían combinarse en un solo tambor rotatorio. Debido a las altas temperaturas que se alcanzan al completarse la neutralización, no es necesario un paso posterior de secado. El producto seco pasa a un proceso de clasificación, en donde el material de tamaño deseado se separa de los gruesos y finos, los cuales son recirculados al proceso. Los gránulos resultantes son fuertes, secos, blancos y prácticamente 100% SAM.

Horace Mann (1974), propone un método de granulación mezclando soluciones de urea con partículas de SAM, esta mezcla es introducida en un granulador, luego las partículas granuladas pasan al proceso de enfriado, en donde se introducen en un tambor rotatorio en el cual los gránulos calientes se ponen en contacto con una corriente de aire, los granos resultantes pasan al proceso de clasificación en donde las partículas de tamaño deseado se retiran y los finos y gruesos se recirculan al proceso.

Cecil Harrison y Cullen Tittle (1986), proponen un proceso para granular SAM cristalino que consiste en alimentar el ácido sulfúrico junto con el SAM y material de reciclo en el granulador, añadiendo simultáneamente amoníaco para llevar a cabo la neutralización del ácido. El material granulado pasa hacia el secador, por donde se

hace pasar aire caliente junto con gases de combustión en flujo contracorriente. El material secado pasa al enfriador, en el cual aire a temperatura ambiente fluye en contracorriente a través de un tambor rotatorio, luego los gránulos enfriados pasan al clasificador, los finos se reciclan y los gruesos se muelen y pasan al reciclo.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnico-económica de la granulación de Sulfato de Amonio (SAM) en la planta de fertilizantes granulados RPA/DAP (I-390) con la finalidad de mejorar los indicadores inherentes a la producción en dicha instalación.

1.3.2. Objetivos específicos

- (a) Estudiar la operación de la planta de fertilizantes granulados RPA/DAP, así como el estado actual de los equipos, con el fin de conocer los principales puntos de atención del proceso.
- (b) Evaluar tecnologías de granulación de SAM probadas que se ajusten a la línea de proceso de la instalación existente (I-390).
- (c) Determinar las condiciones de proceso de las tecnologías en estudio con el fin de conocer su viabilidad para ser usadas en la I-390.
- (d) Simular la tecnología propuesta mediante el empleo de un software comercial, y de esta manera validar la información presentada.
- (e) Determinar la factibilidad técnico-económica de la tecnología seleccionada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los aspectos teóricos relacionados con el presente Trabajo Especial de Grado que serán de importancia para el entendimiento y desarrollo del mismo.

2.1. FERTILIZANTES

Los fertilizantes son definidos por Meléndez y Molina (2003) como materiales que contienen nutrientes para las plantas ejerciendo diversos efectos favorables sobre ellas, tales como incrementar el crecimiento y productividad de los cultivos y mejorar la calidad de la cosecha y la sanidad de la planta. También tienen un efecto positivo sobre el suelo mediante el mejoramiento y restitución de la fertilidad de los mismos. Los fertilizantes se encuentran entre los principales insumos utilizados en la agricultura debido al impacto positivo que tienen sobre la producción.

El mercado de los fertilizantes no solo responde a su contenido de nutrientes, sino también a su calidad física. Una buena condición física le asegura al consumidor una aplicación al campo más fácil, rápida, uniforme y menos costosa. También es importante que los fertilizantes no se aglomeren y que no generen polvos. Muchas técnicas de producción, incluyendo varios tratamientos para acondicionar los fertilizantes han sido desarrolladas especialmente para proveer propiedades físicas más favorables (IFDC; UNIDO, 1998).

Entre los principales tipos de fertilizantes se tienen (Meléndez y Molina, 2003):

- (a) Fertilizante simple: Fertilizante que contiene solamente un nutriente.
- (b) Fertilizante compuesto: Fertilizante que contiene dos o más nutrientes.

- (c) Mezcla física: Es un fertilizante que resulta de la mezcla mecánica de dos o más materiales fertilizantes, sin que ocurran reacciones químicas.
- (d) Fertilizante químico: Usualmente se refiere a un producto que contiene dos o más nutrientes y que ha sido fabricado mediante reacción o mezclado químico de materias primas. El fertilizante químico es un material muy homogéneo en composición química. También se le denomina fertilizante complejo.
- (e) Fertilizante granular: Fertilizante formado por partículas de gránulos de tamaño variable y cuyo diámetro oscila entre 1 y 4 mm.
- (f) Fertilizante perlado: Presenta granulación esférica formada mediante solidificación de gotas durante su caída libre en el aire u otro material fluido.
- (g) Fertilizante líquido: Incluye fertilizantes total o parcialmente en solución y puede considerarse como un líquido.

2.2. PROCESO DE GRANULACIÓN

El término granulación se aplica generalmente a muchos procesos en el campo de fertilizantes, farmacéutica, cerámica y otros. Estos procesos difieren marcadamente en el tipo y forma de las corrientes de alimentación, el tipo de equipo en el cual las partículas crecen y la manera en la cual las partículas individuales aumentan su tamaño (Han y Wilenitz, 1970).

Los fertilizantes granulares pueden tener uno o más de los nutrientes primarios (nitrógeno, fósforo y potasio) y varios niveles de elementos secundarios y micronutrientes. Por lo tanto ellos pueden ser usados como fertilizantes en su forma granular inicial o pueden ser mezclados con otros materiales antes de ser aplicados. El propósito de la granulación de fertilizantes es asegurar que el producto (Universidad de Carabobo; CEPET, s.f):

- (a) Fluya libremente para facilidad en la carga y descarga.
- (b) No se aterrone severamente durante su transporte o almacenamiento.

- (c) Sea lo suficientemente fuerte para resistir manejo mecánico sin una ruptura significativa de los granos individuales.

Cuando durante el proceso de granulación ocurren reacciones químicas se dice que ocurre una granulación química. Para este proceso, las reacciones entre amoníaco, ácido y algunos materiales sólidos producen una considerable cantidad de calor y los ingredientes líquidos de la reacciones son altamente beneficiosos en la promoción de la aglomeración de los ingredientes sólidos. El agua y vapor pueden adicionarse durante la granulación para obtener la temperatura deseada y las condiciones de humedad para una óptima granulación. El dispositivo más común de granulación es el granulador-amoníador de la TVA (por sus siglas en inglés Tennessee Valley Authority) (Universidad de Carabobo; CEPET, s.f.).

Otra forma de producir fertilizante granulado es por medio de la granulación por vapor, en este proceso se emplea vapor (y en muchos casos agua) para ayudar a solubilizar, ligar y compactar materiales en polvo en aglomeraciones o gránulos. Frecuentemente el equipo empleado para la granulación es un tambor rotatorio. En estos procesos ocurren pocas o ninguna reacciones químicas entre los materiales. En la mayoría de los casos se opera con un nivel de humedad en el granulador en el orden del 3% al 10%.

2.3. PRINCIPALES EQUIPOS ASOCIADOS AL PROCESO DE GRANULACIÓN DE FERTILIZANTES

2.3.1. Preneutralizador:

Es una unidad tipo tanque agitado en la cual el ácido y el amoníaco reaccionan parcialmente antes de ser alimentados al granulador. Este equipo se emplea cuando es necesario hacer reaccionar una gran cantidad de ácido con amoníaco y el nivel de reacción supera el que puede ser llevado a cabo por reacción directa en el granulador.

Generalmente cuando se usa el preneutralizador, se requiere secado para disminuir los niveles de humedad en el producto terminado. El desarrollo más significativo en este sentido está enfocado en el mejoramiento de las técnicas de

preneutralización para utilizar de una manera más efectiva el calor de la reacción química y producir un lodo relativamente seco, que requiera muy poco o ningún secado posterior y que pueda fluir sin mayor dificultad (Universidad de Carabobo; CEPET, s.f).

2.3.2. Granulador:

El granulador de tambor consta de un cilindro rotatorio inclinado impulsado por una unidad motriz de velocidad variable. La inclinación del tambor puede ser hasta de 10 grados con relación a la horizontal, basta para asegurar que el material se deslice a todo lo largo del mismo. El cilindro puede ser de extremo abierto, o bien contar con anillos de retención en cada extremo. Dentro del tambor se humedece el material alimentado rociando líquido sobre la carga que gira dentro del tambor o introduciendo el mismo bajo el lecho de sólidos por medio de las tuberías de un distribuidor horizontal de salidas múltiples.

La aglomeración óptima en equipos de tambor se obtiene cuando se asegura en la carga el movimiento correcto de volteo o cascada. Este movimiento se origina gracias a la fuerza centrífuga y está relacionado con la velocidad crítica del granulador (Perry, 1998).

2.3.3. Secador rotatorio:

Estos equipos consisten en un cilindro que gira sobre cojinetes apropiados, generalmente, tienen una leve inclinación con la horizontal. La longitud del cilindro varía de 4 a más de 10 veces su diámetro. Los sólidos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él debido a la rotación, al efecto de la carga y a la pendiente del cilindro, y se descargan por el otro extremo como producto acabado. Estos equipos se clasifican como directos e indirectos. Estos nombres se refieren al método de transmisión de calor, que es “directo” cuando el calor se aplica por intercambio directo entre estos y el gas circulante, e “indirecto” cuando el medio de calentamiento no tiene un contacto físico con los sólidos y se separa de ellos por medio de un tubo o pared metálica (Perry, 1998).

Los secadores rotatorios de calor directo están equipados comúnmente con aspas en el interior, para levantar y dejar caer los sólidos a través de la corriente de gas a su paso por el cilindro.

Dependiendo de la forma en que fluyan las corrientes al interior del secador, estos pueden clasificarse como secadores de flujo paralelo o de flujo en contracorriente. En los secadores de flujo paralelo, el fertilizante viaja a través del equipo en forma paralela al aire calentado que seca. Cuando se trata el fertilizante a través de un secador a contracorriente, el material se introduce a la unidad en el extremo más frío y se encamina hacia la cámara de combustión. La mayoría de los secadores empleados en la industria de fertilizantes son del tipo de flujo paralelo (Sauchelli, 1966).

Forman un grupo muy importante de secadores ya que son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperlos (Geankoplis, 1998).

2.3.4. Enfriador rotatorio:

El diseño de los enfriadores difiere muy poco del diseño del secador. La principal función del enfriador según Sauchelli (1966), es la de disminuir la temperatura de los gránulos conforme se expulsan del secador, para prepararlos para el almacenamiento inmediato y el embarque final. Al igual que en el caso de los secadores, los enfriadores se pueden clasificar como: directos o indirectos, paralelos o a contracorriente. Sin embargo en la industria de fertilizantes, los enfriadores son casi sin excepción, del tipo directo en donde el aire ambiente se pone en contacto íntimo con los materiales granulares, y emplean flujo de tipo contracorriente.

2.4. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE GRANULACIÓN DE FOSFATO DIAMÓNICO (DAP)

El proceso general de producción de DAP es el siguiente: el ácido fosfórico (H_3PO_4) reacciona con el amoníaco (NH_3) en un preneutralizador donde la relación molar $NH_3:H_3PO_4$ se controla alrededor de 1,4 ya que esta relación corresponde al

punto de mayor solubilidad del fosfato de amonio, obteniendo un lodo muy concentrado con una fluidez adecuada para ser manejado por las bombas.

El calor de la reacción eleva la temperatura del lodo formado hasta su punto de ebullición (alrededor de 115 °C) y evapora algo de humedad. Este lodo caliente conteniendo entre 16% y 20% de agua se bombea al granulador, en donde se añade más amoníaco para incrementar la relación molar a un valor de aproximadamente 2. Dentro del granulador se genera más calor lo cual ocasiona que se evapore una mayor cantidad de humedad, disminuyendo la solubilidad, lo cual ayuda a la granulación. Los granos húmedos que salen del granulador son secados y luego clasificados según su tamaño, el producto que se encuentra dentro del tamaño deseado se enfriá, los finos y los gruesos molidos son recirculados al proceso, siendo la relación usual de reciclo de 5:1.

Tanto en el granulador como en el preneutralizador se desprenden cantidades importantes de vapor de agua, amoníaco y polvo, estos gases se envían al sistema de lavado, en el cual se emplea ácido fosfórico diluido para recuperar el amoníaco y los polvos de fertilizante desprendidos. A esta mezcla se le denomina licor de lavado, el cual se reincorpora al sistema al añadirse al preneutralizador. En la Figura N° 1 se puede observar un diagrama de bloques del proceso de producción de DAP granular.

Para un mejor entendimiento del proceso, el mismo se puede dividir en 5 áreas operacionales, las cuales son:

Área 1. Dosificación de la materia prima:

Esta área está constituida por los tanques de almacenamiento temporal de ácido fosfórico y de licor de lavado y por el silo en el cual es almacenada la roca fosfática necesaria para la producción de RPA (Roca Parcialmente acidulada). En esta sección se almacena temporalmente la materia prima para luego ser dosificada al proceso por medio de correas transportadoras, bombas y tuberías.

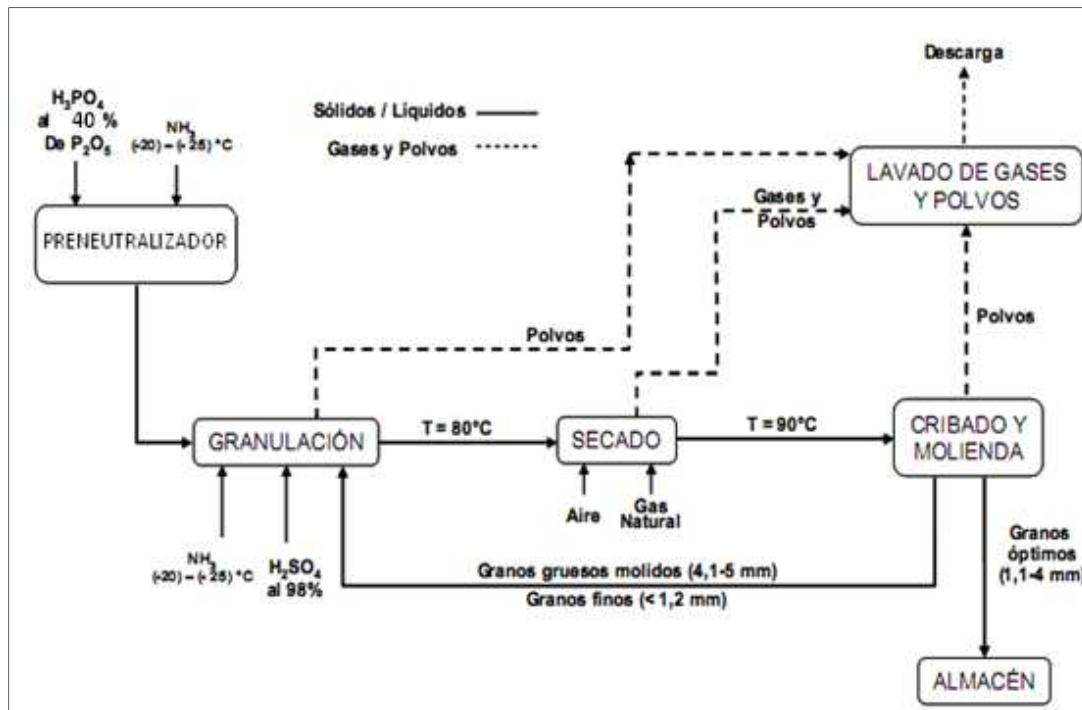
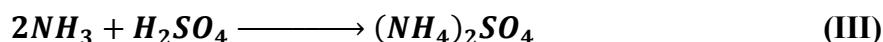
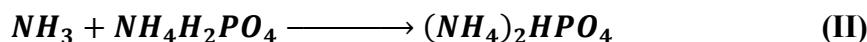
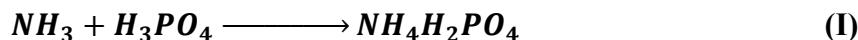


Figura N° 1 Diagrama de bloques del proceso de granulación de DAP

Área 2. Preneutralización y Granulación:

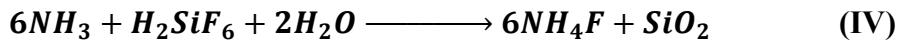
Preneutralización:

En el preneutralizador ocurren las reacciones entre el amoníaco y el ácido fosfórico (40% P_2O_5):



Siendo la reacción (I) una reacción intermedia, y la (III) una reacción no deseada que se lleva a cabo paralelamente al reaccionar las trazas de ácido sulfúrico presentes en el ácido fosfórico, siendo ésta una reacción que posee gran selectividad. Todas estas reacciones son exotérmicas y generan grandes cantidades de calor.

Además de estas reacciones, ocurren otras de menor importancia debido a trazas existentes en el ácido fosfórico, tales como flúor en la forma de ácido fluosilícico, el cual reacciona con el amoníaco de la manera descrita por la reacción (IV):



Durante la preneutralización se produce un lodo formado en mayor proporción por Fosfato Monoamónico (MAP), Fosfato Diamónico (DAP) y Sulfato de Amonio (SAM), es necesario mantener una agitación que garantice homogeneidad en el medio. Otros parámetros de control son la densidad y la relación molar $\text{NH}_3:\text{H}_3\text{PO}_4$. En el preneutralizador también se adiciona el licor de lavado proveniente de la depuración de los gases, esto se hace con el fin de mantener la densidad y utilizar el amoníaco recuperado en el sistema de lavado de gases.

Granulación:

Este lodo es bombeado hasta el granulador, donde se adiciona más NH_3 con el fin de terminar la neutralización del ácido. También se añade ácido sulfúrico (H_2SO_4) el cual ayuda al proceso de granulación mediante la adición de calor de reacción lo que evapora parte del agua contenida en el medio y completa la formulación deseada, al fijar parte del amoníaco adicionado convirtiéndolo en SAM. El granulador también es alimentado por el reciclo el cual está compuesto por finos, gruesos pulverizados y producto óptimo que garantiza una relación fase líquida/sólida idónea para la granulación.

Área 3. Recuperación y lavado de gases:

En esta área se lavan los gases extraídos del preneutralizador, granulador, secador, y los provenientes de los diferentes puntos de aspiración de polvo de la planta. La función de estos lavadores es limpiar los gases que saldrán a la atmósfera por la chimenea, y al mismo tiempo recuperar el amoníaco que se desprende en forma de gas, conjuntamente con los gases de combustión y polvos de fertilizante.

Área 4. Secado:

El material procedente del granulador entra al secador rotatorio y se pone en contacto en co-corriente con un flujo de aire caliente a aproximadamente 230 °C, este flujo está formado por los gases provenientes del horno y aire a temperatura ambiente, los cuales son introducidos dentro del equipo a través de un ventilador de tiro inducido.

Área 5. Clasificación y molienda:

El producto que sale del secador, es alimentado a las cribas, las cuales están provistas de mallas superpuestas, donde ocurre la separación de acuerdo al tamaño de las partículas.

- (a) Gruesos: poseen tamaños superiores a 4mm, se separan en la primera malla y son enviados al molino, donde se trituran y descargan al reciclo.
- (b) Óptimos: presentan tamaños entre 1-4mm, se separan en la segunda malla y pasan al dosificador de reciclo.
- (c) Finos: poseen tamaños menores a 1mm, constituyen parte del reciclo del proceso.

2.5. MECANISMO DE FORMACIÓN DE GRÁNULOS

El método empleado para la formación del gránulo tiene un gran impacto en el diseño y operación del equipo de proceso de granulación. Un buen conocimiento de los principales mecanismos de formación de gránulos, crecimiento y consolidación es esencial en determinar las características de diseño del proceso de granulación (IFDC; UNIDO, 1998).

El crecimiento del conglomerado se logra de dos maneras bien definidas, la aglomeración y la acreción.

2.5.1. Aglomeración

Es el crecimiento del conglomerado mediante la adhesión del material de alimentación y/o reciclaje, e incluye la formación de los núcleos del conglomerado (Perry, 1998).

La aglomeración se produce debido a 2 razones: primero, la tensión superficial del líquido une las partículas sólidas humedecidas y las mantiene unidas; y la fuerza mecánica que pone en contacto las partículas a medida que el granulador gira. Estas dos fuerzas trabajan juntas y deben ocurrir simultáneamente. Dentro del granulador, la tensión superficial causa que las partículas humedecidas tiendan a adherirse unas con otras dando como resultado granos con cierto grado de plasticidad. La continua colisión de las partículas debido a la acción rotatoria causa que crezcan hasta llegar al tamaño deseado. La cementación de los gránulos se deriva de las sales en solución, las cuales al evaporarse el agua forman puentes salinos que le dan la forma final del grano (INTEVEP, 1995).

2.5.2. Acreación

Es la deposición de láminas de materias primas sobre núcleos previamente formados. El proceso de acreación requiere razones de reciclo superiores y un menor contenido de humedad que el proceso de aglomeración (Perry, 1998).

En la producción de DAP donde no se agregan materias primas sólidas, la formación del grano se produce principalmente por acreación. Los granos producidos por este mecanismo tienen la característica de poseer mejores propiedades físicas que los formados por aglomeración (INTEVEP, 1995).

2.6. SIMULACIÓN

La simulación digital de procesos está definida por González (2000) como una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora, estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las

cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real.

Castro y Torres (2002) aseguran que para analizar procesos, buscando mejorarlos, el ingeniero requiere de una descripción matemática, es decir, realizar una simulación de las innovaciones propuestas. Una simulación por computadora, puede ser usada para: (a) predecir el efecto de cambiar condiciones de operación, de la disposición y la capacidad física; (b) efectuar balances de masa y energía en forma rápida y segura; (c) tener conocimiento del comportamiento del sistema completo; (d) mejorar el control e investigar la factibilidad de un control por computadora; (e) facilitar cálculos costosos; (f) controlar el presupuesto, planeando operaciones y (g) finalmente guiar y adiestrar a los operadores e ingenieros de proceso.

Los simuladores usados para procesos fluidos no pueden ser utilizados para la simulación de procesos sólidos, ya que la información de los compuestos y sus tamaños no está conectada, lo cual acarrearía errores en los resultados (SolidSim, 2011).

2.7. DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD ECONÓMICA

Según Giugni y colaboradores (2005) la factibilidad económica o rentabilidad de un proyecto es una medida que permite conocer de manera anticipada el resultado global de la operación del mismo, desde un punto de vista económico. Por esta razón es necesario conocer la totalidad de los flujos monetarios asociados, la duración del proyecto (el período expresado en años para el cual se desea conocer la rentabilidad de la inversión capital) y el efecto de la tasa de interés.

La estimación de los flujos monetarios se refiere a la determinación por anticipado de esos costos e ingresos, éstos se estiman sobre la base de eventos futuros tales como demanda, ventas, obsolescencia, inflación, políticas gubernamentales, que claramente están sujetos a variaciones e incertidumbre.

Entre los principales flujos monetarios asociados con un proyecto definido por Giugni y colaboradores (2005) se identifican los siguientes:

- (a) La inversión inicial (II): se define como el conjunto de desembolsos necesarios para la adquisición y adecuación de las facilidades de producción. Está compuesto por el capital fijo y el capital de trabajo.
- (b) Los costos operacionales (Cop): incluyen todos los desembolsos que se requieren para que el proyecto una vez puesto en marcha continúe operando normalmente.
- (c) Los ingresos brutos (IB): representan el producto de las ventas de los bienes producidos y/o servicios prestados. Para su determinación es necesario conocer tanto el precio de venta del bien como el volumen de los mismos vendidos cada año.
- (d) El valor residual (VR): es la remuneración neta obtenida por la venta de los activos fijos tangibles. Usualmente ocurre al final de la vida del proyecto.

El flujo monetario neto (F_t) es la sumatoria algebraica de los flujos monetarios de un proyecto al final del año t . En consecuencia, si para cada año t los flujos monetarios de un proyecto son: Capital fijo (CF_t), Capital de trabajo (CT_t), Ingresos Brutos (IB_t), Costos operacionales (Cop_t) y Valor residual (VR_t), entonces, para cada año, el flujo monetario neto se determina por medio de la Ecuación N° 1:

$$F_t = IB_t - Cop_t - CF_t \pm CT_t + VR_t \quad \text{Ecuación N° 1}$$

Por lo que la convención usual de signos determina que: se le asigna signo positivo (+) a todo flujo que represente un ingreso para el proyecto, y signo negativo (-) a todo flujo que represente un egreso para el proyecto.

La inversión inicial se puede estimar mediante el uso del factor de Lang, en donde los costos de todos los equipos se suman y se multiplican por un factor determinado, siendo este de 3,1 para plantas de procesos sólidos o de 3,63 para plantas que manejan fluidos y sólidos, y de 4,74 para plantas de fluidos. Estos estimados se usan frecuentemente en etapas preliminares de ingeniería. El factor de Lang incluye todo lo involucrado en el diseño y construcción de la planta. Durante las

primeras etapas de diseño de planta, el nivel de detalle del proceso no permitirá obtener un estimado preciso, por lo cual se puede añadir un porcentaje para cubrir las deficiencias en la estimación (Baasel, 1976).

Una vez que se culmina el proceso de estimación de los flujos monetarios, cada uno de los proyectos de inversión se tienen expresados en términos de todos sus costos e ingresos asociados. De este modo se hace imposible determinar, a simple vista, el atractivo económico de cada proyecto y menos aún determinar cuál es mejor, en consecuencia surge la necesidad de utilizar un modelo que resuma de alguna manera el valor monetario de cada proyecto y a la vez facilite la comparación entre ellos (Giugni y colaboradores, 2005).

La Ingeniería Económica utiliza, para determinar la rentabilidad de los proyectos de inversión, los siguientes modelos:

- (a) El valor actual.
- (b) El equivalente anual.
- (c) La tasa interna de retorno.

Estos modelos relacionan los recursos monetarios utilizados con las cantidades de dinero generadas, con el objeto de cuantificar los potenciales beneficios o pérdidas. Sin embargo, en un momento determinado pueden privar otros criterios tales como: (a) Criterios tecnológicos, relacionados con el suministro y utilización de insumos, equipos, asistencia técnica, etc; (b) Criterios financieros, relacionados con la obtención y uso de los fondos necesarios para realizar la inversión; (c) Factores intangibles o cualitativos, consideraciones legales, políticas, sociales, imagen de la empresa, etc.

A continuación se presenta una descripción más detallada de cada uno de los modelos de rentabilidad económica según Giugni y colaboradores (2005):

2.6.1. Valor Actual (VA):

Expresa la rentabilidad de un proyecto de inversión en forma de una cantidad de dinero en el presente ($t=0$), que es equivalente a los flujos monetarios netos del

proyecto a una determinada tasa mínima de rendimiento. Representa el beneficio o pérdida equivalente en el punto cero de la escala de tiempo.

De acuerdo con la definición anterior el valor actual se calcula actualizando todos los flujos monetarios netos del proyecto de acuerdo a la Ecuación N° 2.

$$VA(i) = \sum_{t=0}^n Ft(1+i)^{-t}$$

Ecuación N°2

El valor actual puede ser mayor, menor o igual que cero, por lo que si:

$VA > 0$ los ingresos del proyecto superan a los costos. El proyecto genera un beneficio superior al mínimo exigido.

$VA = 0$ los ingresos y los costos del proyecto son iguales, por lo que el proyecto genera un beneficio igual al mínimo exigido.

$VA < 0$ los costos del proyecto son superiores a los ingresos. En este caso el proyecto reporta una pérdida, es decir, no se logran cubrir todos los costos a ese valor de la tasa mínima de rendimiento.

Si el rendimiento mínimo exigido (i_{min}) cambia, entonces cambia también el valor actual del proyecto, en términos generales, un aumento de la i_{min} produce disminuciones del valor actual.

2.6.2. Equivalente Actual (EA):

Es un modelo de características muy similares al valor actual por cuanto expresa la rentabilidad de un proyecto en forma de una serie anual uniforme que es equivalente a los flujos monetarios netos del proyecto a una determinada tasa mínima de rendimiento, representa el beneficio o pérdida equivalente en forma de una serie anual uniforme. El equivalente anual se calcula mediante la Ecuación N° 3:

$$EA(i) = VA(i) \times \left(\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right)$$

Ecuación N°3

De una manera similar al valor actual, el EA puede ser:

EA>0 los ingresos del proyecto superan a los costos. El proyecto genera una ganancia superior la mínima exigida.

EA=0 los ingresos y los costos del proyecto son iguales, por lo que el proyecto genera un beneficio igual al mínimo exigido.

EA<0 los ingresos del proyecto no son suficientes para cubrir los costos y la tasa mínima de rendimiento. En este caso el proyecto reporta una pérdida.

2.6.3. Tasa Interna de Retorno (TIR o i^*):

Se suele expresar en tanto por ciento y representa el interés anual que genera la inversión. La TIR se interpreta como la tasa de interés que hace que los ingresos y los costos de un proyecto sean iguales, entonces se puede plantear un modelo matemático que permite su determinación. Este modelo es el siguiente:

$$VA(i^*) = 0 \quad \text{Ecuación N}^{\circ}4$$

Si la tasa interna de retorno representa las ganancias reales de un proyecto en forma de una tasa de interés y la tasa mínima de rendimiento expresa las ganancias mínimas exigidas, también de la misma manera, se puede concluir que un proyecto de inversión es rentable si: $i^* \geq i_{\min}$.

Los modelos valor actual, equivalente anual y tasa interna de retorno no son independientes uno de otro. Si un determinado proyecto de inversión posee un valor actual positivo, su equivalente anual también lo es y su tasa interna de retorno es mayor que la tasa mínima de rendimiento. Todo lo cual indica que el proyecto es rentable.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se discuten los procedimientos y actividades realizadas para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de Grado.

3.1. ESTUDIO DE LA OPERACIÓN Y ESTADO ACTUAL DE LA PLANTA DE FERTILIZANTES GRANULADOS RPA/DAP (I-390)

Antes de poder estudiar la implementación de un proceso diferente en una planta existente, es necesario conocer cómo funciona dicha planta, qué equipos la conforman, las condiciones de operación de dichos equipos y su estado actual, y así poder establecer una comparación entre el proceso existente y el que se desea implementar. Para esto fue necesario realizar una revisión bibliográfica, así como consultas con los ingenieros de procesos y visitas a la planta I-390.

3.1.1. Revisión y comprensión del proceso de producción de DAP

Para poder sugerir cambios en la I-390, primero fue necesario conocer en qué consiste el proceso de granulación y cómo opera actualmente dicha instalación, en este sentido se buscó material bibliográfico relacionado con el proceso de producción de DAP, tales como enciclopedias, artículos técnicos y revistas científicas, así como los manuales de operación de la instalación, para de esta manera identificar la procedencia y composición de la materia prima, las reacciones químicas que se llevan a cabo, los rangos de operación, los equipos y accesorios involucrados en la producción de DAP. Igualmente, con la ayuda del personal capacitado y los ingenieros de proceso de la planta, se estudió el diagrama de flujo del proceso con el fin de entender el paso de los distintos fluidos a través de los equipos que conforman la planta, y los procesos involucrados en los mismos.

3.1.2. Elaboración de una lista con los equipos más importantes de la Instalación 390

Mediante el estudio de manuales, informes técnicos, comunicaciones e instructivos de Pequiven correspondientes a la Instalación 390, se realizó una lista de los equipos mayores y menores involucrados en el proceso productivo. A partir de esta lista se logró identificar cada equipo y asociarlo a su función y área específica de operación utilizando para ello material bibliográfico.

3.1.3. Definición de la condición actual de los equipos pertenecientes a la I-390 y definir su condición actual

Mediante visitas a la planta con personal capacitado, discusiones con los ingenieros de procesos encargados, y haciendo uso de la lista de equipos realizada de la I-390, informes y reportes de Pequiven correspondientes a la instalación, se realizó un diagnóstico general del estado actual de la planta, determinando cuales equipos estaban en servicio, cuales equipos no se encuentran disponibles, y cuales están presentes pero fuera de servicio debido a que no se necesitan actualmente para llevar a cabo el proceso productivo. Esto es de gran importancia al determinar la factibilidad económica, ya que es necesario saber las condiciones actuales de los equipos existentes para determinar si los mismos se podrán emplear en los procesos de granulación de SAM.

3.2. EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE GRANULACIÓN DE SULFATO DE AMONIO

Además de conocer el funcionamiento de la I-390, también fue necesario estudiar las tecnologías que han sido desarrolladas del proceso de granulación de SAM, para esto se siguieron los pasos que se plantean a continuación:

3.2.1. Búsqueda de tecnologías sobre granulación de SAM y selección de las tecnologías que se adapten a la Instalación 390

Se realizó una investigación de tecnologías y estudios realizados sobre la granulación de SAM, para esto se llevó a cabo una búsqueda electrónica de procesos patentados a nivel mundial, con el fin de elaborar una lista con todas las tecnologías encontradas que emplean sulfato de amonio cristalino como parte de sus materias primas.

Una vez completada la búsqueda de tecnologías se efectuó un análisis básico de cada una de ellas, a partir del cual se logró identificar las materias primas involucradas y los equipos empleados para efectuar el proceso de granulación, obteniéndose un cuadro comparativo a través del cual se logró realizar el proceso de elección de las tecnologías a estudiar, considerando aquellos procesos que se adaptan a la línea de producción y a los equipos mayores presentes en la I-390 tomando en cuenta además que la materia prima que emplean se encuentre preferiblemente disponible dentro del Complejo Petroquímico Morón.

3.2.2. Análisis y descripción detallada de las tecnologías seleccionadas

Se realizó un análisis minucioso de cada uno de los procesos descritos por las tecnologías en estudio, y de esta manera se logró elaborar una descripción detallada de cada uno de ellos, a partir de la cual y mediante diálogo con los ingenieros de procesos, se pudo determinar la complejidad en la operación de cada proceso, lo cual será un parámetro a tomar en cuenta al momento de seleccionar la tecnología.

Una vez realizada la descripción de los procesos, la misma se empleó para la elaboración de los diagramas de bloques correspondientes a cada proceso productivo, a fin de identificar los equipos y accesorios involucrados en cada una de las tecnologías en estudio, y así realizar los diagramas de flujo correspondientes.

3.2.3. Comparación de las tecnologías seleccionadas a través de la elaboración de una lista de los equipos y accesorios necesarios para llevar a cabo cada uno de los procesos

Empleando los diagramas de flujo generados para cada una de las tecnologías en estudio, se elaboraron listas de los equipos y accesorios necesarios para realizar los procesos descritos por cada una de estas tecnologías, así como el material de construcción de los equipos y la función que desempeñarán cada uno de ellos.

Luego, se realizó una comparación de las tecnologías en estudio en cuanto a los equipos necesarios para realizar el proceso de granulación deseado, y de esta manera visualizar los procesos que requieren de una mayor cantidad de equipos durante la operación, este parámetro será empleado al momento de realizar la selección final de la tecnología a implementar en la I-390.

3.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO DE LAS TECNOLOGÍAS PROPUESTAS

Con la finalidad de evaluar si los procesos en estudio podrán implementarse empleando los equipos existentes en la I-390, fue necesario determinar las condiciones de proceso de las tecnologías en estudio, para lo cual se realizaron las siguientes actividades:

3.3.1. Establecimiento de las condiciones de operación según lo propuesto en cada uno de los procesos pertenecientes a la lista de tecnologías seleccionadas

A partir del análisis efectuado de cada una de las tecnologías seleccionadas, se establecieron las condiciones de operación requeridas para poder realizar el proceso de granulación de SAM, esto se logró mediante discusiones con los ingenieros de procesos sobre la información presentada en las patentes.

En cada una de las patentes se encuentra información correspondiente a análisis de laboratorios y pruebas en plantas pilotos, tales como flujos de materias primas,

temperaturas de las corrientes de entrada y salida, propiedades y características del producto, y también se presentan esquemas del proceso de producción, sin embargo en todas las patentes no se encuentra disponible la totalidad de la información necesaria.

3.3.2. Evaluación del comportamiento de los principales materiales de construcción de los equipos existentes en la Instalación 390

Para esto se realizó una investigación de la velocidad de corrosión que presentan los materiales de construcción empleados en los equipos pertenecientes a la I-390, al manejar distintas concentraciones de las sustancias que serán empleadas en cada uno de los procesos en estudio, esta investigación se basó en datos de corrosión presentados en libros, consultoras, hojas de datos de seguridad e informes técnicos.

A partir de la información consultada, se pudo determinar si los materiales de construcción de los equipos eran capaces de resistir el manejo de distintos fluidos y de someterse a diferentes condiciones de operación sin presentar problemas de corrosión o abrasión.

3.3.3. Selección de la tecnología a desarrollar en la I-390

La escogencia de la tecnología se realizó por medio de la construcción de una matriz de selección, la cual toma en cuenta la complejidad de los procesos, los equipos requeridos, la materia prima empleada, las características del producto final obtenido, la resistencia a la corrosión y abrasión; y se asigna una ponderación distinta a cada una de estas características, basada en la importancia de las mismas. Los criterios de evaluación y sus ponderaciones se realizaron mediante discusiones con el personal experto, los ingenieros de procesos, y otros conocedores del área.

3.3.4. Evaluación del funcionamiento de los equipos identificados para lograr la granulación propuesta

Mediante investigación en material bibliográfico (Perry, 1998; Geankolis, 1998; Treybal, 1988), manuales de Pequiven, documentos de los fabricantes (FEECO

International, s.f) y consultas con expertos se evaluaron cada uno de los equipos identificados para lograr la granulación empleando el proceso descrito por la tecnología seleccionada, basándose en los criterios de diseño de cada equipo, la capacidad actual de la planta y la producción deseada.

Con el fin de realizar el dimensionamiento de los equipos, fue necesario desarrollar el balance de masa y energía correspondiente a la tecnología seleccionada, asignando valores deseados de productividad, especificando la humedad en el producto final e identificando las corrientes de alimentación y de producto.

3.4. SIMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA

La finalidad de realizar y validar la simulación del proceso seleccionado, es tener una herramienta que se pueda emplear para realizar evaluaciones posteriores del proceso de una manera más rápida y efectiva, haciendo posible la realización de análisis de sensibilidad del proceso sin que esto requiera invertir gran cantidad de tiempo y esfuerzo.

La manera de validar la simulación es comparando los resultados arrojados por la misma con los obtenidos por medio de los balances de masa y energía del proceso. Por tratarse de un diseño preliminar se permite una diferencia máxima entre ambos resultados de 15%. Para el cumplimiento de este objetivo se realizaron las siguientes actividades:

3.4.1. Identificación del simulador comercial que cuenta con la data necesaria para la realización de la simulación de la propuesta

Hay que tener en cuenta que muy pocos simuladores comerciales poseen los datos y equipos necesarios para el manejo de sólidos, además de esto el proceso de granulación emplea equipos especializados que no se encuentran disponibles en la mayoría de los programas de simulación comerciales.

Por medio de consultas con expertos en el área de simulación, y realizando investigaciones en internet, se identificaron los programas que poseen la data y equipos necesarios para el manejo de sólidos. Luego se efectuó una revisión de las

principales características de cada uno de estos simuladores, para así identificar cuál de ellos podía ser empleado para representar el proceso de granulación.

3.4.2. Comprender el funcionamiento del software

Una vez identificado el software a emplear, fue necesario conocer el funcionamiento del mismo mediante el estudio de manuales y tutoriales, y de esta manera comprender las herramientas y equipos disponibles en el simulador. También es importante aprender a realizar las simulaciones, seleccionar los componentes de cada corriente, establecer los flujos y sus composiciones, las condiciones de temperatura y presión, seleccionar los equipos y obtener los resultados de la simulación, para luego poder analizar los mismos.

3.4.3. Realizar la simulación de la propuesta seleccionada

Una vez conocido el funcionamiento del simulador a emplear, se seleccionaron los equipos a utilizarse en el montaje del proceso, especificando los parámetros y variables principales de operación, las cuales se seleccionaron basándose en la experiencia de los ingenieros de procesos, de las exigencias en cuanto a la calidad del producto, y de las especificaciones de la tecnología. De igual manera, se establecieron los valores iniciales a los flujos de entrada y temperaturas de las corrientes de alimentación, los cuales se determinaron a partir de los balances de masa y energía calculados previamente.

3.4.4. Analizar los resultados de la simulación mediante la comparación con los resultados obtenidos a partir de los balances y dimensionamientos

Luego de obtenidos los resultados de la simulación de la tecnología seleccionada, se procede a comparar los mismos con los obtenidos a partir de los balances efectuados anteriormente, si el porcentaje de error entre ambos es menor al 15%, se valida la simulación y la misma se podría emplear para estudios posteriores.

3.5. DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA PROPUESTA SELECCIONADA

A partir de un estudio de factibilidad técnico-económica se determinó si la implantación de la tecnología propuesta en la I-390 es viable económicoamente. Con la finalidad de cumplir el objetivo planteado se realizaron las siguientes actividades:

3.5.1. Proponer los cambios a efectuar en la instalación

Para poder proponer los cambios es necesario comparar las características de los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso descrito por la tecnología seleccionada con los equipos disponibles en la I-390, y así determinar los nuevos equipos que se deben adquirir y las modificaciones que se deben realizar a los equipos existentes con el fin de obtener la granulación deseada.

3.5.2. Determinación de la factibilidad técnica de la implantación de los cambios

Se ejecutó mediante el análisis de las posibles modificaciones a realizarse en la instalación para poder adaptarla a la tecnología escogida, y mediante una mesa de trabajo multidisciplinaria se pudo determinar la factibilidad técnica de implementar dichos cambios en la instalación existente.

3.5.3. Calcular el costo y la rentabilidad de la implementación de la tecnología seleccionada en la I-390

Se realizó un análisis económico de la propuesta tomando en cuenta el costo de la materia prima, de los equipos nuevos que deben adquirirse, y de aquellos que deban ser sometidos a modificaciones, los costos de operación y mantenimiento. De igual manera se determinó el costo del producto final, a fin de determinar si el proyecto es viable económicoamente, se emplearán los métodos de valor actual, equivalente anual y TIR, para lo cual fue necesario determinar el flujo de caja del proyecto para el período en estudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de los objetivos de la investigación.

4.1. ESTUDIO DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA DE FERTILIZANTES GRANULADOS RPA/DAP Y ESTADO ACTUAL DE LOS EQUIPOS

4.1.1. Estudio de la operación actual de la I-390

Con la finalidad de conocer el proceso productivo que se lleva a cabo actualmente en la I-390 se realizaron investigaciones en libros, manuales de operación en la planta. En la sección 2.4 del marco teórico se encuentra una descripción detallada del proceso de producción de fosfato diamónico que se realiza en la instalación. Una vez identificado el proceso se procedió a la identificación de cada uno de los equipos involucrados en el mismo.

4.1.2. Inventario de los equipos pertenecientes a la Instalación-390

Empleando la información disponible sobre la I-390 se realizó la Tabla N° 1 en la cual se pueden observar los distintos equipos pertenecientes a la instalación los cuales juegan un papel importante en el proceso de granulación, así como su material de construcción y el material que manejan actualmente.

A partir de la observación de la Tabla N° 1, se puede concluir que los equipos pertenecientes a la I-390 se encuentran construidos principalmente de acero al carbono, algunos equipos están construidos de acero inoxidable 316L, el granulador se encuentra recubierto internamente por un material de goma denominado EPDM y las correas de las cintas transportadoras son de caucho. Esta información fué de gran importancia al evaluar si los equipos pueden ser empleados para manejar diferentes sustancias y condiciones de operación.

Tabla N° 1 Equipos pertenecientes a la Instalación, material de construcción y compuestos que manejan

	Equipo	TAG	Material de Construcción	Material manejado
Equipos mayores	Pre-neutralizador	A-201	S.S 316L	-Ácido fosfórico -Amoníaco -Lodo MAP/DAP (16-30 % agua)
	Granulador	TR-201	Tambor de C.S. Recubierto de EPDM	-Ácido sulfúrico -Amoníaco -Lodo del A-201
	Secador	TR-401	C.S	-Gránulos de DAP
	Molino	MF-501	C.S	-Gránulos de DAP
	Cribas	SV-501	Malla de S.S 316L	-Gránulos de DAP
	Enfriador	TR-601	C.S	-Gránulos de DAP
Equipos menores	Silo de roca fosfática	SI-101	C.S	-Roca fosfática
	Dosificador de roca	ED-100	C.S	-Gránulos de DAP
	Cinta transportadora	ET-100	Correa de caucho	-Gránulos de DAP
	Tanque ácido fosfórico	SR-101	S.S 316L	-Ácido fosfórico
	Tanque licor de lavado	SR-102	S.S 316L	-Licor de lavado
	Bomba de ácido fosfórico	PC-101 A/B		-Ácido fosfórico
	Bomba de licor de lavado	PC-102 A/B		-Licor de lavado
	Bombas de Lodo	PC-201 A/B		-Lodo MAP/DAP 20% Agua
	Horno	H-401		-Gases de combustión
	Elevador de Cangilones	ET-501	C.S	-Gránulos de DAP
	Dosificador de reciclo	ED-500	C.S	-Gránulos de DAP
	Elevador de Cangilones	ET-502	C.S	-Gránulos de DAP
	Cinta transportadora	ET-503	Correa de caucho	-Gránulos de DAP
	Cinta transportadora	ET-604	Correa de caucho	-Gránulos de DAP
	Elevador de cangilones	ET-603	C.S	-Gránulos de DAP
	Cinta transportadora	ET-601	Correa de caucho	-Gránulos de DAP
	Cinta transportadora	ET-602	Correa de caucho	-Gránulos de DAP

SS 316L: Acero inoxidable 316L

C.S: Acero al Carbono

EPDM: Caucho de Etileno Propileno Dieno tipo M

Empleando los manuales y planos disponibles acerca de la I-390 y mediante visitas a la planta con personal capacitado, se realizó un inventario de todos los equipos, estableciéndose 3 categorías: (a) Operativo (O): para aquellos equipos que se encuentran operando actualmente; (b) Operativo / Fuera de servicio (O/FS): los equipos que no están funcionando actualmente debido a que el proceso actual no lo requiere, sin embargo estos equipos se encuentran en condiciones de operar; y (c) Inexistente (I): son aquellos equipos que no se encuentran presentes en la instalación. En la Tabla N° 2 presentada a continuación se puede observar el inventario de los equipos y accesorios pertenecientes a la I-390.

Tabla N° 2 Inventario de los equipos y accesorios pertenecientes a la I-390

	Equipo	TAG	Estado	Observaciones
Equipos mayores	Pre-neutralizador	A-201	O	Reponer la bocina del eje del agitador perteneciente
	Granulador	TR-201	O	Rectificar la línea de amoniaco
	Secador Rotatorio	TR-401	O	Reparar los bafles doblados del TR-401
	Horno	H-401	O	
	Molino	MF-501	O	
	Cribas	SV-501	O	Revisar y sustituir las gomas
	Enfriador	TR-601	O/FS	Reponer la caja reductora del motor
Equipos menores y accesorios	Silo de roca fosfática	SI-101	O/FS	
	Filtro de Mangas	FI-100	I	
	Dosificador de roca	ED-100	O/FS	
	Cinta transportadora	ET-100	O/FS	
	Tanque de ácido fosfórico	SR-101	O/FS	
	Agitador	AG-101	I	
	Bombas de ácido fosfórico	PC-101 A/B	I	
	Tanque de Licor de Lavado	SR-102	O	
	Agitador	AG-102	O	
	Bombas de Licor de Lavado	PC-102 A/B	O	
	Agitador	AG-201	O	
	Bombas de Lodo	PC-201 A/B	O	

(Continuación) Tabla N° 2 Inventario de los equipos y accesorios pertenecientes a la I-390

	Equipo	TAG	Estado	Observaciones
Equipos menores y accesorios	Motor del Granulador	MTR-201	O	
	Horno	H-401	O	
	Motor del secador	MTR-401	O	
	Ventilador	VV-400	O	
	Elevador de cangilones	ET-501	O	
	Dosificador De Reciclo	ED-500	O	
	Elevador de cangilones	ET-502	O	
	Cinta transportadora	ET-503	O	
	Ciclones del secador	SC-401	O	
	Ciclón de despolvamiento	SC-501	O	
	Ciclón de despolvamiento	SC-601	O/FS	
	Ventilador	VV-601	O/FS	
	Chimenea	C-302	O/FS	
	Tanques de efluentes	SR-303	O	
	Bomba	PC-303	O	
	Bomba	PC-301 A/B	O	
	Bomba	PC-302 A/B	O	
	Tanque de licor de lavado	SR-301	O	
	Lavador Venturi	SC-301	O	
	Lavador Venturi	SC-302	O	
	Ventilador	VV-301	O	
	Ventilador	VV-302	O	
	Chimenea	C-301	O	

A partir de la observación de la Tabla N° 2 se puede concluir que se encuentran presentes todos los equipos mayores necesarios para ejecutar el proceso de granulación, y la sustitución de los equipos menores y accesorios faltantes se puede realizar sin mayor dificultad, sin embargo dependerá de la tecnología que se decida implantar cuáles de dichos equipos se deben reponer a la brevedad posible, de manera de poder implementar el proceso de granulación que se proponga. La razón por la cual algunos equipos no se encuentran en operación, es debido a que originalmente la planta se diseñó para la producción de roca parcialmente acidulada, y al cambiar la operación de la instalación a DAP, equipos como el silo para la alimentación de materia prima sólida, y el enfriador rotatorio dejaron de ser necesarios para el proceso. Posteriormente, luego de seleccionada la tecnología a implantar, se realizó una evaluación más detallada de los equipos involucrados, tomando en cuenta la capacidad de los mismos, así como otras características de operación.

4.2. EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE GRANULACIÓN DE SAM PROBADAS QUE SE AJUSTAN A LA LÍNEA DE PROCESO DE LA INSTALACIÓN EXISTENTE (I-390)

4.2.1. Búsqueda y selección de tecnologías de granulación de SAM

Se realizó una búsqueda electrónica de tecnologías de granulación de SAM que empleen dicho compuesto en cristales o en solución como parte de sus materias primas, con la finalidad de analizar cada una de ellas, compararlas y seleccionar aquellas tecnologías que se ajustan a la línea de procesos de la I-390. En la

Tabla N° 3, se encuentra una comparación entre cada una de las tecnologías encontradas y además se puede observar cuáles de ellas se fueron seleccionadas para realizar el estudio de factibilidad. Las tecnologías escogidas se renombraron con una letra para un mejor manejo, entendimiento y visualización.

Al analizar la

Tabla N° 3 se puede observar que se seleccionaron las tecnologías que emplean para la granulación un tambor rotatorio, y se le dio prioridad a aquellas cuyas materias primas se encuentran disponibles en el complejo. En el caso de las patentes N° US 4554004 y US 3241946 fueron descartadas debido a que emplean ácido fosfórico como parte de sus materias primas, y actualmente en el Complejo Petroquímico Morón existe un déficit en la producción del mismo.

Tabla N° 3 Comparación de las tecnologías de granulación de SAM evaluadas

Nombre de la patente	N° Patente	Materias Primas	Equipo de granulación	Tecnología seleccionada
Production of granulated ammonium sulfate nitrate	US 3282674	-Sulfato de Amonio -Nitrato de Amonio -(otros aditivos)	Equipo de perlado	NO
Process for production of granular ammonium sulfate	US 3464809	-Sulfato de Amonio -Amoníaco. -Ácido Sulfúrico	Tambor rotatorio	SÍ Tecnología A
Process for granulating ammonium sulfate	US 3539329	-Sulfato de Amonio -Amoníaco. -Ácido Sulfúrico	Tambor rotatorio	SÍ Tecnología B
Production of urea-ammonium sulfate	US 3785796	-Sulfato de Amonio -Urea	Granulador de bandeja o tambor rotatorio	SÍ Tecnología C
Process for granulation of fertilizer materials	US 4554004	-Fosfato de urea (ácido fosfórico + urea) -Sulfato de amonio (arcilla, amoníaco)	Tambor rotatorio	NO
Method of producing fertilizer granules containing urea and ammonium sulfate	US 4943308	-Urea -Sulfato de Amonio -Aqua	Lecho fluidizado	NO
Granulation of crystalline by-product ammonium sulfate	US 4589904	-Sulfato de Amonio -Amoníaco. -Ácido Sulfúrico	Tambor rotatorio	SÍ Tecnología D
Process of agglomerating ammonium sulfate and making complete fertilizer	US 3738821	-Sulfato de Amonio -Fosfato de Amonio -Ácido fosfórico	Lecho fluidizado	NO
Process for pelletizing or granulating ammonium sulfate	US 4305748	-Sulfato de Amonio -Aqua	Equipo de perlado	NO

(Continuación)

Tabla N° 3 Comparación de las tecnologías de granulación de SAM evaluadas

Nombre de la patente	Nº Patente	Materias Primas	Equipo de granulación	Tecnología seleccionada
Ammonium Sulfate production (granules)	US 2867523	-Sulfato de Amonio	“Blunger”	NO
Ammonium phosphate fertilizer solids derived from anhydrous liquid phosphoric acid	US 3241946	-Ácido fosfórico anhídrico. -Amoníaco -Sulfato de Amonio -Superfosfato triple -Sulfato de calcio	Tambor rotatorio	NO
Fertilizer	US 3301658	-Sulfato de Amonio -Superfosfato triple -Nitrato de Amonio -Urea -Cloruro de potasio	Tambor rotatorio	NO
Preparation of ammonium sulfate fertilizer constituent	US 3725029	-Sulfato de Amonio. -Lignosulfonato -Urea	Tambor rotatorio	NO
Stabilized granular gypsum-pesticidal composition and method of preparation	US 3168437	-Sulfato de Amonio. -Yeso. -Pesticida	Tambor rotatorio	SÍ Tecnología E
Granulating an aqueous dispersion of ammonium and potassium salts	US 4277253	-Sulfato de amonio. -Sulfato de calcio hemihidrato. -Bentonita	Tambor rotatorio	NO

A excepción de la tecnología C, las principales materias primas son: sulfato de amonio, amoníaco y ácido sulfúrico. En la I-390 existen las conexiones para la alimentación de amoníaco y ácido sulfúrico, ya que estas materias primas también se emplean en la producción de DAP. Por otra parte el sulfato de amonio se produce dentro del complejo, lo que hace que su traslado hasta la instalación se efectúe sin mayores dificultades. Además de esto, la tecnología C emplea como materia prima soluciones concentradas de urea y sulfato de amonio en cristales, si bien la urea también se produce dentro del complejo, ésta es producida en forma de perlas, mientras que en la patente se requiere como solución concentrada, por lo tanto se debe establecer la metodología para obtener la solución y la estrategia a utilizarse para su alimentación. También se tomó en consideración la tecnología E, en la cual se

emplea yeso como material de relleno a la vez que aporta nutrientes al producto final, este material se encuentra disponible en el complejo como un subproducto de la producción de ácido fosfórico, además esta sustancia no corroe el acero al carbono. Sin embargo para poder aplicar la tecnología E en la instalación existente será necesario realizar algunas modificaciones al proceso propuesto por la patente, estas modificaciones serán descritas más adelante.

4.2.2. Descripción de las tecnologías seleccionadas

A continuación se presentará una breve descripción de cada una de las tecnologías seleccionadas:

Tecnología A. Gordon Hicks. Patente N° US 3464809: Proceso para la producción de sulfato de amonio granular.

En este proceso se puede usar ácido sulfúrico puro o en combinación con soluciones de SAM. Este proceso contempla amoniacar parcialmente mezclas de ácido sulfúrico y SAM al añadir alrededor de 20% del amoníaco total en un preneutralizador. Se debe mantener la temperatura en un rango entre 120 y 205 °C y la relación molar $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ entre 0,9 y 1,5 ya que mediante el control de esta relación es posible la formación de una solución con bajo contenido de humedad que puede fluir satisfactoriamente por gravedad, lo cual permite usar bajas relaciones de reciclo en el proceso.

Al granulador se introduce la solución de SAM producida en el preneutralizador, una corriente de amoníaco y partículas de finos manteniendo un lecho de partículas de SAM dentro del equipo. En el granulador se termina de neutralizar el ácido añadiendo el 80% del amoníaco restante, esto provee intensos calores de reacción con temperaturas entre 150-205°C. No se necesita secador, ya que el calor de la reacción se utiliza para la evaporación del agua. La pérdida de amoníaco se encuentra en el rango de 0,3 a 2% del amoníaco total alimentado. El contenido de humedad de las partículas que salen del granulador es menor a 1% y frecuentemente menor a 0,1%. El producto es luego enfriado y se clasifican los gránulos resultantes, el material

grueso se muele y se envía a reciclo junto con los finos. Para una granulación óptima es necesario una relación reciclo/producto de 1,3. En la Figura N° 2 se puede apreciar un diagrama de bloques del proceso propuesto por esta tecnología.

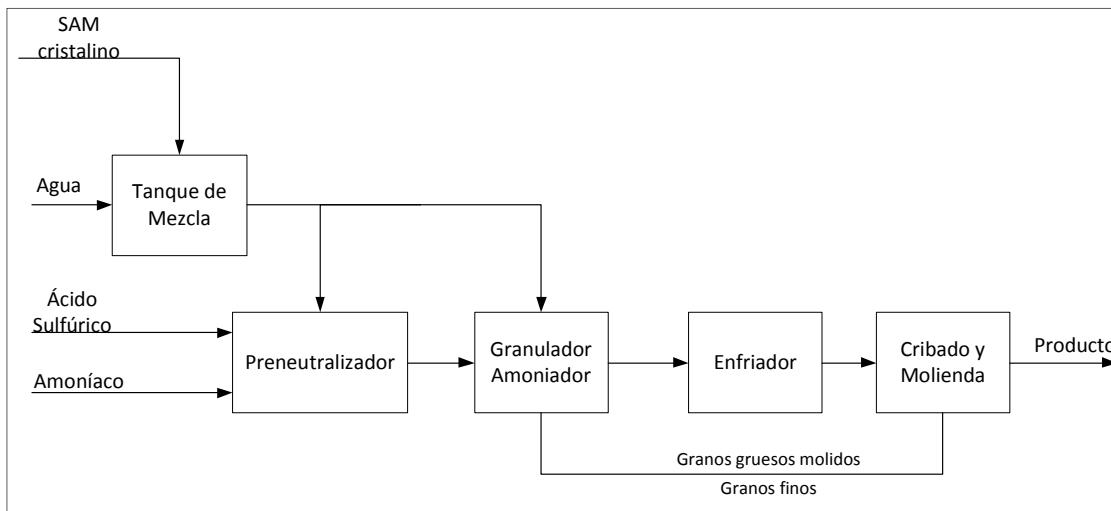


Figura N° 2 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología A

Tecnología B. Joseph Wilson. Patente N° US 3539329: Proceso para granular sulfato de amonio

Este proceso contempla primero humedecer una alimentación compuesta por cristales de SAM con una solución acuosa de ácido sulfúrico; esta mezcla se agita para formar aglomerados de dichos cristales con el ácido; y luego amoniacular los aglomerados resultantes para completar la neutralización del ácido. Es preferible formar dicha mezcla con concentraciones de ácido sulfúrico basadas en la masa total de la mezcla, el rango de concentración del ácido será entre 10 y 16%, y el contenido de agua se define por la Ecuación N° 5, la cual relaciona la mínima cantidad de agua expresada en porcentaje de peso de la mezcla (W) requerida a una temperatura T de la alimentación, y el límite superior es 5.

$$W = 2.75 - \frac{T^{\circ}C}{80} \quad \text{Ecuación N°5}$$

En este proceso los cristales de SAM se introducen al granulador, junto con el ácido sulfúrico y suficiente agua para mantener la concentración de agua en el rango especificado. El proceso de rotación se lleva a cabo a temperaturas entre 20 y 100°C.

Es preferible pre-mezclar el agua y el ácido y enfriar la mezcla a 30°C antes de introducirlas al granulador. El SAM humedecido con la solución acuosa de ácido sulfúrico se neutraliza en el amonizador, donde se pone en contacto con el amoníaco introducido por el fondo del tambor. Durante el proceso de amoniacación se debe mantener la temperatura entre 90 y 100°C, también es deseable mantener un lecho de SAM suficientemente profundo para evitar las excesivas pérdidas de amoníaco. Es posible alcanzar el secado del producto proveyendo suficiente temperatura durante el proceso de amoniacado, por lo que generalmente no se necesita equipo de secado. El SAM seco se pasa a un proceso de clasificación, donde las partículas de tamaño deseado se separan del producto que no cumple con la especificación. Las partículas finas se reciclan, los gruesos se muelen para luego ser reciclados al granulador. El granulador y el amonizador pueden combinarse en un solo tambor rotatorio, donde la línea de amoníaco pasa axialmente. En la Figura N° 3 se puede observar un diagrama de bloques del proceso descrito por esta tecnología.

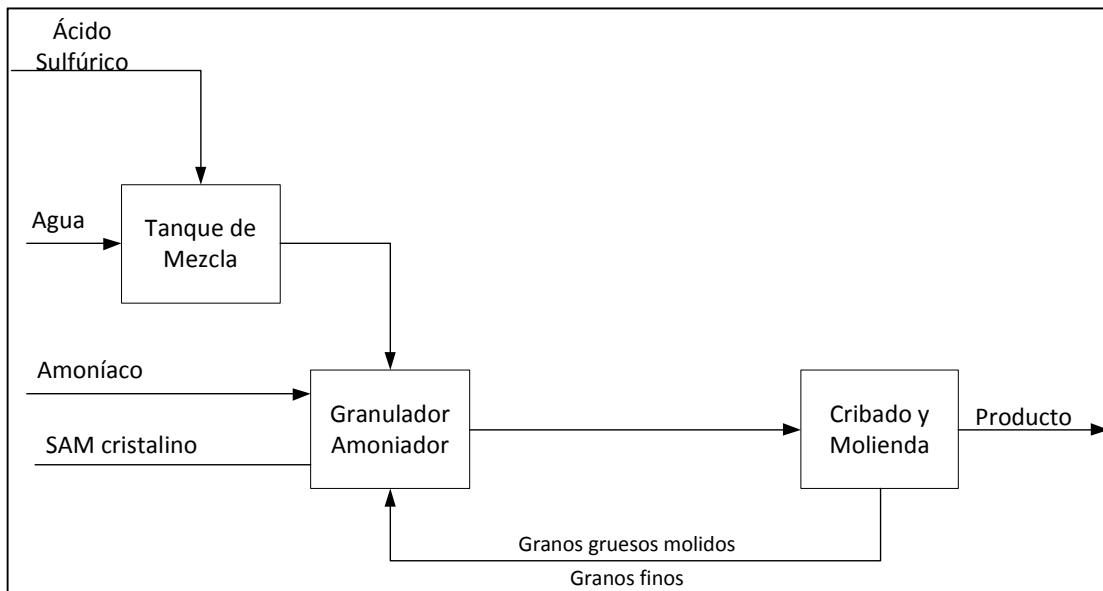


Figura N° 3 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología B

Tecnología C. Horace Mann. Patente N° US 3785796: Producción de urea-sulfato de amonio.

Una posibilidad para mejorar el tamaño de las partículas de SAM y producir un fertilizante granulado con nitrógeno y sulfuro, es combinándolo con una solución concentrada de urea, e introduciendo esta mezcla junto con el material reciclado dentro de un granulador.

La granulación se puede ejecutar en cualquier tipo de granulador. Las corrientes de solución concentrada de urea y partículas de SAM se alimentan continuamente junto con el reciclo en el granulador. Los gránulos se alimentan al enfriador donde se ponen en contacto con una corriente de aire, luego pasan al clasificador, donde se separa la corriente de tamaño deseado, de los gránulos fuera de tamaño. El producto más grande se alimenta al molino, luego este material se combina con la corriente de finos para finalmente ser recicladas al granulador. Una relación reciclo/producto de 0,6 será necesaria para llevar a cabo el proceso de granulación. En la Figura N° 4 se puede observar un diagrama de bloques de esta tecnología.

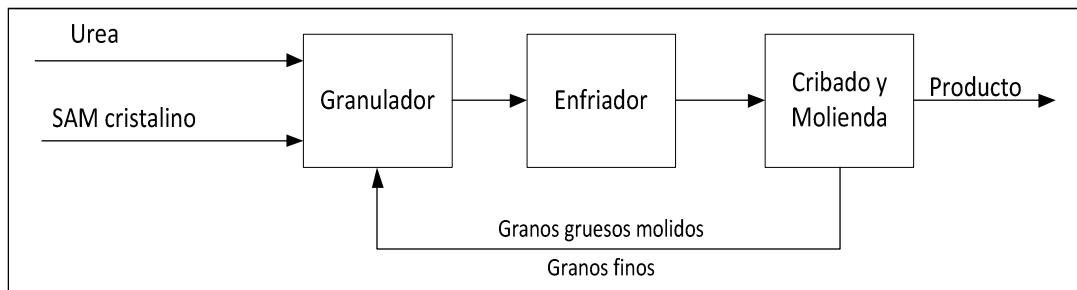


Figura N° 4 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología C

Tecnología D. Cecil Harrison y Cullen Tittle. Patente N° US 4589904: Granulación de sulfato de amonio cristalino.

Por medio de este método se pueden granular mezclas conteniendo 70% a 80% de SAM cristalino y cerca de un 20% de SAM proveniente de la reacción entre ácido sulfúrico y amoníaco. Se determinó que el preneutralizador no era necesario, su uso sólo complicaría los problemas de corrosión asociados.

El SAM cristalino se alimenta junto con el material reciclado al granulador, simultáneamente se agrega el ácido sulfúrico al 92% y una solución de SAM-agua-aditivos a una tubería de dilución. Simultáneamente se añade amoníaco gaseoso al granulador por medio de un rociador. En el granulador la acción humectante de la solución ácida junto con las reacciones que ocurren entre el ácido y el amoníaco hacen que una gran cantidad de los sólidos alimentados se aglomeren en la forma granular deseada. El material granulado resultante posee entre 0,5 a 1,5% de humedad. Durante la operación, aire a temperatura ambiente se hace fluir en co-corriente al flujo de sólidos a través del granulador. La pérdida de amoníaco en este equipo se encuentra en el rango de 1 a 2%. El material granulado pasa hacia el secador, en el cual una corriente de aire caliente junto con gases de combustión fluye en contracorriente. El material secado posee una humedad de 0,1 a 0,5%, este material pasa al enfriador, en el cual una corriente de aire a temperatura ambiente fluye en contracorriente, luego los gránulos enfriados pasan al clasificador, los finos se reciclan y los gruesos se muelen y pasan al reciclo.

Cuando el 20% a 30% del sulfato total se añaden como ácido sulfúrico debe añadirse amoníaco en el granulador para neutralizar el ácido a una relación molar $\text{NH}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ de 1,8 a 1,95. La relación de reciclo/producto debe mantenerse alrededor de 3. En la Figura N° 5 se puede apreciar el diagrama de bloques del proceso descrito por esta patente.

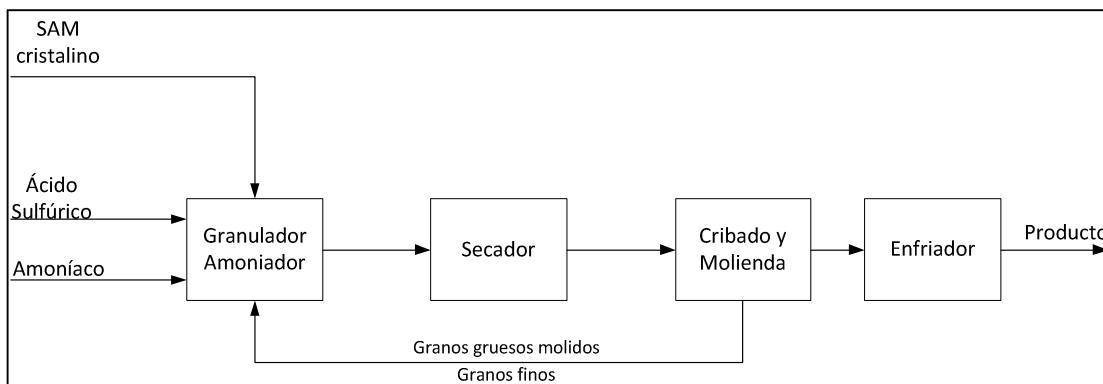


Figura N° 5 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología D

Tecnología E. Arthur Galloway. Patente N° US 3168437: Método de preparación de granos de yeso-pesticida estables.

Mediante el método descrito por esta patente, una mezcla de yeso (sulfato de calcio dihidratado), sulfato de amonio y una sustancia activa biológicamente, tal como un agente pesticida, se trata con suficiente agua para efectuar la formación de los gránulos conteniendo el material biológicamente activo incorporado. Los granos formados presentan una alta dureza y son estables a condiciones atmosféricas ordinarias, pero se desintegran fácilmente por acción del agua para una mayor efectividad del material activo.

Una característica importante de este proceso, es la posibilidad de formación de sales dobles o compuestos moleculares entre el sulfato de calcio y los materiales añadidos, la formación de sales dobles es importante en la formación de estos granos.

Para formar la composición descrita por esta tecnología, una mezcla con alrededor de 25 a 90 partes en peso de sulfato de calcio dihidratado, 1 a 70 partes en peso de sulfato de amonio, y 1 a 30 partes en peso del pesticida se mezclan constantemente durante la adición del agua hasta que se produce la formación del grano. La mezcla húmeda se seca, se muele y se clasifica para obtener gránulos de un tamaño de malla entre 10 y 80 (1,651 y 0,173 mm). La cantidad de agua añadida es crítica, ya que debe ser suficiente como para llevar a cabo la granulación, pero no excesiva de manera de formar un lodo o suspensión de los materiales secos. Se ha determinado que una cantidad de agua entre 5 y 45% en peso de los ingredientes secos es requerida, generalmente el agua añadida no es suficiente para solubilizar todas las sales, por lo que un porcentaje relativamente pequeño de sales dobles se forma, sin embargo son suficientes para proveer las propiedades necesarias de dureza y de desintegración en el agua.

El presente método puede ejecutarse en equipos similares a aquellos usados comúnmente en la industria de fertilizantes para producir éstos en forma granulada. Los ingredientes secos son añadidos a un premezclador donde los materiales son mezclados, luego la mezcla seca se introduce en el granulador rotatorio en donde se

rocía agua sobre la misma. En el granulador, se forman los granos mojados de alrededor de 1/8 de pulgada de diámetro (3,175 mm), los cuales se pasan a un secador rotatorio operando a una temperatura entre 100-200 °F (37,8-93,3 °C). Cuando el material granulado se seca, se enfriá y se alimenta a un molino, luego se clasifica para obtener las partículas granuladas del tamaño deseado, mientras que las partículas descartadas se reenvían al granulador. En la Figura N° 6 se puede apreciar el diagrama de bloques que corresponde al proceso descrito por esta patente.

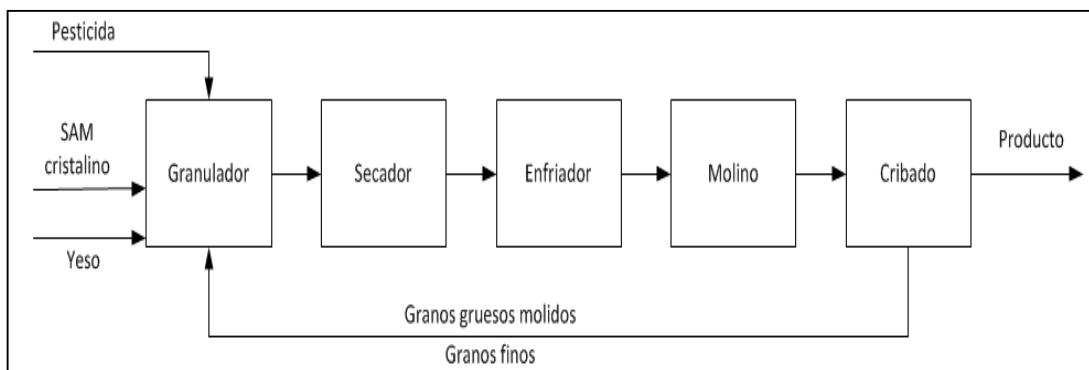


Figura N° 6 Diagrama de bloques del proceso descrito por la tecnología E

Sin embargo, para poder implementar este proceso en la I-390 y obtener un grano con las características físicas deseadas, es necesario realizar algunas modificaciones al proceso que se describe en esta tecnología.

Por ejemplo, el componente biológicamente activo se añade con la única finalidad de darle al producto final características pesticidas, sin embargo este componente no afecta el proceso de granulación, por lo cual si se desea, puede ser suprimido de la mezcla, dando como resultado final un grano que puede ser empleado como fertilizante debido a la cantidad de nutrientes beneficiosos para el suelo contenidos en el producto.

Otra de las modificaciones a realizar tiene que ver con el tamaño final deseado del producto, en el proceso descrito se desea un producto fino, por lo cual luego de secar y enfriar el producto granular, éste se alimenta al molino con la finalidad de reducir su tamaño de partícula y producir un polvo. Sin embargo, el objetivo de granular el sulfato de amonio es generar un producto con un tamaño de partícula entre

1-4 mm, por lo que se debe modificar el orden de los equipos a la salida del granulador, y de esta manera mantener la secuencia de los equipos instalados en la I-390 y obtener un grano del tamaño deseado. Las modificaciones planteadas se pueden observar en la Figura N° 7 en la cual se presenta el diagrama de bloques modificado del proceso descrito por esta patente.

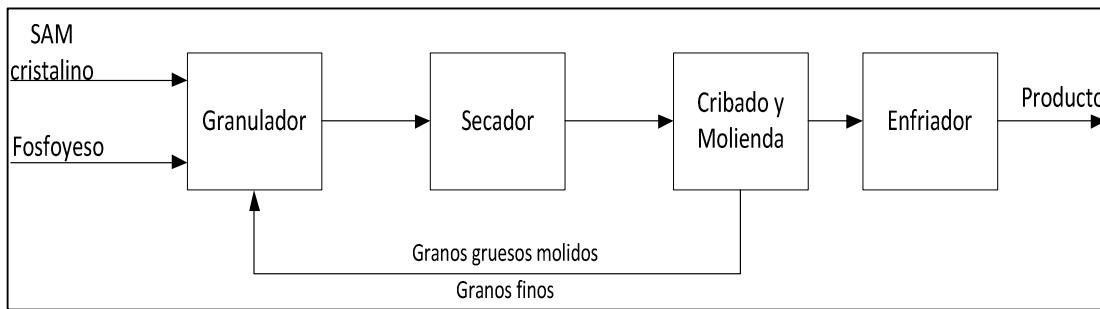


Figura N° 7 Diagrama de bloques modificado del proceso descrito por la tecnología E

Por otra parte, se decidió emplear fosføyso como material de relleno, el cual se produce como subproducto en la elaboración de ácido fosfórico, lo cual lo convierte en un importante pasivo ambiental generado en el Complejo Petroquímico Morón, por lo que se estaría contribuyendo a disminuir la contaminación ambiental producida en el Complejo, además, este material ha sido manejado satisfactoriamente en la I-390, lo cual asegura que los equipos existentes presentarán un buen desempeño operacional alargando así la vida útil de los mismos.

En el Apéndice A se pueden apreciar los esquemas más detallados de la implantación de cada una de las tecnologías en la I-390.

4.2.3. Comparación y análisis de las tecnologías seleccionadas

Con la finalidad de facilitar el análisis de estas tecnologías, se realizó una comparación entre los equipos que se necesitan para ejecutar cada uno de los procesos propuestos. Este cuadro comparativo se puede observar en la Tabla N° 4 en la cual se encuentra una lista con los equipos mayores necesarios para ejecutar cada una de las tecnologías seleccionadas.

Tabla N° 4 Equipos mayores necesarios para ejecutar cada una de las tecnologías propuestas

Tecnología Equipo	A	B	C	D	E
Preneutralizador	Sí	No	No	No	No
Granulador	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Secador	No	No	No	Sí	Sí
Enfriador	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Cribas	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Molino	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Del análisis de la Tabla N° 4, se desprende que todas las tecnologías seleccionadas requieren de los siguientes equipos: Granulador, Cribas y Molino, adicionalmente a estos equipos la tecnología A requiere un preneutralizador y las tecnologías D y E requieren de una etapa de secado. A excepción de la tecnología B que no requiere enfriador, las demás patentes si necesitan de este equipo. En aquellos procesos que no se requiere etapa de secado, el secador (TR-401) se empleará como enfriador, haciendo pasar solamente la corriente de aire sin encender el horno, esto se realizará para no alterar de forma significativa la línea de proceso actual en la Instalación 390. Sin embargo el secador rotatorio opera en flujo co-corriente, mientras que el proceso de enfriado es más efectivo al operar en flujo contracorriente, por lo que al emplear el secador rotatorio como equipo de enfriamiento el proceso será menos eficiente.

En la Tabla N° 5 se pueden observar los equipos menores involucrados en cada una de las tecnologías seleccionadas, y la función que realizarán. Para aquellos equipos que no son necesarios durante la puesta en marcha de determinada tecnología se colocó la abreviatura N/A (No Aplica).

Tabla N° 5 Equipos menores necesarios para ejecutar cada una de las tecnologías seleccionadas

Tecnología Equipo	A	B	C	D	E
Silo (SI-100)	Almacenar SAM cristalino	Almacenar SAM cristalino	N/A	Almacenar SAM cristalino	Almacenar fosfoyeso y SAM cristalino
Tornillo sifón (ED-100)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cinta transportadora (ET-100)	Alimentar SAM cristalino al tanque SR-101	Alimentar SAM cristalino al	N/A	Alimentar SAM cristalino al	Alimentar SAM cristalino al

		granulador TR-201		granulador TR-201	granulador TR-201
Tanque (SR-101)	Preparar solución saturada de SAM	Diluir ácido sulfúrico	N/A	N/A	N/A

(Continuación) Tabla N° 5 Equipos menores necesarios para ejecutar cada una de las tecnologías seleccionadas

Tecnología Equipo	A	B	C	D	E
Tanque (SR-102)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Bomba (PC-101 A/B)	Bombea SAM al preneutralizador	Bombea ácido sulfúrico al granulador	N/A	N/A	N/A
Bomba (PC-102 A/B)	Bombea SAM al granulador	N/A	N/A	N/A	N/A
Bomba de lodo (PC-201 A/B)	Bombea el lodo al granulador	N/A	N/A	N/A	N/A
Horno (H-401)	Calentar aire del secador	Calentar aire del secador	Calentar aire del secador	Calentar aire del secador	Calentar aire del secador
Elevador de cangilones (ET-501)	Llevar producto del secador a las cribas	Llevar producto del secador a las cribas	Llevar producto del secador a las cribas	Llevar producto del secador a las cribas	Llevar producto del secador a las cribas
Cinta transportadora (ET-601)	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén
Cinta transportadora (ET-601)	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén	Transportar producto al almacén

A partir de la observación de la Tabla N° 5, se puede destacar lo siguiente: la tecnología A requiere de una mayor cantidad de equipos, adicionalmente sus condiciones de operación son más estrictas; por otra parte la tecnología C requiere de una menor cantidad de equipos, sin embargo si la formación de la solución concentrada de urea se lleva a cabo dentro de la misma instalación se requerirá de otros equipos para realizar esta tarea tales como tanques, bombas, silos y correas transportadoras. Por otro lado las tecnologías D y E requieren el uso del secador y del

enfriador, lo cual significa un mayor requerimiento de energía. Todos estos parámetros son de gran importancia al momento de seleccionar la tecnología a implementar en la I-390.

4.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE PROCESO DE LAS TECNOLOGÍAS EN ESTUDIO

Una vez seleccionadas las tecnologías en estudio, se procedió a determinar las condiciones de operación de cada uno de los procesos descritos en ellas, y de esta manera poder evaluar si estas tecnologías pueden llevarse a cabo empleando los equipos existentes, o si es necesario realizar alguna modificación, reemplazo de equipos menores, o la adquisición de alguno de los equipos requeridos para poder efectuar dichos procesos. Esta evaluación se realizó estudiando el desempeño de los materiales de construcción de los diferentes equipos al someterse a distintas condiciones de operación y al manejo de sustancias químicas diferentes.

4.3.1. Condiciones de operación de las tecnologías seleccionadas

Con el fin de realizar una evaluación del comportamiento que presentarán los distintos equipos empleados durante el proceso productivo de SAM granular, se realizó un análisis detallado de cada una de las tecnologías seleccionadas para poder definir las condiciones de operación según lo que se establece en cada una de las patentes. A partir de este análisis se elaboró la Tabla N° 6 en la cual se pueden observar las principales condiciones de operación de cada una de las tecnologías seleccionadas.

Tabla N° 6 Condiciones de operación de las tecnologías seleccionadas

Equipo	Condición de operación	A	B	C	D	E
Preneutralizador	Temperatura (°C)	120-205	N/A	N/A	N/A	N/A
	Relación molar NH ₃ :H ₂ SO ₄	0,9-1,5	N/A	N/A	N/A	N/A
Granulador	Temperatura (°C)	150-205	100	150	65-107	ambiente
	Relación molar	No data	No data	N/A	1,8-1,95	N/A

	NH ₃ :H ₂ SO ₄					
	Relación de reciclo	1,3	No data	0,5	3	No data

De igual manera, es necesario conocer las sustancias que manejarán los distintos equipos al implementar cada una de las tecnologías en estudio. A partir del análisis de estas tecnologías y de la data arrojada por el inventario de equipos realizado de la I-390, se construyó la Tabla N° 7, en la cual se expone el uso que se le dará al implementar cada uno de los procesos seleccionados, también se puede apreciar el material con el cual fueron construidos estos equipos. Para aquellas tecnologías que no requieran emplear algún equipo, se colocaron las siglas N/A (No Aplica).

Tabla N° 7 Comparación del uso que se les dará a cada equipo al implementar las diferentes tecnologías en estudio

Equipo	TAG	Material de Construcción	Materia que manejarán				
			A	B	C	D	E
Preneutralizador	A-201	S.S 316*	-Ácido sulfúrico (98%) -Amoníaco -Solución Saturada de SAM -Lodo SAM 10% agua	N/A	-Solución concentrada de Urea	N/A	N/A
Granulador	TR-201	Tambor de C.S** recubierto de EPDM	-Amoníaco -Solución Saturada de SAM -Lodo del A-201	-Amoníaco -Ácido sulfúrico (83%) -Cristales de SAM	-Solución concentrada de Urea -Cristales de SAM	-Amoníaco -Ácido sulfúrico (98%) -Cristales de SAM	-Yeso -Sulfato de Amonio
Secador	TR-401	C.S	-Gránulos de SAM	-Gránulos de SAM	-Gránulos de Urea-SAM	-Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Molino	MF-501	C.S	-Gránulos de SAM	-Gránulos de SAM	-Gránulos de Urea-SAM	-Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Cribas	SV-501	Malla de S.S 316L*	-Gránulos de SAM	-Gránulos de SAM	-Gránulos de Urea-SAM	-Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Enfriador	TR-601	C.S	N/A	N/A	-Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM	Enfriador
Silo de roca fosfática	SI-101	C.S	Cristales de SAM	Urea perlada	Cristales de SAM	Cristales de SAM y/o yeso	-Yeso -Sulfato de Amonio
Dosificador de roca	ED-100	C.S	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cinta transportadora	ET-100	Correa de caucho	Cristales de SAM	Urea perlada	Cristales de SAM	Cristales de SAM y/o yeso	Dosificador de roca
Tanque ácido fosfórico	SR-101	S.S 316L	Ácido Sulfúrico (83%)	Solución Saturada de Urea	N/A	N/A	N/A

(Continuación) Tabla N° 7 Comparación del uso que se les dará a cada equipo al implementar las diferentes tecnologías en estudio

Equipo	TAG	Material de Construcción	Materia que manejarán				
			A	B	C	D	E
Tanque licor de lavado	SR-102	S.S 316L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Bomba de ácido fosfórico	PC-101 A/B		Ácido Sulfúrico (83%)	Solución Saturada de Urea	N/A	N/A	N/A
Bomba de licor de lavado	PC-102 A/B		N/A	Solución Concentrada de Urea	N/A	N/A	N/A
Bombas de Lodo	PC-201 A/B		Lodo SAM (10% Agua)	N/A	N/A	N/A	N/A
Horno	H-401		N/A	N/A	N/A	Gases de combustión	Gases de combustión
Elevador de Cangilones	ET-501	C.S	Gránulos de SAM	Gránulos de SAM	Gránulos de UREA-SAM	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Dosificador de reciclo	ED-500	C.S	Gránulos de SAM	Gránulos de SAM	Gránulos de UREA-SAM	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Elevador de Cangilones	ET-502	C.S	Gránulos de SAM	Gránulos de SAM	Gránulos de UREA-SAM	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Cinta transportadora	ET-503	Correa de caucho	Gránulos de SAM	Gránulos de SAM	Gránulos de UREA-SAM	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Cinta transportadora	ET-604	Correa de caucho	N/A	N/A	N/A	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Elevador de cangilones	ET-603	C.S	N/A	N/A	N/A	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Cinta transportadora	ET-601	Correa de caucho	Gránulos de SAM	Gránulos de SAM	Gránulos de UREA-SAM	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM
Cinta transportadora	ET-602	Correa de caucho	Gránulos de SAM	Gránulos de SAM	Gránulos de UREA-SAM	Gránulos de SAM	-Gránulos de Yeso-SAM

SS 316L: Acero inoxidable 316L

C.S: Acero al Carbono

EPDM: Caucho de Etileno Propileno Dieno tipo M

4.3.2. Evaluación del comportamiento de los materiales de construcción empleados en los equipos existentes de la I-390

Empleando los datos arrojados por la Tabla N° 6 y la Tabla N° 7, conjuntamente con un estudio realizado a las propiedades de los materiales empleados en la construcción de los equipos, se determinó si los mismos son capaces de operar efectivamente bajo las condiciones de operación de las distintas tecnologías en estudio. En el caso de las industrias de procesos químicos la resistencia a la corrosión es la propiedad de mayor importancia a ser considerada en la evaluación de los materiales de construcción de los equipos (Universidad de Carabobo, 2003).

Las características de los aceros inoxidables se ven afectadas por la composición química de los mismos, siendo el carbono el principal determinante de muchas de las características de desempeño del metal al aumentar la dureza y la resistencia de los aceros a la vez que disminuye su ductilidad (Universidad de Carabobo, 2003); mientras que la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables se debe principalmente al cromo, otros elementos como el molibdeno y el nitrógeno también incrementan la resistencia a la corrosión, siendo el níquel el elemento que aporta protección añadida en aplicaciones químicas (Gual Steel S.L, s.f).

La principal diferencia entre los aceros inoxidables 316 y 136L es el contenido máximo permitido de carbono, lo cual afecta la característica de la soldadura entre el material. La misma diferencia se aprecia entre los aceros inoxidables 317 y 317L. Por otra parte se tiene que los aceros inoxidables 317 presentan un mayor contenido de Cromo y de Molibdeno en comparación con el tipo 316, por lo que se concluye que los aceros inoxidables tipo 317 presentarán mejor resistencia a la corrosión.

Para poder analizar la resistencia de los equipos a las nuevas condiciones de operación, es necesario además conocer la resistencia a la corrosión de los principales materiales de construcción de los equipos ante soluciones de distinta concentración de las principales materias primas y productos, y bajo distintas condiciones de temperatura. La velocidad de corrosión se mide típicamente en milésimas de pulgadas

al año (mpy, por sus siglas en inglés). Los compuestos evaluados son: ácido sulfúrico, sulfato de amonio y urea.

A continuación se presenta la Tabla N° 8 en la cual se observa la velocidad de corrosión del acero al carbono ante el ataque de soluciones de sulfato de amonio, ácido sulfúrico y urea a distintas condiciones de concentración y de temperatura. Una velocidad de corrosión aceptable para un material de costo relativamente bajo como el acero al carbono es del orden de 10 mpy (0,25mm/año) o menos, ya que a esta velocidad y con un diseño apropiado y tolerancia por corrosión adecuada, un recipiente de acero al carbono aportará un servicio de muchos años con bajo mantenimiento (Universidad de Carabobo, 2003).

Tabla N° 8 Resistencia del acero al carbono a la corrosión por soluciones de sulfato de amonio, ácido sulfúrico y urea a distintas condiciones de concentración y de temperatura

Sustancia	Concentración (%)	Temperatura (°F)	Velocidad de Corrosión (mpy)
Sulfato de amonio	5-35	25-75	<20
	5-35	75-125	>50
	45-50	275-325	>50
Ácido sulfúrico	65-95	125-175	>50
	75-85	75-125	20-50
	>85	75-125	<20
	100	175-225	>50
	25-35	25-75	20-50
Urea	25-35	75-125	>50
	45-50	25-175	20-50
	45-50	325-375	>50

Fuente: Corrosion Survey Database. NACE

Como se puede observar en la Tabla N° 8 las velocidades de corrosión del acero al carbono al manejar soluciones de sulfato de amonio son mucho mayores a las velocidades de corrosión aceptables. De igual manera, las velocidades de corrosión de este material al manejar soluciones de urea y de ácido sulfúrico son mayores que las aceptadas según la bibliografía consultada.

A pesar de las elevadas velocidades de corrosión, el acero al carbono es empleado para almacenar soluciones de ácido sulfúrico a concentraciones mayores a 63% en peso, debido a que a esas concentraciones elevadas es un oxidante fuerte que

produce una capa de óxido protectora, este fenómeno es conocido como pasivación (Goldin, s.f). Sin embargo, cualquier condición que cause turbulencia, tal como la agitación, es suficiente para eliminar esta capa protectora, lo cual puede conducir a la corrosión del equipo.

En el año 1988 la sección de Servicios Técnicos del Complejo Petroquímico Morón emitió un reporte donde se estudió la selección de material para las estructuras metálicas en la Instalación 330 del Complejo Petroquímico Morón en la cual se produce sulfato de amonio en cristales. En la Tabla N° 9 se muestran las velocidades de corrosión de algunos materiales metálicos en ambiente de sulfato de amonio.

Tabla N° 9 Velocidades de corrosión del acero al carbono y del acero inoxidable en ambiente de SAM

Material	Velocidad de corrosión (mpy)
Acero al Carbono	20-50
Acero Inoxidable	2

Fuente: PEQUIVEN S.A

Al analizar los valores de corrosión, y tomando en cuenta lo observado en la Instalación 330 se concluyó que el acero inoxidable posee una vida útil superior a la del acero al carbono en ambientes de sulfato de amonio, inclusive siendo éste recubierto con pintura (PEQUIVEN S.A, 1988). A partir de los datos reportados en los estudios realizados por la sección de Servicios Técnicos se puede concluir que no es viable emplear equipos construidos en acero al carbono para el manejo del sulfato de amonio en estado sólido; por otra parte la opción de aplicar un revestimiento a estos equipos no es una alternativa, ya que la experiencia indica que los equipos de acero al carbono han presentado corrosión inclusive cuando han sido galvanizados y posteriormente pintados (PEQUIVEN S.A, 1991).

Por estas razones, se concluye que aquellas tecnologías que manejan sulfato de amonio granular de elevada pureza tales como las tecnologías A, B y D, presentarán elevadas velocidades de corrosión en los equipos construidos de acero al carbono como lo son: el secador, el molino, el dosificador de reciclo, la tolva de recepción de materia prima sólida, los elevadores de cangilones y ductos. De igual manera, los granos de urea y sulfato de amonio producidos mediante la tecnología C, producirán

corrosión en los equipos construidos de acero al carbono, ya que este material no presenta resistencia al manejo de ninguno de los compuestos empleados.

Además del acero al carbono, también se debe evaluar el comportamiento de los aceros inoxidables 316L y 317L. Para materiales costosos tales como los aceros inoxidables, se permite una velocidad de corrosión máxima de 4 mpy (0,1 mm/año) (Universidad de Carabobo, 2003).

En la Tabla N° 10 se puede apreciar la resistencia de los aceros inoxidables 316L y 317L a soluciones de SAM, de ácido sulfúrico y de urea a distintas condiciones de concentración y de temperatura.

Tabla N° 10 Resistencia del acero inoxidable 316L y 317L a la corrosión por soluciones de SAM, ácido sulfúrico y urea a distintas condiciones de concentración y de temperatura

Sustancia	Concentración (%)	Temperatura (°F)	Velocidad de Corrosión (mpy)
Sulfato de amonio	5-50	25-225	<20
Ácido sulfúrico	75-95	75-175	>50
	>85	25-75	<2
	100	75-125	20-50
	100	125-225	>50
Urea	5-50	75-225	<20
	25-35	325-375	<2
	100	325-375	<2

Fuente: Corrosion Survey Database. NACE

Al observar la Tabla N° 10 se puede concluir que los aceros inoxidables 316L y 317L no deben emplearse para aquellas condiciones de operación que involucren el manejo de soluciones de ácido sulfúrico a temperaturas por encima de los 75 °F (24 °C), soluciones de urea por debajo de los 325°F (163 °C), ni soluciones de sulfato de amonio, ya que se observan velocidades de corrosión por encima de la máxima aceptable.

Según lo observado en la Tabla N° 10 se concluye que el tanque empleado por las tecnología A durante la preparación de las soluciones de sulfato de amonio, presentará problemas de corrosión, por otra parte, la tecnología B emplea este tanque para la dilución del ácido sulfúrico, el cual podrá emplearse siempre que la concentración se mantenga por encima de 85% y la temperatura se encuentre por

debajo de 75°F (24°C). Además de esto, el preneutralizador dentro del cual se realizará la reacción entre amoníaco y ácido sulfúrico en la tecnología A presentará graves problemas de corrosión. Por otra parte, las soluciones saturadas y concentradas de urea necesarias en la tecnología C, podrán prepararse sin presentar corrosión en los equipos al mantener temperaturas elevadas. Adicionalmente, las mallas de las cribas construidas en acero inoxidable 316L no presentarán problemas al manejar ninguno de los gránulos producidos por las tecnologías en estudio.

Además de los materiales de construcción analizados anteriormente, también se debe estudiar el material conocido como EPDM (Caucho Etileno Propileno Dieno tipo M), ya que el granulador está recubierto internamente por este material. El EPDM tiene una excelente resistencia a la abrasión y a la ruptura, puede operar satisfactoriamente a temperaturas entre -40 y 140°C, además posee excelente resistencia durante el manejo de ácidos y bases tanto fuertes como débiles. (ZENITH, s.f.). Según una tabla de compatibilidad del caucho EPDM con otras sustancias químicas realizada por la compañía FBS (Finding Better Solutions, s.f), este material se puede emplear para manejar sulfato de amonio, ácido sulfúrico y urea sin presentar problemas de corrosión durante la operación, sin embargo habría que evaluar si durante el proceso de granulación se sobrepasa la temperatura máxima de operación de este material.

En las tecnologías A y C se sobrepasa la temperatura máxima permitida para la operación de este material, por lo que en caso de implantar estas tecnologías se debe cambiar este recubrimiento por otro que presente resistencia a los materiales a ser manejados y que pueda operar a mayores temperaturas.

También es necesario analizar la resistencia a la abrasión que presentan los diversos equipos pertenecientes a la I-390. La abrasión es la capacidad que tiene un material de desgastar a otro debido a la fricción, siendo el silicio uno de los materiales más abrasivos que existen. La I-390 fue diseñada para producir RPA granulado, para realizar este proceso se empleaba roca fosfática proveniente de la mina Rieci, la cual contiene aproximadamente un 30% de óxido de silicio y un 40%

de óxido de calcio, por lo que se puede concluir que la roca fosfática es un material altamente abrasivo, a partir de esto se llega a la conclusión de que los equipos pertenecientes a la I-390 son capaces de manejar sustancias abrasivas sin presentar problemas durante la operación.

Por medio de análisis cualitativos y cuantitativos de los datos presentados sobre la resistencia de los distintos materiales al someterse a diferentes condiciones de operación, se llevó a cabo la construcción de un cuadro resumen de lo antes planteado. En la Tabla N° 11, se puede apreciar una comparación de la resistencia que presentarán los equipos al ejecutar los distintos procesos.

En la Tabla N° 11 se puede observar, que las tecnologías cuyo producto final es sulfato de amonio de alta pureza presentarán problemas de corrosión debido a la gran cantidad de equipos que están construidos de acero al carbono, siendo este un material no recomendado para usar en ambientes de sulfato de amonio, y aunque en esta tabla se especifica que las cintas transportadoras no presentarán problemas de corrosión debido a que la correa está construida en material de caucho, la experiencia ha demostrado que la estructura de las cintas construidas de acero al carbono si presentarán problemas de corrosión aunque no se encuentren en contacto directo con el sulfato de amonio. Además de esto tampoco se recomienda usar recubrimientos orgánicos debido a las elevadas velocidades de corrosión y a la complejidad de algunos de los equipos, y el reemplazo de la totalidad de los ductos y equipos no es posible debido a los elevados costos implicados.

Tabla N° 11 Comparación de la resistencia que presentarán los equipos mayores y menores al llevar a cabo los distintos procesos

Equipo	TAG	Material	Tecnología A	Tecnología B	Tecnología C	Tecnología D	Tecnología E
Pre-neutralizador	A-201	S.S 316L	Corrosión	N/A	N/A	N/A	N/A
Granulador	TR-201	C.S recubierto de EPDM	Temperaturas superan la máxima de operación del EPDM.	NO corrosión NO abrasión	Temperaturas superan la máxima de operación del EPDM.	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión
Secador	TR-401	C.S	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Enfriador	TR-601	C.S	N/A	N/A	N/A	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Cribas	SV-501	Malla de S.S 316L	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión
Molino	MF-501	C.S	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Silo	SI-101	C.S	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Dosificador de roca	ED-100	C.S	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Cinta transportadora	ET-100	Correa de caucho	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión
Tanque	SR-101	S.S 316L	Corrosión.	NO corrosión.	N/A	N/A	N/A
Tanque	SR-102	S.S 316L	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Horno	H-401		NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión
Elevador de cangilones	ET-501	C.S	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Dosificador de reciclo	ED-500	C.S	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	NO corrosión NO abrasión

(Continuación) Tabla N° 11 Comparación de la resistencia que presentarán los equipos mayores y menores al llevar a cabo los distintos procesos

Equipo	TAG	Material	Tecnología A	Tecnología B	Tecnología C	Tecnología D	Tecnología E
Elevador de cangilones	ET-502	C.S	Corrosión	Corrosión	Corrosión	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Cinta transportadora	ET-503	Correa de caucho	NO corrosión NO abrasión				
Cinta transportadora	ET-604	Correa de caucho	N/A	N/A	N/A	NO corrosión NO abrasión	NO corrosión NO abrasión
Elevador de cangilones	ET-603	C.S	N/A	N/A	N/A	Corrosión	NO corrosión NO abrasión
Cinta transportadora	ET-601	Correa de caucho	NO corrosión NO abrasión				
Cinta transportadora	ET-602	Correa de caucho	NO corrosión NO abrasión				

En el caso de preparar la solución concentrada de urea necesaria para la tecnología C en la Instalación 390, se necesitaría el tanque SR-101 para la formación de una solución saturada y el pre-neutralizador A-201 para concentrar la solución, evaporando agua mediante la adición de vapor. En este caso, ninguno de los equipos presentaría problemas de corrosión mientras operen a temperaturas entre 160 y 190 °C.

Por otra parte, la tecnología E no presenta problemas de corrosión ni de abrasión, ya que se emplea un material de relleno no corrosivo el cual además suministra una mayor cantidad de nutrientes al producto final. Esta tecnología emplea como material de relleno el fosfoso, el cual no presenta problemas de corrosión ni de abrasión en el acero al carbono. Sin embargo, debido a que la composición química de éste material varía dependiendo de las características de la roca fosfática y de las condiciones de operación empleadas durante la producción del ácido fosfórico, es posible que en la práctica se observen mayores daños por corrosión que los esperados.

4.3.3. Selección de la tecnología a emplear

Luego de haber realizado diferentes análisis a cada una de las tecnologías en estudio, se realizó el proceso de escogencia de la tecnología que mejor se adecúe a la instalación existente y que genere un producto atractivo tanto en composición de nutrientes como en propiedades físicas. La elección de la tecnología más adecuada se efectuó elaborando una matriz de selección, la cual toma en cuenta las características más influyentes en la selección de la tecnología y asignándole distintas ponderaciones a cada una de ellas basadas en su importancia, donde la sumatoria de las ponderaciones es 100%.

Para asignar las ponderaciones a cada característica principal, fue necesario llevar a cabo una revisión de trabajos realizados que incluyeran matrices de selección de tecnologías, así como discusiones con los ingenieros de procesos y otros profesionales conocedores del área. A las características tecnológicas se le asignó una ponderación de 35%, a las operacionales una ponderación del 20%, mientras que a las

económicas una ponderación de 45%. Se puede observar que las características económicas poseen el mayor peso, esto se debe a que están directamente relacionadas con la factibilidad económica y rentabilidad del proyecto, por otra parte las características tecnológicas presentan una ponderación intermedia, ya que de ellas depende en gran parte la factibilidad técnica de la aplicación de la tecnología en la I-390.

Luego de determinar las principales características influyentes y sus ponderaciones, se procedió a seleccionar y ponderar los criterios pertenecientes a cada una de las características principales para lo cual fue necesario realizar una revisión de antecedentes y trabajos relacionados al tema, obteniendo como resultado la Tabla N° 12.

Tabla N° 12 Ponderación de los criterios influyentes en el proceso de selección de tecnología

Características	Criterios	Ponderación (%)
Tecnológicas	Capacidad de producción	10
	Complejidad de los cambios a realizar	5
	Calidad del producto	10
	Impacto ambiental	10
Operacionales	Disponibilidad de materia prima	5
	Complejidad de la Operatividad	5
	Frecuencia de mantenimiento	5
	Velocidades de corrosión implicadas	5
Económicas	Costo de la materia prima	5
	Costos de Insumos y Servicios requeridos	5
	Costos de equipos inexistentes necesarios para el proceso	10
	Costo de producción	15
	Precio del producto final	10

Finalmente, luego de asignadas las ponderaciones de cada criterio de evaluación, se realizó una asignación de puntajes en una escala del uno (1) al cinco (5) a cada uno de los criterios para las diferentes tecnologías en estudio, asignando un puntaje de cinco (5) a la condición más favorable y colocando un puntaje de uno (1) a la condición más desfavorable, y por ende la tecnología con mayor ponderación será la seleccionada. Esta evaluación fue principalmente cualitativa y está basada principalmente en todo lo discutido anteriormente.

Tabla N° 13 Matriz de selección de tecnología

Criterios		Peso (%)	Tecnología A		Tecnología B		Tecnología C		Tecnología D		Tecnología E	
			Puntos	Total	Puntos	Total	Puntos	Total	Puntos	Total	Puntos	Total
TECNOLÓGICAS	Capacidad de producción	10	3	0,3	3	0,3	5	0,5	1	0,1	4	0,4
	Complejidad de los cambios a realizar	5	3	0,15	4	0,2	2	0,1	3	0,15	5	0,25
	Calidad del producto	10	1	0,1	5	0,5	5	0,5	5	0,5	3	0,3
	Impacto ambiental	10	3	0,3	3	0,3	4	0,4	3	0,3	5	0,5
OPERACIONALES	Disponibilidad de materia prima	5	5	0,25	5	0,25	4	0,2	5	0,25	5	0,25
	Complejidad de la Operatividad	5	1	0,05	3	0,15	1	0,05	3	0,15	5	0,25
	Frecuencia de mantenimiento	5	2	0,1	4	0,2	4	0,2	4	0,2	5	0,25
	Velocidades de corrosión	5	1	0,05	3	0,15	3	0,15	3	0,15	5	0,25
ECONÓMICAS	Costo de la materia prima	5	2	0,1	2	0,1	4	0,2	2	0,1	5	0,25
	Costos de Insumos y Servicios	5	5	0,25	4	0,2	3	0,15	3	0,15	3	0,15
	Costos de equipos nuevos	10	3	0,3	4	0,4	3	0,3	3	0,3	5	0,5
	Costo de producción	15	3	0,45	4	0,6	3	0,45	3	0,45	5	0,75
	Precio del producto final	10	2	0,2	4	0,4	4	0,4	5	0,5	4	0,4
	TOTAL	100		2,6		3,75		3,6		3,3		4,5

Una vez aplicada la matriz de selección se obtuvo como resultado que la tecnología a emplear es la E, ya que posee el mayor puntaje, siendo las principales ventajas de esta tecnología su bajo costo en materias primas, debido a que emplea un subproducto de bajo precio para su elaboración, la poca dificultad en la operación y que, en principio, no será necesario realizar cambios significativos en la planta. Por el contrario, la tecnología A obtuvo el menor puntaje, lo cual concuerda con el hecho de que este proceso no se encuentra en uso comercial debido a las altas velocidades de corrosión que se presentaron (Fischbein, 1988).

4.3.4. Evaluación del funcionamiento de los equipos necesarios para lograr la granulación propuesta

Para evaluar el funcionamiento y rendimiento de los diversos equipos requeridos en el proceso de granulación deseado, se realizó un balance de masa y energía del proceso para determinar los flujos de materia prima e insumos requeridos.

Con la finalidad de efectuar el balance de masa general del proceso y determinar los flujos máscicos de materia prima requeridos fue necesario establecer la producción deseada, la cual depende principalmente de la capacidad de los equipos instalados en la planta, la relación básica de las diferentes materias primas (rigiéndose principalmente por lo señalado en la tecnología seleccionada), la distribución de tamaño de las partículas a la salida del granulador y la humedad permitida en el producto final. En el Apéndice B se presentan los cálculos tipo empleados para resolver el balance de masa y energía, así como los datos establecidos a partir de los cuales se determinó el flujo máscico necesario de materias primas, estos valores se observan en la Tabla N° 14 presentada a continuación.

Tabla N° 14 Flujo máscico requerido de materias primas

Materia prima	Flujo máscico (TMH)
Sulfato de amonio	2,86
Fosfoyeso	11,43
Agua	3,69

Estas materias primas serán alimentadas al granulador junto con 47,5 TMH de reciclo, dentro de este equipo se generarán granos con un tamaño promedio de 3mm de diámetro y una humedad de 10%. Se debe cumplir una relación de 3 toneladas de reciclo por cada tonelada de producto final, para lo cual es necesario recircular parte de las partículas de tamaño óptimo, y para evitar la formación de gruesos, estas partículas se alimentarán a un molino para disminuir su tamaño.

Según lo descrito por Achorn en 1993 en la Tabla N° 15 se exponen los criterios que se deben cumplir para un correcto desempeño del granulador-amoniador.

Tabla N° 15 Criterios empleados para el diseño de granuladores tipo tambor

Nº	Criterio	Valor
1	Proporción Longitud / Diámetro (adim)	2,0 : 1,0
2	Tiempo de retención (min)	2 a 7
3	Volumen retenido / Volumen total (%)	30
4	Área superficial del cilindro / Carga de producción (pie ² /TPH)	1 a 2
5	Flujo másico (TPH / ft ²)	3 a 5
6	Velocidad de rotación (RPM)	$\frac{15}{\sqrt{D(m)}}$

Fuente: Frank Achorn, 1993

Para evaluar el desempeño del granulador, al operar la carga especificada, se debe determinar si el funcionamiento del equipo cumple con los criterios de diseño presentados en la tabla anterior. Una vez determinada la carga que manejará el granulador se calculó el valor de los criterios de diseño, los cuales se presentan a continuación en la Tabla N° 16.

Tabla N° 16 Evaluación del desempeño del granulador

Nº	Criterio de diseño	Valor
1	Proporción Longitud / Diámetro (adim)	1,89
2	Tiempo de retención (min)	5
3	Volumen retenido / Volumen total (%)	20,68
4	Área superficial del cilindro / Carga de producción (pie ² /TPH)	7,33
5	Flujo másico (TPH / ft ²)	1,03
6	Velocidad de rotación (RPM)	9

Al comparar los valores reportados en la Tabla N° 16 y en la Tabla N° 15 se puede observar que los criterios de diseño 3, 4 y 5 no se encuentran dentro de los parámetros establecidos para un buen funcionamiento del granulador, sin embargo, los valores reportados en la Tabla N° 15 están establecidos principalmente para equipos granuladores donde ocurre el proceso de amonización, en los cuales es importante minimizar las pérdidas de amoníaco sin reaccionar, sin embargo en el proceso seleccionado no ocurren reacciones dentro del equipo de granulación, por lo que estos parámetros de diseño no son críticos para el proceso en estudio.

Los granos de SAM que abandonan el granulador, poseen un porcentaje de humedad de 10%, por lo cual se envían a un secador rotatorio para reducir el contenido de humedad hasta un 5%. A partir de un balance de masa y energía se determinó la cantidad de aire caliente necesaria para llevar a cabo el proceso de secado. En la Tabla N° 17 se observan las especificaciones del sólido tanto a la entrada como a la salida del equipo.

Tabla N° 17 Condiciones del sólido a la entrada y salida del secador rotatorio

Condición	Valor
Flujo másico sólido seco (Kg/h)	59.525
Temperatura entrada (°C)	65
Temperatura salida (°C)	85
Humedad entrada (Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,10
Humedad salida(Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,05

El flujo de sólido seco se determinó a partir del balance de masa del proceso. Por otra parte los datos de temperatura y humedad son especificados por la tecnología y por los requerimientos del producto final. El flujo de aire caliente necesario para lograr el secado y sus condiciones principales se presentan en la Tabla N° 18.

Tabla N° 18 Condiciones del aire caliente en la entrada y en la salida del secador rotatorio

Condición	Valor
Flujo másico gas seco (Kg/h)	48.828
Temperatura entrada (°C)	250
Temperatura salida (°C)	80
Humedad entrada (Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,0272
Humedad salida (Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,0882

Con la finalidad de determinar el flujo de aire caliente necesario se deben especificar las temperaturas de entrada y salida de la corriente de aire, las cuales fueron determinadas tomando como referencia los procesos de secado que se realizan en el Complejo Petroquímico Morón.

Los granos secos son enviados a la etapa de clasificación, en donde los diferentes tamaños de partícula son separados en tres corrientes. La criba instalada en planta posee una capacidad normal de operación de 75TMH, por lo cual será capaz de manejar los 62,5TMH de producto granulado seco. En la Tabla N° 19, expuesta a continuación, se puede observar la distribución de tamaño de partículas producidas, se asume que todos los granos con un tamaño óptimo se envían a producto. Los flujos másicos se determinaron por medio del balance de masa, el cual se encuentra en el Apéndice B.

Tabla N° 19 Distribución de tamaño de los granos producidos

Tamaños	Flujo másico (TMH)
Óptimos	25
Finos	18,8
Gruesos	18,8

El producto de tamaño óptimo se alimenta a la etapa de enfriado, en la cual se pone en contacto con una corriente de aire a temperatura ambiente dentro de un enfriador rotatorio. En la Tabla N° 20 se observan las especificaciones del sólido tanto a la entrada como a la salida del equipo.

Tabla N° 20 Condiciones del sólido a la entrada y salida del enfriador rotatorio

Condición	Valor
Flujo másico sólido seco (Kg/h)	14.286
Temperatura entrada (°C)	85
Temperatura salida (°C)	40
Humedad entrada (Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,05
Humedad salida (Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,045

El flujo de sólido seco es el determinado a partir del balance de masa del proceso, mientras que los datos de temperatura y humedad son especificados por la

tecnología y por los requerimientos del producto final. El flujo de aire de enfriamiento necesario para lograr objetivo del proceso y sus condiciones principales se presentan a continuación en la Tabla N° 21.

Tabla N° 21 Condiciones del aire a la entrada y salida del enfriador rotatorio

Condición	Valor
Flujo másico gas seco (Kg/h)	32.776
Temperatura entrada (°C)	30
Temperatura salida (°C)	50
Humedad entrada (Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,0272
Humedad salida (Kg _{agua} /Kg _{sólido seco})	0,0316

Por otra parte, el producto de tamaño superior a 4 mm de diámetro se alimenta a un molino para reducir su tamaño y reincorporar las partículas al granulador. El molino instalado en planta es de tipo cadenas, sin embargo para la reducción de granos de yeso se recomienda el uso de los molinos tipo martillo. Se seleccionó un molino de martillo basado en el flujo de producto que manejará el equipo, cuyas especificaciones se pueden observar en la Tabla N° 22 presentada a continuación.

Tabla N° 22 Características del molino de martillo a emplear para la reducción de tamaño de las partículas gruesas

Características del molino de martillo		
Tamaño del molino	Diámetro (plg)	20
	Ancho (plg)	16
Flujo de alimentación (TMH)		15-20
Velocidad del motor (R.P.M)		720-870

Fuente: Stedman Machine Company (1996)

Además de este molino, también se requiere reducir el tamaño de la corriente de partículas de tamaño óptimo que se recircularán al sistema para mantener una relación de reciclo adecuada, para lo cual se empleará un molino tipo martillo cuyas características se pueden observar en la Tabla N° 23 presentada a continuación.

Tabla N° 23 Características del molino de martillo a emplear para la reducción de tamaño de las partículas de tamaño óptimo recirculadas

Características del molino de martillo		
Tamaño del molino	Diámetro (plg)	20
	Ancho (plg)	12
Flujo de alimentación (TMH)		9-12
Velocidad del motor (R.P.M)		720-870

Fuente: Stedman Machine Company (1996)

4.4. SIMULACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PROPUESTAS

4.4.1. Selección del simulador comercial a emplear

Se identificaron algunos de los simuladores comerciales que poseen la data y los equipos necesarios para el manejo de materiales sólidos y que puedan emplearse para la simulación de los procesos de granulación de fertilizantes. En la Tabla N° 24, se puede observar una comparación entre algunos de los simuladores comerciales disponibles para el manejo de sólido.

Tabla N° 24 Comparación de los simuladores comerciales

Pro II	Aspen Plus	SolidSim	SuperProDesigner
Secador	-----	Secadores	Secadores
-----	Molinos	Molinos	Molinos
-----	Clasificadores	Clasificadores	-----
Cristalizador	Cristalizador	Cristalizador	Cristalizador
-----	-----	-----	Equipos para el transporte de sólidos
Filtros	-----	Filtros	Filtros
-----	-----	Granuladores	-----
Decantador	-----	Decantador	Decantador
-----	Separadores sólido/líquido	Separadores sólido/líquido	-----
-----	Separadores ciclónicos	Separadores ciclónicos	Separadores ciclónicos
Fundidor/congelador	-----	-----	-----

Como se puede observar el simulador comercial SolidSim es el más adecuado para la simulación de este proceso ya que de todos los simuladores identificados es el único que posee equipos para la granulación.

SolidSim es un simulador basado en diagramas de flujo para procesos complejos que involucran sólidos, puede ser utilizado para predecir el desempeño de una planta de procesamiento y para simular ampliaciones de plantas, entre otros. Además, cuenta con dos modalidades de cálculo: el método abreviado y el método detallado. Las unidades de cálculo abreviado se emplean cuando no se conocen los detalles específicos de las unidades involucradas en la simulación, generan, por medio de balances de masa y energía, la primera información para la selección y dimensionamiento de los equipos, sin embargo, dentro de un mismo diagrama de flujo se pueden emplear equipos con modalidad de cálculo abreviado y otros que emplean el cálculo detallado, dependiendo de las características del proceso a simular (SolidSim, 2011).

4.4.2. Construcción del diagrama de flujo para la simulación y resultados

Con la finalidad de reproducir las variables del proceso en estudio a través de la simulación, se debieron tomar en cuenta algunas consideraciones al momento de construir el diagrama de flujo de la simulación, ya que los paquetes de simulación no disponen de las operaciones unitarias tal y como se requieren, por lo que se deben elegir cuidadosamente los equipos que mejor se asemejen a los instalados en planta.

A partir de la descripción del proceso y del diagrama de bloques presentado en la Figura N° 7, se generó el diagrama de flujo de la simulación en la interfaz de SolidSim, el cual se presenta en la Figura N° 8.

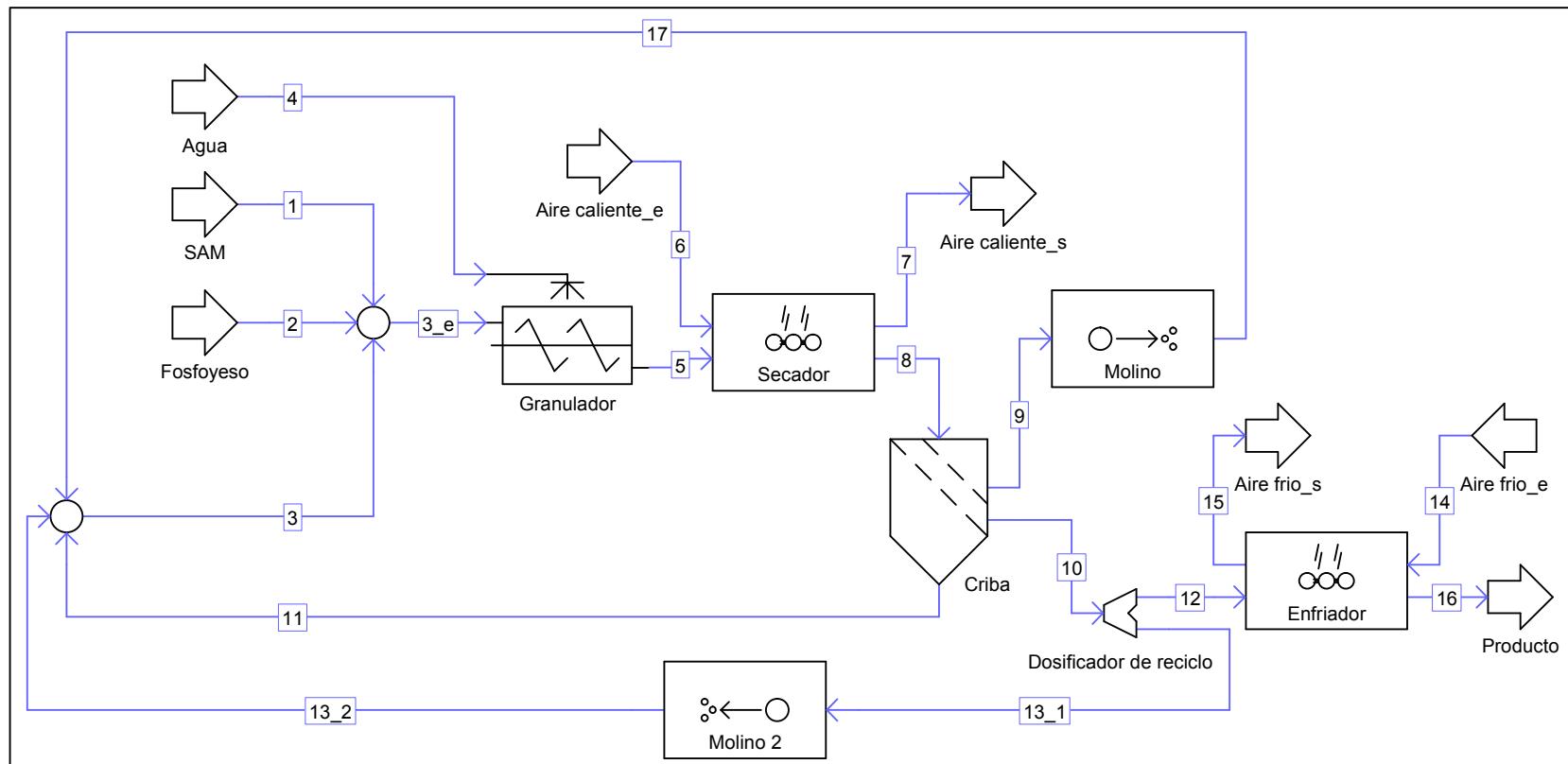


Figura N° 8 Diagrama de flujo del proceso en el simulador SolidSim

Se ingresaron como datos de entrada aquellos obtenidos a partir de las especificaciones del proceso y los determinados por medio del balance de masa y de energía. En la Tabla N° 25 se pueden observar el flujo y temperatura de las corrientes de entrada al proceso.

Tabla N° 25 Variables de operación empleadas como entrada para la simulación

Corriente	Flujo (Kg/h)	Temperatura (°C)
SAM cristalino al granulador (Kg/h)	2.860	30
Fosfoyeso al granulador (Kg/h)	11.430	30
Agua al granulador (Kg/h)	3.690	30
Aire caliente al secador (Kg/h)	50.152	250
Aire frío al enfriador (Kg/h)	33.668	31

Además de los datos presentados en la Tabla N° 25, cada unidad requiere de parámetros de entrada específicos para su adecuado funcionamiento. A continuación se explicarán detalladamente las variables de entrada requeridas para cada uno de los equipos que conforman la simulación.

Granulador

Esta unidad requiere de parámetros específicos para su simulación, con la finalidad de establecer estos parámetros correctamente, es necesario comprender el modelo matemático empleado por SolidSim para representar la unidad. En este equipo, el mecanismo de formación de grano que se simula es por aglomeración. A continuación se presenta la Figura N° 9, en la cual se puede observar gráficamente éste mecanismo.

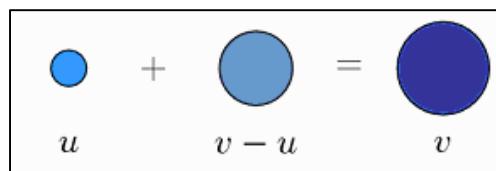


Figura N° 9 Mecanismo de formación del grano

De la figura anterior se destaca que al aglomerarse dos partículas de tamaños determinados, el tamaño del grano resultante será igual a la suma de sus diámetros, lo cual indica que en la granulación se conservan los volúmenes de las partículas semillas. Por otra parte, la velocidad de formación de partículas se puede definir por medio de la Ecuación N°6:

$$\beta(t, u, v) = \beta_0(t) \cdot \beta(u, v)$$

Ecuación N°6

Dónde:

$\beta(t, u, v)$: Velocidad de formación de las partículas (mm/s).

β_0 : Constante dependiente del tiempo (Prefactor) (1/s).

$\beta(u, v)$: Parte de la ecuación dependiente del tamaño de la partícula (mm).

SolidSim cuenta con distintas formas de calcular el factor dependiente del tamaño de partícula. Para esta simulación se obtuvieron mejores resultados empleando el modelo de producto, el cual está definido por medio de la Ecuación N°7:

$$\beta(u, v) = u \cdot v$$

Ecuación N°7

Además de estos parámetros fue necesario especificar la masa de sólidos que forman un lecho de granos dentro del equipo, este parámetro fue determinado a partir del balance de masa global y se especificó en 3000Kg.

Secador

En la simulación de esta unidad, se empleó un método abreviado de cálculo, ya que SolidSim no cuenta con el equipo existente en planta. Se debe definir el tipo de secador a emplear, en este caso se definió un secador de convección con flujo co-corriente, se especificó la humedad a la salida en 5% y un cambio de temperatura en el sólido de 20°C según lo establecido en el proceso.

Cribas

Para definir este equipo se deben especificar el número de mallas que posee la criba, el modelo de clasificación a emplear y los tamaños de partícula que retendrán cada una de las mallas.

En la simulación se definieron 2 mallas, empleando el modelo ideal de clasificación de partículas y estableciendo un tamaño de partícula de 4mm para la malla superior y de 1 mm para la malla inferior. Todos estos valores fueron establecidos según el equipo instalado en planta y los requerimientos de tamaño establecidos para el producto.

Molino

Este equipo se simuló empleando una unidad de método abreviado de disminución de tamaño de partículas, debido a que el simulador no cuenta con el equipo instalado en planta. Es el equipo más sencillo empleado, ya que sólo se requiere ingresar el tamaño de partícula deseado a la salida del mismo, se especificó un tamaño medio de 1mm.

Enfriador

Esta unidad se simuló con el mismo equipo empleado para el secador, debido a que el simulador no posee equipos para el proceso de enfriado. En este caso se definió un equipo de convección con flujo contracorriente, se especificó la humedad a la salida en 4% y un cambio de temperatura en el sólido de -45°C según lo establecido en el proceso.

4.4.3. Resultados obtenidos en la simulación

Se comparó el valor obtenido en la simulación de los flujos en las corrientes más importantes del sistema, con los valores calculados por medio de los balances de masa y energía. Es importante destacar que al momento de realizar dichos balances, se tomaron en cuenta algunos supuestos, debido a que en las patentes omiten información requerida para realizar estos cálculos. Estas suposiciones se

establecieron basándose en experiencias pasadas y en el comportamiento general de los procesos de granulación, es por esto que los cálculos realizados son preliminares por lo cual se permite una desviación máxima con respecto a los resultados arrojados por la simulación de un 15%. En la Tabla N° 26 presentada a continuación, se observa la comparación entre el flujo de diversas corrientes calculados por medio de los balances, y el obtenido a partir de la simulación.

Tabla N° 26 Comparación de los flujos obtenidos en la simulación del proceso

Corriente	Descripción	Flujo simulado (Kg/h)	Flujo Calculado (Kg/h)	% Error
3_e	Alimentación al granulador	53.017	61.786	-14,19%
5	Granos	56.707	65.480	-13,40%
8	Granos secos	52.981	62.500	-15,23%
9	Gruesos	26.434	18.800	40,61%
11	Finos	2.292,9	18.800	-88,32%
16	Producto	14.118	14.857	-4,97%
3	Reciclo	38.727	47.500	-18,47%

Se puede observar que en la mayoría de las corrientes la desviación de los resultados arrojados por el simulador con respecto a los valores esperados, son cercanas al 15%. Sin embargo, en el caso de las corrientes de finos y gruesos se pueden observar unas desviaciones elevadas, lo cual indica que la distribución del tamaño de partículas no se comporta según lo supuesto para el balance de masa. Sin embargo, a pesar de que el flujo de gruesos arrojado por la simulación es 40,61% mayor que el calculado, no se supera la capacidad de manejo de los equipos involucrados, además de esto se obtuvo en la simulación un flujo de partículas finas 88,32% menor que lo esperado. Las diferencias entre estas dos corrientes con respecto a los flujos esperados se compensan en el reciclo, dando como resultado una desviación en dicha corriente de 18,47% la cual es ligeramente superior a la máxima permitida.

Otro parámetro de importancia para el proceso es la relación de reciclo/producto, la cual debe mantenerse en un valor de aproximadamente 3, para garantizar una

relación óptima entre los sólidos y líquidos dentro del granulador. En la Tabla N° 27 presentada a continuación, se puede observar la desviación obtenida entre la relación de reciclo calculada y la obtenida por medio de la simulación.

Tabla N° 27 Comparación de la relación de reciclo obtenida en la simulación

Valor simulado	Valor calculado	%Error
2,74	3,20	14,2%

Se puede observar, que la relación de reciclo obtenida por medio de la simulación, posee un porcentaje de error con respecto a la calculada cercana al 15% máximo aceptado.

Además de los flujos, también se compararon las temperaturas de las corrientes seleccionadas, esta comparación se puede observar en la Tabla N° 28 presentada a continuación.

Tabla N° 28 Comparación de temperaturas obtenidas en la simulación del proceso

Corriente	Descripción	Temperatura Simulada (°C)	Temperatura Calculada (°C)	%Error
3_e	Alimentación al granulador	66,4	65	2,18%
5	Granos	59,9	60,0	-0,14%
8	Granos secos	79,9	85,0	-5,98%
9	Gruesos	79,9	85,0	-5,98%
11	Finos	79,9	85,0	-5,98%
16	Producto	40,1	40,0	0,27%
3	Reciclo	79,9	85,0	-5,98%

En la Tabla N° 28 se puede apreciar que las desviaciones entre las temperaturas determinadas por el simulador con respecto a los valores esperados no son significativas, por lo cual el modelo termodinámico empleado por el simulador se ajusta a lo esperado teóricamente.

4.5. FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA IMPLANTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA

4.5.1. Determinación de la factibilidad técnica de la implantación de los cambios a efectuar en la instalación

La tecnología seleccionada se ajusta a la línea de proceso actual de la instalación, por lo cual, los cambios necesarios para poder implementar la tecnología no son significativos. Se debe poner en funcionamiento permanente el sistema de alimentación de sólidos al granulador, el cual funciona actualmente durante los arranques de planta, por lo que no es necesario realizar cambios significativos en esta área. Además de esto, es necesario reemplazar el molino de cadenas existente por uno tipo martillo, el cual es más adecuado para manejar el material producido, sin embargo este es un cambio menor, ya que la instalación del mismo no es complicada. También es necesaria la compra e instalación de otro molino de martillo que se encargue de reducir el tamaño de las partículas óptimas que se envían a reciclo con la finalidad de disminuir la formación de gruesos excesivos, no obstante, en la I-390 hay espacio físico para la instalación de este nuevo molino, por lo cual su colocación es factible técnicamente.

Por otra parte, no es necesario modificar la configuración de los equipos en la planta, además de esto, los equipos requeridos para llevar a cabo el proceso seleccionado se encuentran en condiciones de operar.

Por lo anterior, se puede concluir que desde el punto de vista técnico, es factible implantar el proceso seleccionado en la instalación existente.

En la Figura N° 10 se puede observar la distribución en planta de los equipos que operan actualmente en la I-390. Por otra parte en la Figura N° 11 se observa cómo quedarían distribuidos los equipos en la I-390 para llevar a cabo el proceso de granulación de SAM propuesto.

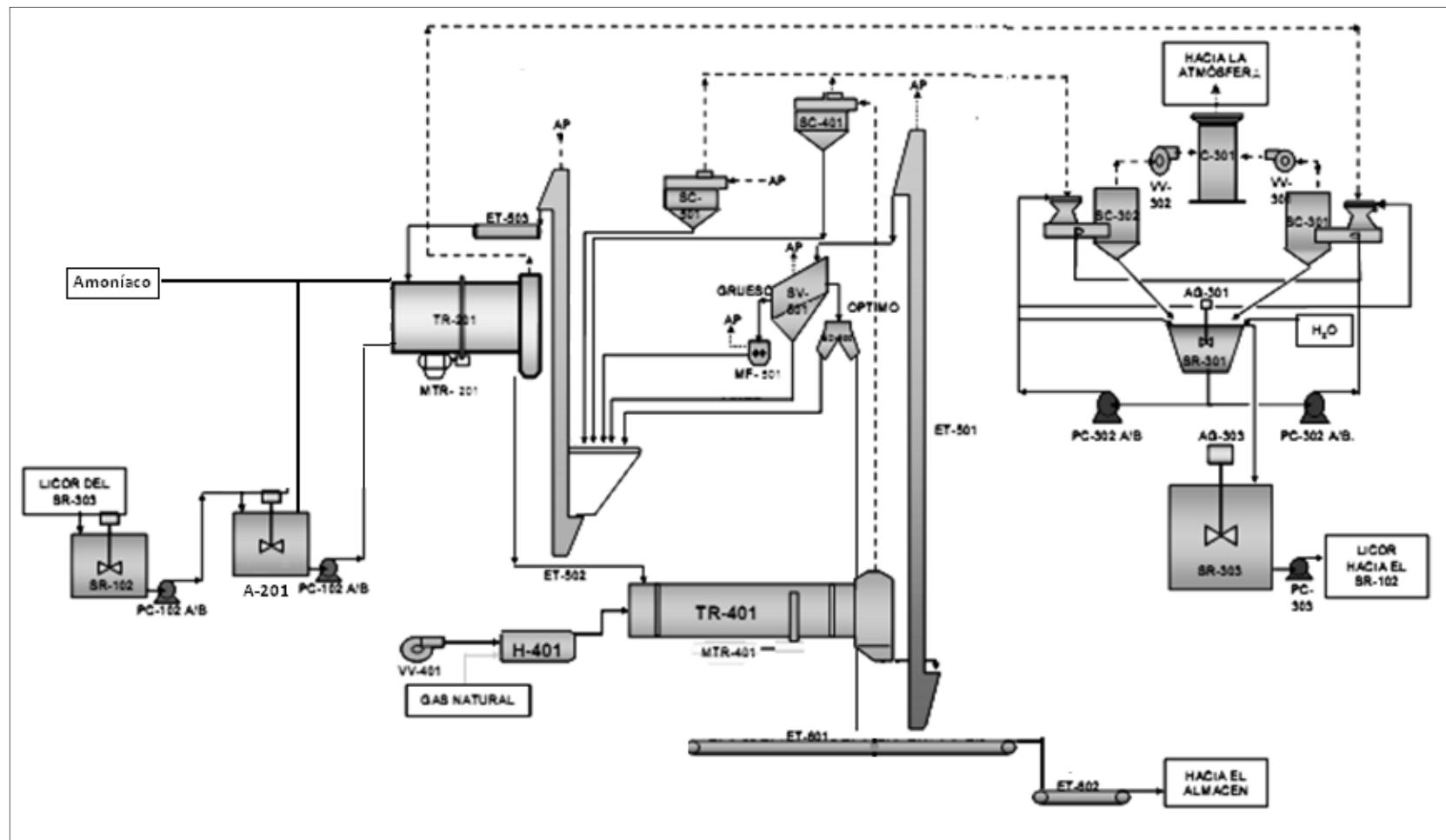


Figura N° 10 Esquema del proceso actual manejado en la I-390

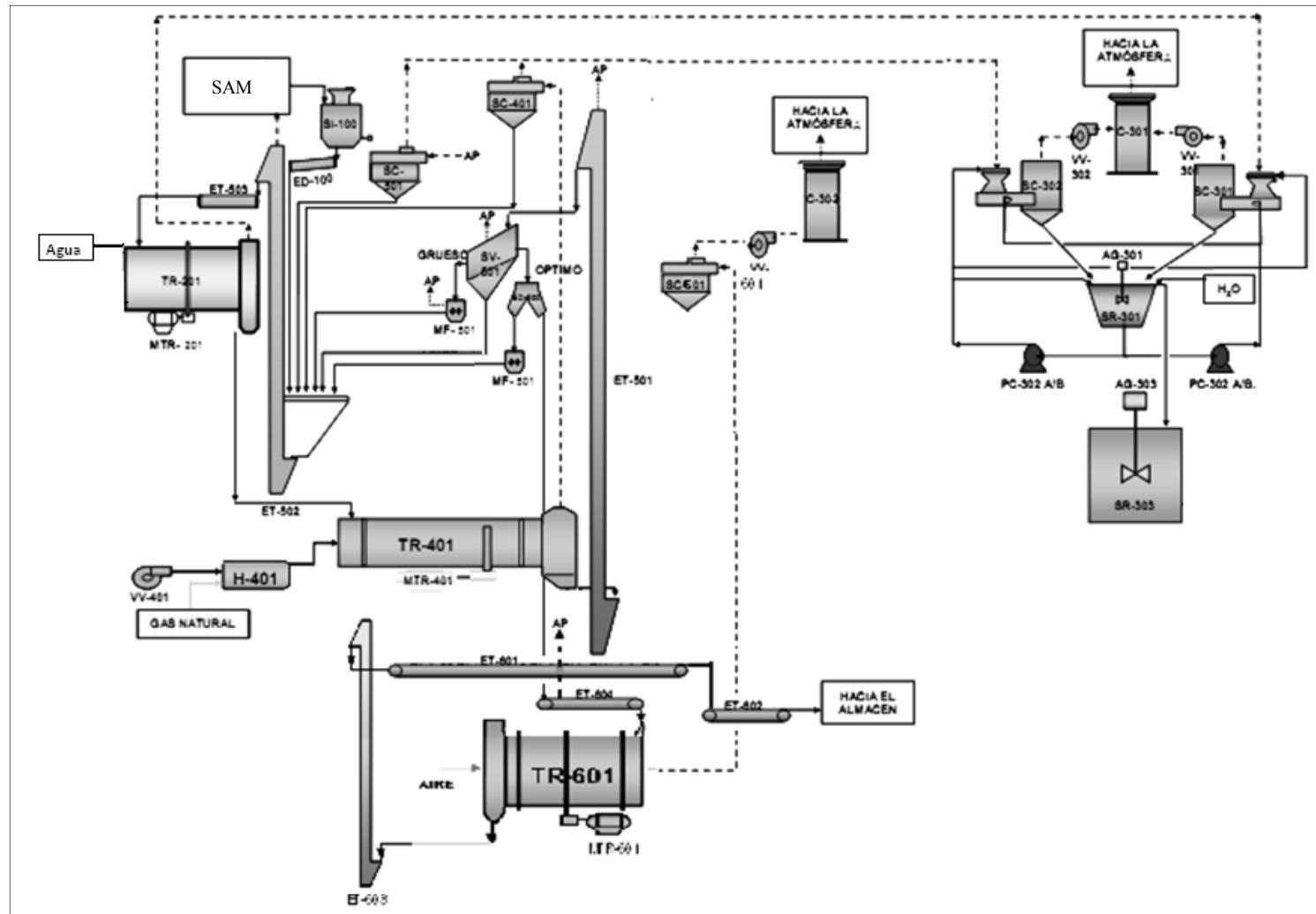


Figura N° 11 Esquema del proceso de granulación de SAM propuesto para la I-390

4.5.2. Determinación de la factibilidad económica de realizar los cambios planteados en la Instalación 390

Con la finalidad de determinar económicamente si es factible implantar la tecnología seleccionada en la instalación existente, se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- (a) Para el flujo de caja, se consideró como inversión inicial el costo de los equipos nuevos (2 molinos de martillo) y se adicionó un 20% para cubrir imprevistos.
- (b) Los costos de mantenimiento y operación de la instalación se determinaron en función de la inversión total de la planta, para ello se emplearon las relaciones aportadas por la teoría (Baasel, 1976) y añadiendo un 10% extra a los valores calculados.
- (c) La inversión total de la instalación se entiende como el desembolso de dinero necesario para construir completamente la planta, lo cual incluye los gastos de todos los equipos pertenecientes a la misma, su instalación, y construcción de la planta. Este valor se determinó por medio del factor de Lang y se añadió un 20% para cubrir posibles imprevistos. Este valor será el empleado para determinar los costos de mantenimiento y operación anuales, debido a que estos costos se ven afectados por todos los equipos pertenecientes a la Instalación 390.
- (d) Se tomó un tiempo de estudio del proyecto de 10 años.
- (e) El costo del producto se determinó añadiendo al costo de las materias primas involucradas el costo de transformación asociado a las plantas de granulación similares.

Los valores de los distintos equipos involucrados fueron extraídos de la página web Matche®. Estos precios se encuentran en dólares (\$), y están determinados para

el año 2007, por lo cual fue necesario calcular el precio de los equipos para el año 2012 empleando el índice de costo de Marshall & Swift de ambos años el cual se encuentra publicado en internet por la revista Chemical Engineering (2012). Luego, se calculó la cantidad equivalente en Bolívares (Bs). Se determinó que eran necesarios Bs 225.428 para adquirir e instalar los dos nuevos molinos de martillo requeridos para realizar el proceso seleccionado, en el Apéndice B se pueden observar el método de cálculo empleado.

Baasel (1976) menciona que los costos de mantenimiento se pueden determinar como un porcentaje del capital fijo de la instalación, encontrándose este porcentaje entre 2 y 6% del capital fijo en base anual, para este proyecto se seleccionó un porcentaje de 5%. De igual manera, mencionan que los costos de operación se pueden calcular como un 15% del costo anual de mantenimiento. A estos valores calculados se les añadió un 10% extra, con lo cual el costo anual de mantenimiento es de Bs 862.998 y el costo de operación anual es de Bs 129.450.

El precio del producto se estimó a partir de los precios de la materia prima, los cuales son de Bs 860 por tonelada de SAM, mientras que el precio del fosfoyeso es el requerido para transportarlo hasta la I-390, siendo esta cantidad de Bs 174 por cada tonelada transportada, estos precios fueron establecidos por Pequiven. Tomando en cuenta que el producto final posee 20% en peso de SAM y 80% en peso de fosfoyeso, y que el costo de transformación de las materias primas en plantas similares es de 180 Bs por tonelada de producto, se estableció su precio en Bs 492 cada tonelada métrica. Se estiman producir 126000 toneladas métricas cada año, por lo que anualmente se espera obtener Bs 61.992.000 por ventas. Adicionalmente, según lo calculado por el balance de masa y energía, son necesarias 24000 toneladas anuales de sulfato de amonio y 96000 toneladas anuales de fosfoyeso, lo cual implica un gasto anual en materias primas de Bs 37.344.000.

Finalmente, se estimó el valor residual de los equipos al finalizar el período en estudio, para ello fue necesario determinar el tiempo de vida útil de los equipos

nuevos, siendo este tiempo según Aries y Newton (1955) de 12 años para los molinos, lo cual da como resultado un valor residual de Bs 31.309.

La rentabilidad del proyecto se determinó a partir del cálculo del Valor Actual y del Equivalente Anual del mismo. Se estableció un período de estudio de 10 años, y una tasa de interés de 17,62 % la cual corresponde al promedio de las tasas de interés determinadas por el Banco Central de Venezuela para el año 2011, obteniéndose un valor actual de Bs 131.198.247, y un equivalente anual de Bs 28.800.213, lo cual significa que es rentable llevar a cabo el proyecto en estudio. En la Tabla N° 29 se observa el flujo de caja del proyecto, es importante destacar que los valores están expresados en miles de Bolívares.

El elevado valor actual y equivalente anual obtenido se debe a que gran parte de la materia prima requerida es un subproducto del complejo, por lo cual el valor comercial es cero, sin embargo se debe tomar en cuenta el costo de acarreo del fosføyoso hasta la instalación, y aunque el sulfato de amonio si posee valor comercial, se requieren pequeñas cantidades de este compuesto para elaborar el producto granular. Además de esto, el producto obtenido es atractivo para los consumidores debido a sus características físicas y a los nutrientes que proporciona, por lo cual su precio es mayor que el precio de las materias primas. Debido a la baja inversión requerida, y a la rentabilidad del proceso, la inversión se recupera en el mismo año de inicio de la operación. Por otra parte, el cálculo de la TIR es innecesario ya que debido al elevado valor actual del proyecto, esta tasa de interés sería mayor al 100%.

Tabla N° 29 Flujo de Caja del proyecto en miles de Bolívares

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Inversión	-225,428	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Materia prima	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344	-37.344
Operación	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450	-129,450
Mantenimiento	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998	-862,998
Ventas	61.992	61.992	61.992	61.992	61.992	61.992	61.992	61.992	61.992	61.992	61.992
Valor residual	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31,309
Flujo de caja	23.430	23.656	23.656	23.656	23.656	23.656	23.656	23.656	23.656	23.656	23.687

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones más relevantes obtenidas durante la realización de este Trabajo Especial de Grado.

- 1) No es factible técnica ni económicamente implementar una tecnología de producción de sulfato de amonio de alta pureza en la I-390, a menos que se emplee yeso como material de relleno que impida la corrosión de los equipos.
- 2) La Instalación 390 se encuentra en buen estado, y posee en funcionamiento los equipos principales necesarios para la granulación.
- 3) La tecnología E es la que mejor se adecúa a la I-390.
- 4) SolidSim es el simulador comercial que se ajusta mejor al proceso en estudio.
- 5) Los resultados obtenidos por medio de la simulación para el flujo de las corrientes, se ajustan al valor máximo de tolerancia exigido.
- 6) Para implementar la tecnología E es necesario reemplazar el molino de cadenas por un molino de martillo para obtener mejores resultados.
- 7) Desde el punto de vista técnico y económico, es factible aplicar los cambios necesarios en la I-390.

RECOMENDACIONES

- 1) Realizar un estudio de corrosión del acero al carbono al manejar los gránulos producidos de fosfoyeso y sulfato de amonio.
- 2) Determinar el ángulo de reposo de los gránulos producidos, con la finalidad de conocer si existirán cuellos de botella en la instalación.
- 3) Determinar empíricamente los parámetros requeridos en la simulación de la unidad granuladora con la finalidad de obtener resultados más exactos en la simulación.
- 4) Estudiar la posibilidad de reemplazar el agua empleada para la aglomeración de las partículas por alguna solución capaz de aportar diferentes nutrientes.
- 5) Corroborar los resultados obtenidos en la investigación por medio de estudios en una planta piloto antes de realizar cambios en la instalación.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Achorn, F. (1993). Latest developments in use of the TVA rotary ammoniator-granulator.
- 2) Aries, R. y Newton, R. (1955). Chemical Engineering Cost Estimation. McGraw-Hill.
- 3) Baasel, William (1976). Preliminary Chemical Engineering Plant Design. United States of America. Elsevier.
- 4) Castro, J. y Torres, C. (2002). Análisis y simulación de procesos de refinación del petróleo. Instituto Politécnico Nacional. México.
- 5) Chemical Engineering (2012). Economics Indicators. Recuperado el 12 de Enero de 2012, de http://www.che.com/business_and_economics/economic_indicators.html
- 6) FEECO International (s.f). FEECO Handbook. Recuperado el 6 de Junio de 2011, de <http://feeco.com/literature>.
- 7) Finding Better Solutions (s.f). Chemicals and their compatibility with EPDM. Recuperado el 27 de Septiembre de 2011, de <http://www.fbs-online.com/Centre/Prod/EPDM-chem-com-res.htm>
- 8) Fischbein, Milton (1988). High quality granular ammonium sulphate production. Ponencia presentada en: IFA Technical Conference. Edmonton, Canadá.
- 9) Fung, William (2008). Factibilidad técnico económica de un sistema de recuperación de amoníaco en la planta de Sulfato de Amonio del Complejo Petroquímico Morón. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
- 10) Galloway, Arthur (1965). US Patent N°3168437. U.S. Patent and Trademark Office.

- 11) Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. 3era Ed. México. Compañía Editorial Continental.
- 12) Giugni de Alvarado, Luz; Ettedgui de Betancourt, Corina; González de Salama, Inés; Guerra Torrealba, Venturina (2005). Evaluación de proyectos de inversión. 4ta Ed. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- 13) Goldin, Jorge (s.f.) Corrosión en instalaciones petroquímicas. CELADE CA.
- 14) González, Cesar (2000). Simulador de una columna de destilación binaria. Trabajo Especial de Grado. Universidad La Salle. México.
- 15) Gual Steel, S.L. (s.f). Un salto adelante en la innovación del acero inoxidable. Recuperado el 27 de Septiembre de 2011, de http://www.gualstainless.com/htm/img/imatges_cms/pdf/QuesINOX.pdf
- 16) Han, C y Wilenitz, I. (1970). Mathematical Modeling of Steady-State Behavior in Industrial Granulators. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 9 (3), 401-411.
- 17) Harrison, C. y Cullen, T. (1986). US Patent N° 4589904. U.S. Patent and Trademark Office.
- 18) Hicks, G. (1969). US Patent N° 3464809. U.S. Patent and Trademark Office.
- 19) IFDC; UNIDO (1998). Fertilizer Manual.
- 20) INTEVEP (1995). Manual Asistencia Técnica integral al Complejo Petroquímico Morón; Manual de granulación vía tambor rotatorio. Venezuela.
- 21) Jaimes, Carlos (2009). Evaluación de la factibilidad técnico-económica de la adaptación de la tecnología WSA de producción de ácido sulfúrico en la planta 215 del Complejo Petroquímico Morón, de PEQUIVEN. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Carabobo, Valencia.

- 22) Matche (2003). Equip Costs. Recuperado el 16 de Enero de 2012, de <http://matche.com/EquipCost/index.htm>
- 23) Mann, H. (1974). US Patent N° 3785796. U.S. Patent and Trademark Office.
- 24) Meléndez, G y Molina, E. (2003). Fertilizantes: Características y Manejo. Centro de Investigaciones Agronómicas. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.
- 25) NACE International (2002). Corrosion Survey Database (COR·SUR).
- 26) Pequiven S.A. (1988). Selección de material para las estructuras metálicas de la planta de sulfato de amonio (soportes, shutes y pasamanos, barandas, etc). Servicios Técnicos. Carabobo, Venezuela.
- 27) Pequiven S.A. (1991). Selección de material a utilizar en las estaciones de rodillos de carga de la planta de sulfato de amonio. Servicios Técnicos. Carabobo, Venezuela.
- 28) Perry, R.H.; Green, D.W. y Maloney, J.O. (1998) Manual del Ingeniero Químico. 6ta Ed. McGraw-Hill.
- 29) Petroquímica de Venezuela, S.A. (2007). Manual de Operación, Planta de DAP Instalación 390. Morón, Venezuela.
- 30) Sauchelli, Vicent (1966). Química y tecnología de los fertilizantes. México. Compañía Editorial Continental.
- 31) SolidSim (2011). SolidmSim, Flowsheet simulation of solid process.
- 32) Stedman Machine Company (1996). Hammer Mills. Recuperado el 26 de diciembre de 2011, de http://www.stedman-machine.com/pdfs/HammerMills_Brochure.pdf
- 33) Treybal, Robert (1988). Operaciones con transferencia de masa. 2da Ed. McGraw-Hill.

- 34) Universidad de Carabobo (2003). Notas y Datos sobre selección y aplicación de materiales para ingenieros de procesos. Carabobo, Venezuela.
- 35) Universidad de Carabobo y CEPET (s.f). Manufactura de fertilizantes fosfatados y compuestos. Valencia, Venezuela.
- 36) Wilson, J. (1970). US Patent N° 3539329. U.S. Patent and Trademark Office.
- 37) Zenith (s.f). EPDM Ruber Sheets. Recuperado el 27 de Septiembre de 2011, de <http://www.zenithrubber.com/rubber-sheets/epdm-rubber-sheets.htm>

APÉNDICE A
DIAGRAMAS DE LOS PROCESOS EN ESTUDIO

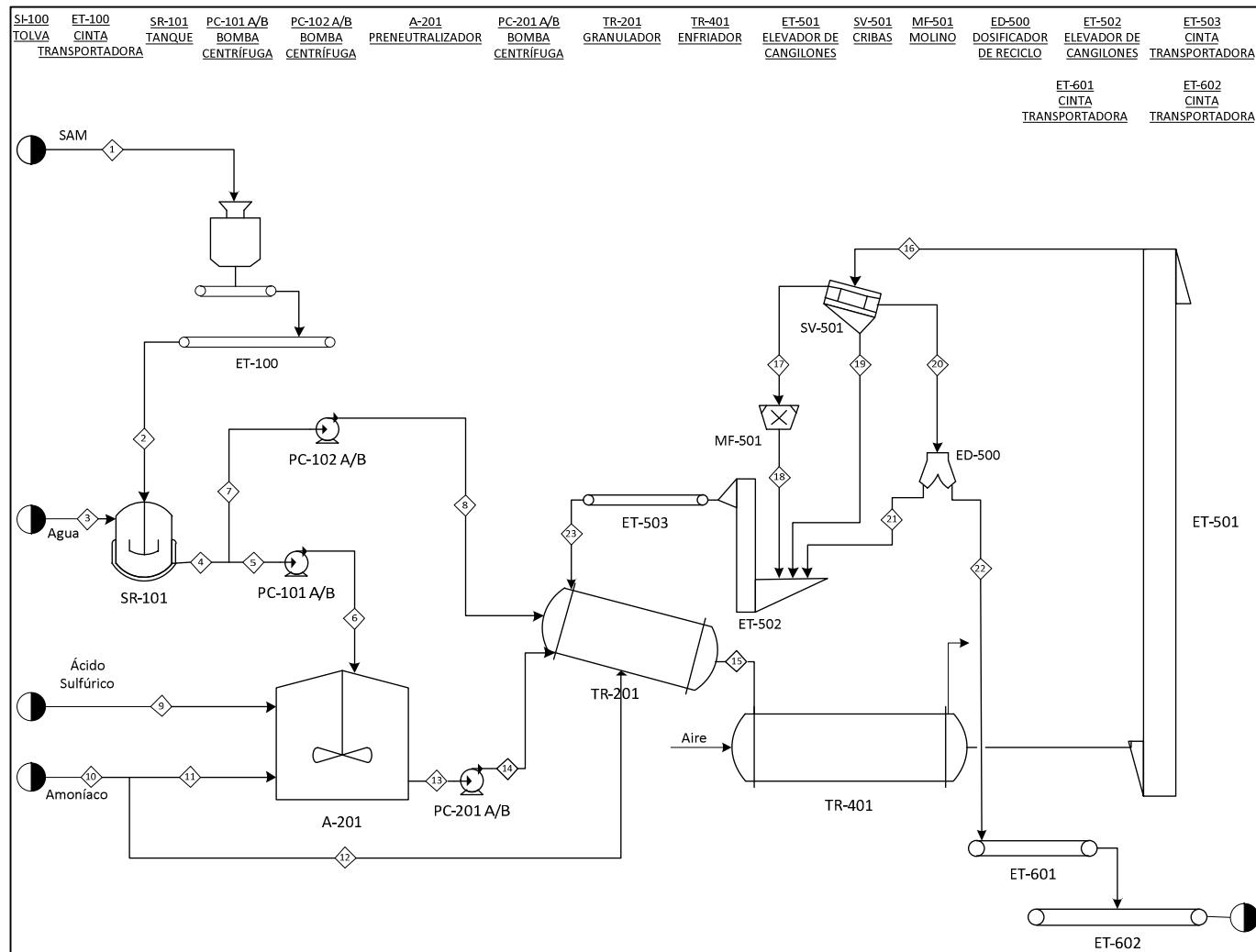


Figura N°A 1: Esquema del proceso descrito por la tecnología A

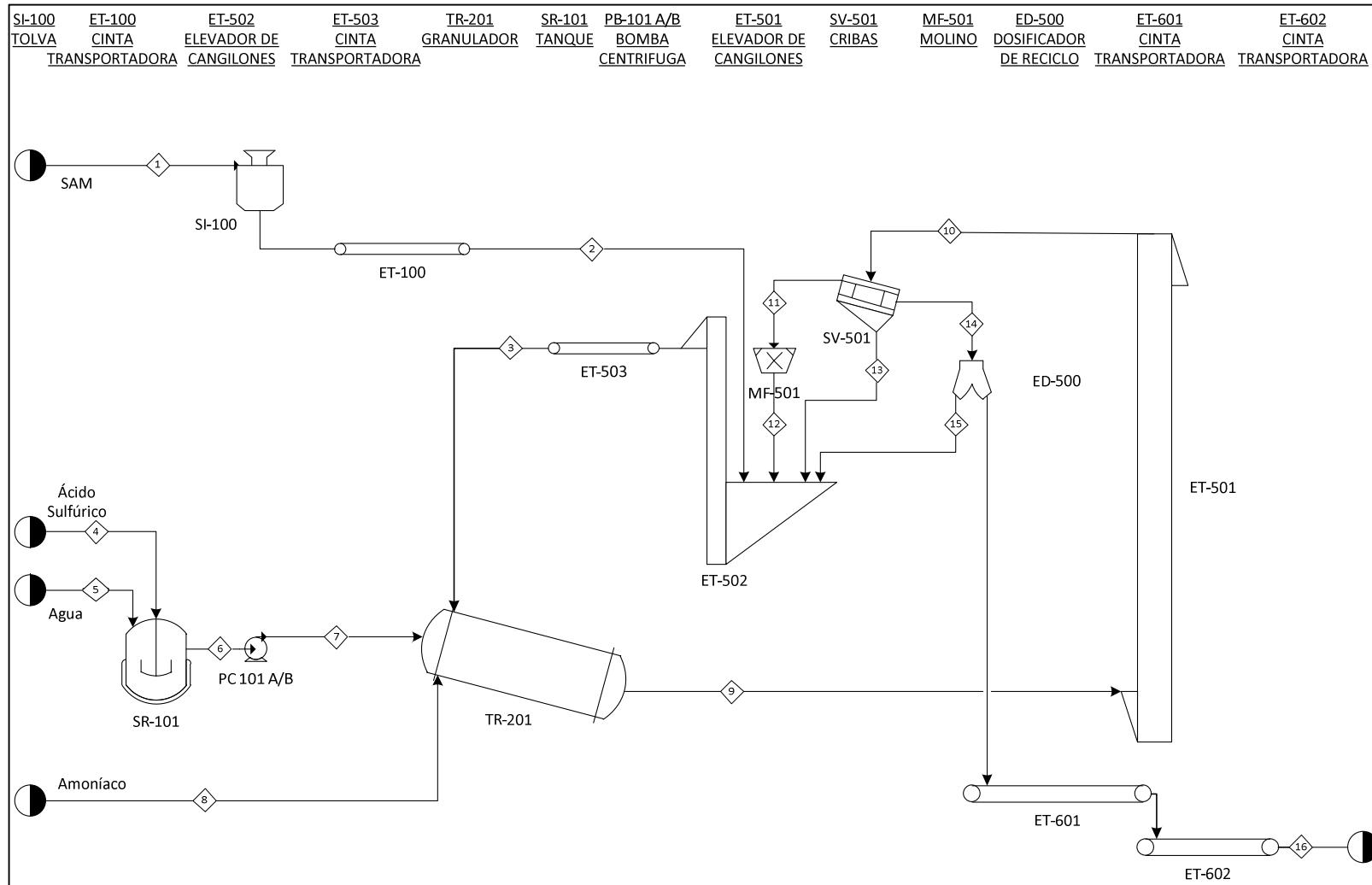


Figura N°A 2: Esquema del proceso descrito por la tecnología B

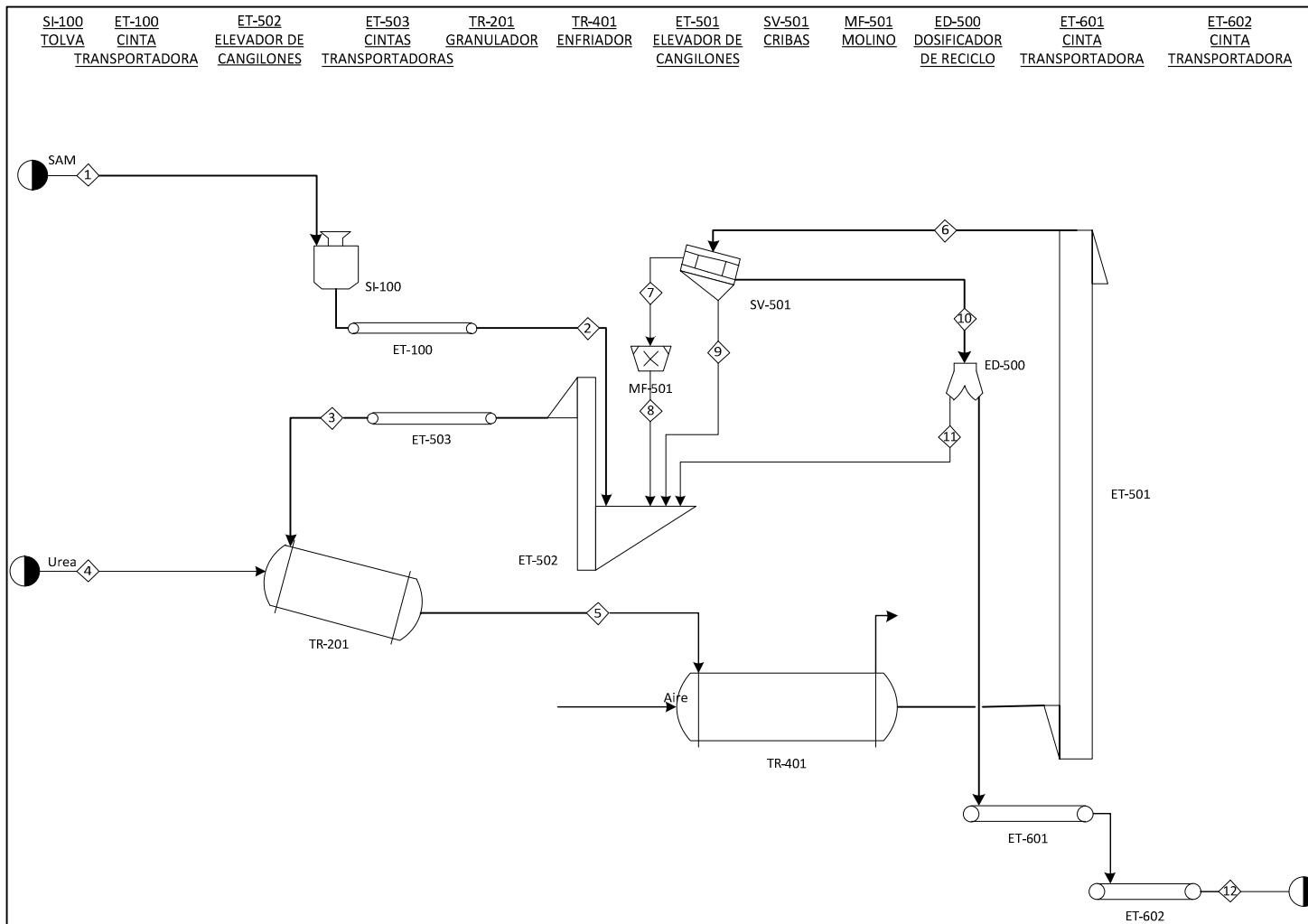


Figura N°A 3: Esquema del proceso descrito por la tecnología C

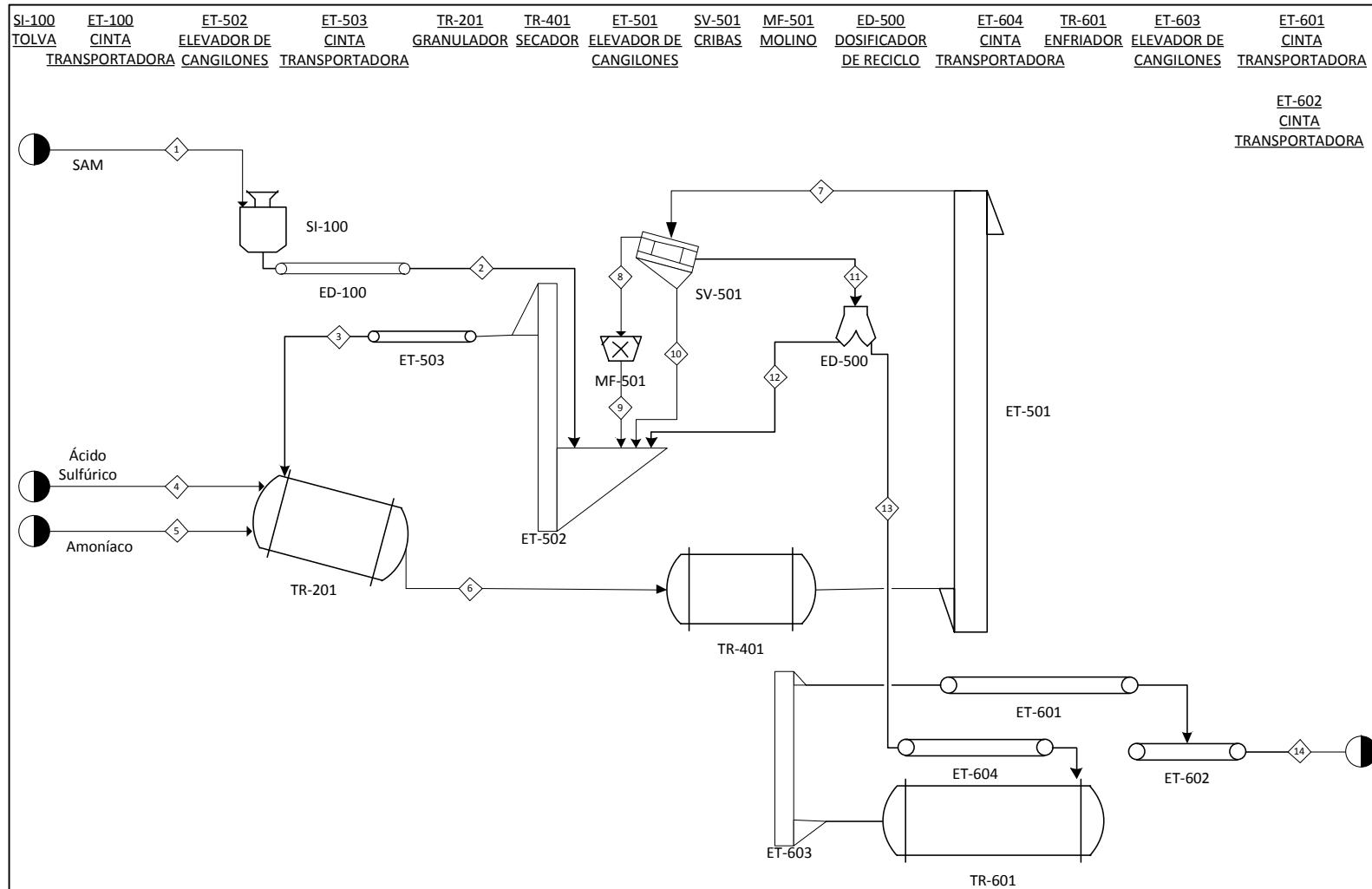


Figura N°A 4: Esquema del proceso descrito por la tecnología D

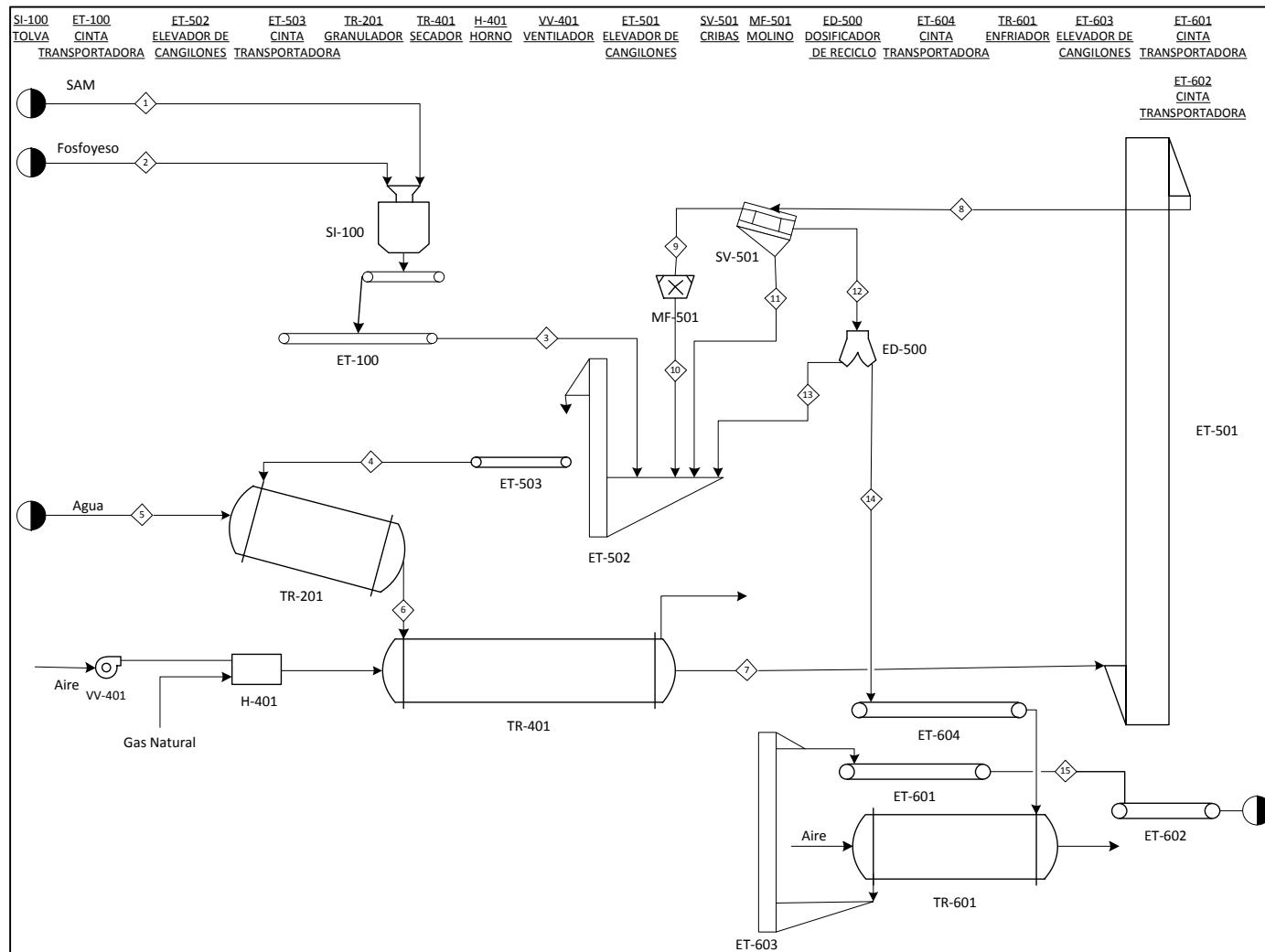


Figura N°A 5: Esquema del proceso descrito por la tecnología E, adaptado a la I-390

APÉNDICE B
CÁLCULOS TIPO

1) BALANCES DE MASA Y ENERGÍA. TECNOLOGÍA E: PATENTE N° 3168437

Los resultados obtenidos por medio de este balance son los empleados como datos de entrada en el simulador. Para calcular la cantidad de materia prima requerida para llevar a cabo el proceso de granulación, en primer lugar se debe especificar el flujo másico de producción deseado y la humedad máxima permitida en el producto. Estos datos se encuentran en la Tabla N° B 1 presentada a continuación

Tabla N° B 1 Humedad máxima permitida y flujo másico del producto final

Parámetro	Valor
Flujo másico (TMH)	15
Humedad en base seca (%)	5

Debido a que en esta tecnología sólo se da a conocer que el producto en la salida posee un tamaño promedio de 3mm, y se desconoce la distribución de los tamaños de los granos a la salida del granulador, se seleccionaron los valores presentados en la Tabla N° B 2 basados en experiencias pasadas.

Tabla N° B 2 Distribución del tamaño de las partículas a la salida del granulador

Tamaños	Porcentaje (%)
Óptimos	40
Finos	30
Gruesos	30

Además de esto se especificó que 10TMH de producto de tamaño óptimo serían recirculados al granulador con la finalidad de mantener una relación de reciclo adecuada, y por medio de la ecuación N° B1 la cual describe el balance de masa en el dosificador de reciclo, se puede calcular el flujo másico de granos de tamaño óptimo que se deben producir.

$$\dot{m}_{optimos} = \dot{m}_{producto} + \dot{m}_{opt_reciclo} \quad \text{Ecuación N° B1}$$

Donde:

$\dot{m}_{optimos}$: Flujo másico de los granos de tamaño óptimo (Kg/h).

$m_{producto}$: Flujo másico del producto granular final (Kg/h).

$m_{opt_reciclo}$: Flujo másico de los granos de tamaño óptimo que se recirculan (Kg/h).

Sustituyendo en la ecuación N° B1 con los valores especificados anteriormente, se obtiene:

$$m_{optimos} = 15000 \frac{Kg}{h} + 10000 \frac{Kg}{h}$$

$$m_{optimos} = 25000 \frac{Kg}{h}$$

Una vez determinado el flujo másico de partículas de tamaño óptimo que se deben obtener, es posible determinar el flujo másico de las corrientes de tamaño grueso y fino, empleando los datos presentados en la Tabla N° B 1 y por medio del balance de masa en las cribas, el cual se puede observar en la Figura N° B 1 presentada a continuación.

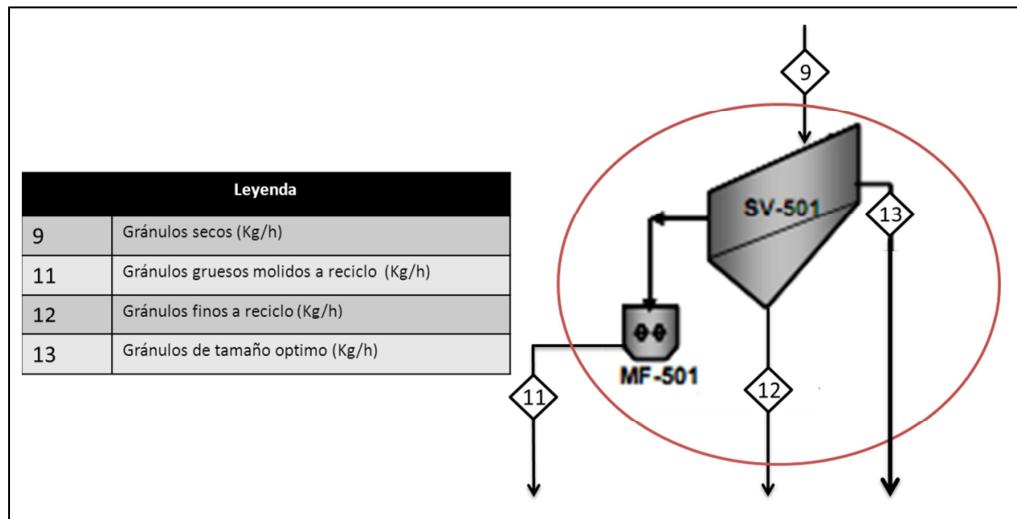


Figura N° B 1 Volumen de control en el área de cribado

El balance de masa en la unidad de cribado se describe a continuación mediante la Ecuación N° B2:

$$m_{granos_2} = m_{granos_opt} + m_{granos_gruesos} + m_{granos_finos} \quad \text{Ecuación N° B2}$$

Donde:

\dot{m}_{granos_2} : Flujo másico de los granos a la salida del secador (Kg/h).

\dot{m}_{granos_finos} : Flujo másico los granos finos (Kg/h).

$\dot{m}_{granos_gruesos}$: Flujo másico de los granos gruesos (Kg/h).

Además de esta ecuación, también se tienen las relaciones másicas especificadas en la Tabla N° B 2, a partir de las cuales se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_{granos_opt} = 0,4 \times \dot{m}_{granos_2} \quad \text{Ecuación N° B3}$$

$$\dot{m}_{granos_gruesos} = 0,3 \times \dot{m}_{granos_2} \quad \text{Ecuación N° B4}$$

Se reordena la Ecuación N° B3 para calcular el flujo másico de granos secos de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{granos_2} = \dot{m}_{granos_opt} / 0,4$$

$$\dot{m}_{granos_2} = \frac{25000 \text{ Kg/h}}{0,4}$$

$$\dot{m}_{granos_2} = 62500 \text{ Kg/h}$$

Y luego, sustituyendo en la Ecuación N° B4 se obtiene el flujo másico de granos gruesos:

$$\dot{m}_{granos_gruesos} = 0,3 \times 62500 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{granos_gruesos} = 18800 \text{ Kg/h}$$

Una vez calculado el flujo másico de granos secos y de granos gruesos, se puede reordenar la Ecuación N°B2 para determinar el flujo másico de granos finos sustituyendo los valores antes calculados.

$$\dot{m}_{granos_finos} = \dot{m}_{granos_secos} - (\dot{m}_{granos_opt} + \dot{m}_{granos_gruesos})$$

$$\dot{m}_{granos_finos} = 62500 \text{ Kg/h} - \left(25000 \text{ Kg/h} + 18800 \text{ Kg/h} \right)$$

$$\dot{m}_{granos_finos} = 18800 \text{ Kg/h}$$

Los granos a la salida del secador, presentan una humedad en base seca del 5%, la cual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\%Humedad2_{BS} = \frac{\dot{m}_{Aguaz}}{\dot{m}_{granos_secos}} \times 100\% = 5\% \quad \text{Ecuación N° B5}$$

Donde:

$\%Humedad2_{BS}$: Porcentaje de humedad en base seca de los granos a la salida del secador.

\dot{m}_{Aguaz} : Flujo másico del agua contenida en los granos a la salida del secador (Kg/h).

\dot{m}_{granos_secos} : Flujo másico de los granos secos (Kg/h).

El porcentaje de humedad en base húmeda de la misma corriente se define por medio de la siguiente ecuación:

$$\%Humedad2_{BH} = \frac{\dot{m}_{Aguaz}}{\dot{m}_{granos2}} \times 100\% = 4,76\% \quad \text{Ecuación N° B6}$$

Donde:

$\%Humedad2_{BS}$: Porcentaje de humedad en base seca de los granos a la salida del secador.

A partir de la Ecuación N° B6 se puede determinar la cantidad de agua contenida en los granos a la salida del secador, al reordenar dicha ecuación y sustituir los valores antes calculados, se obtiene:

$$\dot{m}_{Aguaz} = \frac{4,76\% \times \dot{m}_{granos2}}{100\%}$$

$$\dot{m}_{Aguaz} = \frac{4,76\% \times 62500 \text{ Kg/h}}{100\%}$$

$$\dot{m}_{Aguaz} = 2975 \text{ Kg/h}$$

Una vez determinada la cantidad de agua contenida en los granos, es posible determinar el flujo másico de los granos secos reordenando la Ecuación N° B5

$$\dot{m}_{granos_secos} = \frac{\dot{m}_{Aguaz}}{5\%} \times 100\%$$

$$\dot{m}_{granos_secos} = 59500 \text{ Kg/h}$$

El flujo másico de granos secos dentro del secador se mantienen iguales, por lo que para calcular el flujo másico de los granos a la entrada del secador, se debe conocer la humedad en base seca de la corriente y calcular el flujo de agua contenido en los granos empleando la siguiente ecuación:

$$\%Humedad1_{BS} = \frac{\dot{m}_{Aguaz}}{\dot{m}_{granos_secos}} \times 100\% = 10\% \quad \text{Ecuación N° B7}$$

Donde:

$\%Humedad1_{BS}$: Porcentaje de humedad en base seca de los granos a la entrada del secador.

\dot{m}_{Aguaz} : Flujo másico del agua contenida en los granos a la entrada del secador (Kg/h).

Al reordenar la Ecuación N° B7 y sustituir los valores conocidos, se obtiene:

$$\dot{m}_{Aguaz} = \frac{10\% \times \dot{m}_{granos_secos}}{100\%}$$

$$\dot{m}_{Aguaz} = \frac{10\% \times 59500 \text{ Kg/h}}{100\%}$$

$$\dot{m}_{Aguaz} = 5950 \text{ Kg/h}$$

Finalmente, para calcular el flujo de granos a la entrada del secador, se emplea la Ecuación N° B8 presentada a continuación:

$$\dot{m}_{granos_1} = \dot{m}_{granos_secos} + \dot{m}_{Aguas_1} \quad \text{Ecuación N° B8}$$

Donde:

\dot{m}_{granos_1} : Flujo másico de las partículas granulares a la entrada del secador.

Al sustituir los valores conocidos, se obtiene:

$$\dot{m}_{granos_1} = 59500 \text{ Kg/h} \quad 5950 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{granos_1} = 65450 \text{ Kg/h}$$

Una vez completado el balance de masa alrededor del secador, es posible determinar los flujos másicos de materia prima mediante las ecuaciones de balance de masa en el secador y conociendo la composición másica de la alimentación al granulador, tomando como base lo especificado por la tecnología. La composición seleccionada con una humedad en base seca de la mezcla de 10%, se encuentra en la Tabla N° B 3 presentada a continuación.

Tabla N° B 3 Composición másica de la alimentación de materia prima en base seca

Materia prima	Composición (%)
Sulfato de amonio (cristales)	20,00
Fosfóyoso	80,00

El balance de masa en el granulador se puede observar en la Figura N° B 2 presentada a continuación.

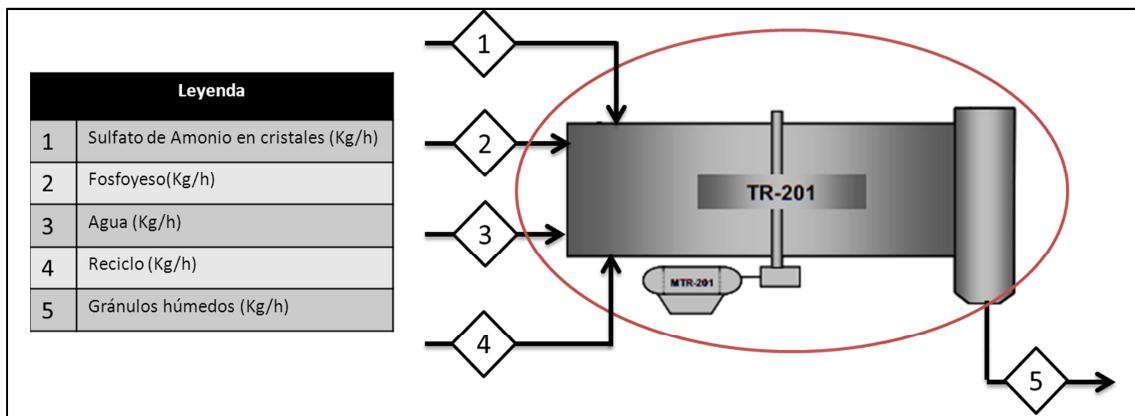


Figura N° B 2 Volumen de control en el granulador.

El balance de masa en el granulador se describe mediante la Ecuación N° B9

$$m_{granos1} = m_{materia_prima} + m_{Reciclo} + m_{Agua} \quad \text{Ecuación N° B9}$$

Dónde:

$m_{granos1}$: Flujo másico de los granos húmedos producidos (Kg/h).

$m_{materia_prima}$: Flujo másico de la materia prima seca añadida (Kg/h).

m_{Agua} : Cantidad de agua añadida al granulador (Kg/h).

$m_{Reciclo}$: Flujo másico del reciclo (Kg/h).

Sin embargo, antes de poder calcular los flujos de materia prima seca requeridos, primero es necesario determinar el flujo másico de reciclo que se reincorpora al sistema. El reciclo está conformado por los granos gruesos molidos, por los granos finos y por los granos de tamaño óptimo recirculados al proceso.

$$m_{Reciclo} = m_{granos_gruesos} + m_{granos_finos} + m_{opt_reciclo} \quad \text{Ecuación N° B10}$$

Donde:

$m_{granos_gruesos}$: Flujo másico de las partículas gruesas (Kg/h).

m_{granos_finos} : Flujo másico de las partículas finas (Kg/h).

$\dot{m}_{opt_reciclo}$: Flujo másico de las partículas de tamaño óptimo que se recirculan al proceso (Kg/h).

Al sustituir los valores conocidos en la Ecuación N° B10 se obtiene lo siguiente:

$$\dot{m}_{Reciclo} = 18800 \text{ Kg/h} + 18800 \text{ Kg/h} + 10000 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{Reciclo} = 47600 \text{ Kg/h}$$

Por otra parte, para que la granulación ocurra, se debe asegurar una humedad en base seca dentro del granulador igual a 10%. Se determina la cantidad de agua que se debe añadir considerando la humedad aportada por el reciclo. El reciclo posee un porcentaje de humedad en base seca del 5%, lo cual equivale a un porcentaje de humedad en base húmeda igual a 4,76%, se debe averiguar la cantidad de agua aportada por el reciclo.

$$\%Humedad_r = \frac{\dot{m}_{Agua_r}}{\dot{m}_{reciclo}} \times 100\% = 4,76\% \quad \text{Ecuación N° B11}$$

Dónde:

$\%Humedad_r$: Porcentaje de humedad en base húmeda del material de reciclo.

\dot{m}_{Agua_r} : Cantidad de agua contenida en el reciclo (Kg/h).

Al reordenar la Ecuación N° B11 y sustituir los valores conocidos, se obtiene:

$$\dot{m}_{Agua_r} = \frac{4,76\% \times 47600 \text{ Kg/h}}{100\%}$$

$$\dot{m}_{Agua_r} = 2266 \text{ Kg/h}$$

Luego de determinar la cantidad de agua que aporta el reciclo, y conociendo la cantidad de agua que debe estar presente en los granos a la salida del granulador, se puede determinar el flujo de agua que se debe añadir al granulador para mantener el contenido de humedad deseado, empleando la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_{Agua1} = \dot{m}_{Agua_r} + \dot{m}_{Agua} \quad \text{Ecuación N° B12}$$

Al reordenar dicha ecuación y sustituir los valores conocidos, se obtiene:

$$\dot{m}_{Aguia} = \dot{m}_{Aguia1} - \dot{m}_{Aguia_r}$$

$$\dot{m}_{Aguia} = 5950 \text{ Kg/h} - 2266 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{Aguia} = 3684 \text{ Kg/h}$$

Finalmente, al reordenar la Ecuación N° B9 y sustituir los valores conocidos, se obtiene el flujo másico requerido de materias primas:

$$\dot{m}_{materia_prima} = \dot{m}_{granos_1} - \dot{m}_{Reciclo} - \dot{m}_{Aguia}$$

$$\dot{m}_{materia_prima} = 65450 \text{ Kg/h} - 47600 \text{ Kg/h} - 3684 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{materia_prima} = 14166 \text{ Kg/h}$$

Una vez conocido el flujo másico de materia prima seca que debe alimentarse al granulador, es posible calcular los flujos de fosfoyeso y SAM por medio de las relaciones establecidas en la Tabla N° B 3, y relacionando la materia prima mediante las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_{Fosfoyeso} = 0,8 \times \dot{m}_{materia_prima} \quad \text{Ecuación N° B13}$$

Donde:

$\dot{m}_{Fosfoyeso}$: Flujo másico de fosfoyeso en la alimentación (Kg/h).

$$\dot{m}_{Fosfoyeso} = 0,8 \times 14166 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{Fosfoyeso} = 11333 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{SAM} = 0,2 \times \dot{m}_{materia_prima} \quad \text{Ecuación N° B14}$$

Donde:

\dot{m}_{SAM} : Flujo másico de SAM en la alimentación (Kg/h).

$$\dot{m}_{SAM} = 0,2 \times 14166 \text{ } ^Kg/h$$

$$\dot{m}_{SAM} = 2833 \text{ } ^Kg/h$$

2) SECADOR CO-CORRIENTE Y ENFRIADOR CONTRACORRIENTE

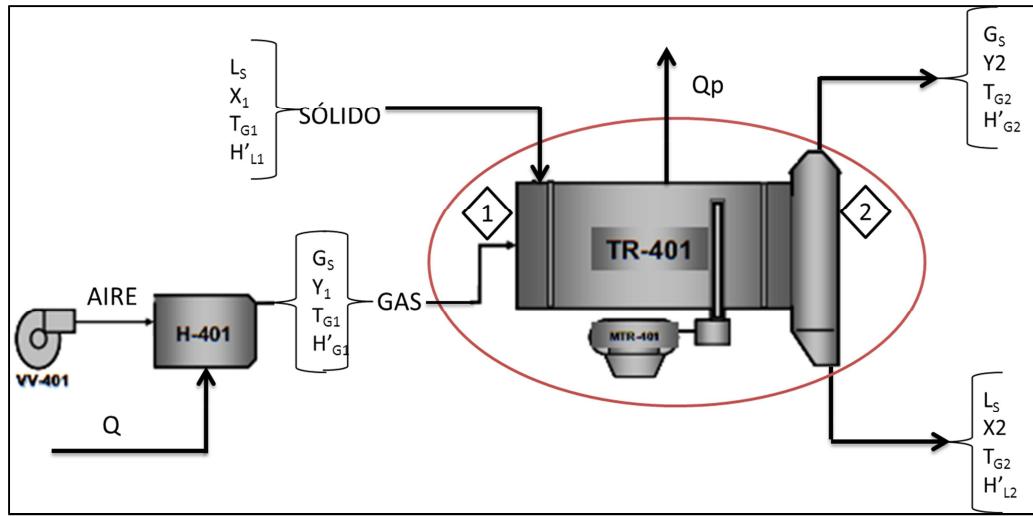


Figura N° B 3 Balance de masa y energía en el secador.

Con la finalidad de conocer la cantidad de aire caliente que debe ingresar al secador y la humedad de salida del aire de calentamiento, se emplean los balances de materia y de entalpía descritos por Treybal (1988). Los mismos balances son necesarios para determinar el flujo másico de aire requerido para enfriar el producto, y la humedad de salida del aire de enfriamiento.

En primer lugar, se presentarán las ecuaciones y el modelo de cálculo empleado para determinar los balances en el secador. Para poder llevar a cabo estos cálculos, fue necesario establecer las condiciones humedad y temperatura del sólido a la entrada y salida del equipo, estas condiciones se pueden observar en la Tabla N° B 4 presentada a continuación.

Tabla N° B 4 Condiciones del sólido a la entrada del secador

Variable	Valor
L_s (Kg _{sol seco} /h)	50.525
X_{entrada} (Kg _{hum} /Kg _{sol seco})	0,10
X_{salida} (Kg _{hum} /Kg _{sol seco})	0,05
TL _{entrada} (°C)	65
TL _{salida} (°C)	85

Las condiciones del aire empleado para llevar a cabo el proceso de secado se pueden observar en la Tabla N° B 5 presentada a continuación.

Tabla N° B 5 Condiciones ambientales del aire

Condición	Valor
Hum relativa %	100
Temp ambiente (°C)	30

De igual manera fue necesario establecer la temperatura del aire de calentamiento a la entrada y salida del equipo, las cuales se observan a continuación en la Tabla N° B 6.

Tabla N° B 6 Temperatura de entrada y salida del gas de calentamiento

TG _{entrada} (°C)	250
TG _{salida} (°C)	80

Una vez establecidas las condiciones de los flujos de sólido y aire a la entrada y salida al secador, se debe calcular el flujo mísico de aire caliente seco necesario para realizar la operación, para lo cual se realiza un proceso iterativo suponiendo la humedad de salida del aire de calentamiento y verificando el flujo mísico de aire caliente calculado por medio de ambos balances sean iguales. Para realizar este cálculo, supondremos inicialmente una humedad en base seca del aire a la salida del secador igual a 0,0770.

El balance de materia en la unidad de secado se describe mediante la siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{L_s \cdot (X_1 - X_2)}{(Y_2 - Y_1)}$$

Ecuación N° B15

Donde:

Gs: Flujo de gas seco (Kg/h)

Ls: Flujo de sólido seco (Kg/h)

X1: Contenido de humedad en base seca del sólido a la entrada del equipo
(Kg_{hum}/Kg_{sólido seco})

X2: Contenido de humedad en base seca del sólido a la salida del equipo
(Kg_{hum}/Kg_{sólido seco})

Y1: Contenido de humedad en base seca del gas a la entrada del equipo
(Kg_{hum}/Kg_{gas seco})

Y2: Contenido de humedad en base seca del gas a la salida del equipo
(Kg_{hum}/Kg_{gas seco})

El contenido de humedad se determinó empleando las relaciones psicrométricas para el sistema aire-agua a 1 atm de presión, mediante la siguiente ecuación:

$$Y_1 = \frac{0,622 \bar{p}_{H_2O}}{1,0133 \times 10^5 - \bar{p}_{H_2O}}$$

Ecuación N° B16

Donde:

\bar{p}_{H_2O} : Presión parcial del agua a la temperatura del ambiente (Pa)

La presión parcial del agua contenida en el aire se determina empleando la siguiente ecuación:

$$\bar{p}_{H_2O} = \frac{\%hum_relativa \times P_{H_2O}^{vap}}{100\%}$$

Ecuación N° B17

Donde:

$\%hum_relativa$: Porcentaje de humedad relativa contenida en el aire

$P_{H_2O}^{vap}$: Presión de vapor del agua a la temperatura del aire (Pa).

Siendo la humedad relativa del aire 100%, la presión parcial contenida en el aire a la entrada del secador, se calcula empleando la Ecuación N° B17, sin embargo, también es necesario conocer la presión de vapor del agua a la temperatura de entrada del aire, dicha presión se determina haciendo uso de las tablas de vapor de agua.

$$\bar{p}_{H_2O} = \frac{100\% \times 4246 \text{ Pa}}{100\%}$$

$$\bar{p}_{H_2O} = 4246 \text{ Pa}$$

Una vez determinada la presión parcial del agua a las condiciones de entrada del aire, se determina la humedad relativa del aire de calentamiento haciendo uso de la Ecuación N° B16.

$$Y_1 = \frac{0,622 \times 4246}{1,0133 \times 10^5 - 4246} = 0,0272$$

Finalmente, empleamos la ecuación del balance de materia mediante la Ecuación N° B15.

$$G_S = \frac{59525 \text{ Kg/h} \times (0,10 - 0,05)}{(0,0770 - 0,0272)}$$

$$G_S = 59764 \text{ Kg/h}$$

Y para comparar que la suposición de la humedad relativa en el aire de calentamiento a la salida del secador es correcta, se determina el flujo másico del aire seco mediante la Ecuación N° B18 la cual describe el balance de entalpía.

$$G_S = \frac{L_S \cdot (H_{L1} - H_{L2}) - Q_{perd}}{(H_{G2} - H_{G1})} \quad \text{Ecuación N° B18}$$

Donde:

H_{L1} : Entalpía del sólido a la entrada del secador (KJ/Kg)

H_{L2} : Entalpía del sólido a la salida del secador (KJ/Kg)

H_{G1} : Entalpía del gas a la entrada del secador (KJ/Kg)

H_{G2} : Entalpía del gas a la salida del secador (KJ/Kg)

Q_{perd} : Pérdidas de calor al ambiente (KJ/h)

La entalpía del sólido húmedo está dada por:

$$H_L = C_L \cdot (t_L - t_0) + X \cdot C_A \cdot (t_L - t_0) \quad \text{Ecuación N}^{\circ} \text{ B19}$$

Donde:

H_L : Entalpía del sólido húmedo (J/Kg)

C_L : capacidad calorífica del sólido seco (KJ/Kg*°C)

t_L : Temperatura del sólido húmedo (°C)

t_0 : Temperatura de referencia (°C)

C_A : capacidad calorífica de la humedad como líquido (KJ/Kg*°C)

Entalpía del sólido a la entrada del secador

$$H_{L1} = C_L \cdot (t_{L1} - t_0) + X_1 \cdot C_A \cdot (t_{L1} - t_0)$$

$$H_{L1} = 1,084 \left(\frac{kJ}{Kg \cdot ^\circ C} \right) x (65^\circ C) + 0,10 \times 4,184 \left(\frac{kJ}{Kg \cdot ^\circ C} \right) \cdot (65^\circ C)$$

$$H_{L1} = 97,66 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

Entalpía del sólido a la salida del secador

$$H_{L2} = C_L \cdot (t_{L2} - t_0) + X_2 \cdot C_A \cdot (t_{L2} - t_0)$$

$$H_{L2} = 1,084 \left(\frac{kJ}{Kg \cdot ^\circ C} \right) x (85^\circ C) + 0,05 \times 4,184 \left(\frac{kJ}{Kg \cdot ^\circ C} \right) \cdot (85^\circ C)$$

$$H_{L2} = 109,7 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

Por otra parte, la entalpía del aire caliente puede determinarse por medio de relaciones psicrométricas a 1 atm y 0 °C, empleando la siguiente relación:

$$H_G = (1005 + 1884 \cdot Y) \cdot (t_G - 0) + 2502300 \cdot Y \quad \text{Ecuación N° B20}$$

Donde:

H_G : Entalpía del aire de calentamiento (J/Kg)

t_G : Temperatura del sólido húmedo (°C)

Entalpía del aire de calentamiento a la entrada del secador

$$H_{G1} = \frac{(1005 + 1884 \cdot Y_1) \cdot (t_{G1} - 0) + 2502300 \cdot Y_1}{1000}$$

$$H_{G1} = \frac{(1005 + 1884 \cdot 0,0272) \cdot (250 - 0) + 2502300 \cdot 0,0272}{1000}$$

$$H_{G1} = 332,13 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

Entalpía del aire de calentamiento a la salida del secador

$$H_{G2} = \frac{(1005 + 1884 \cdot Y_2) \cdot (t_{G2} - 0) + 2502300 \cdot Y_2}{1000}$$

$$H_{G2} = \frac{(1005 + 1884 \cdot 0,077) \cdot (80 - 0) + 2502300 \cdot 0,077}{1000}$$

$$H_{G2} = 284,68 \left(\frac{kJ}{Kg} \right)$$

También es necesario determinar las pérdidas de calor al ambiente, mediante la siguiente ecuación. El coeficiente estimado de transferencia de calor para la convección natural y la radiación combinadas, desde el secador a los alrededores es 12W/m² (Treybal, 1988).

$$Q_{perd} = h \times A_T \times \Delta Tm \quad \text{Ecuación N° B21}$$

h: Coeficiente de transferencia de calor W/m^2

A_T : Área de transferencia de calor (m^2).

ΔT_m : Temperatura media entre el secador y los alrededores.

El área de transferencia de calor (m^2) es el área superficial del secador, la cual se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$A_T = \pi \times D \times L$$

Ecuación N° B22

Al sustituir los valores conocidos, se obtiene:

$$A_T = \pi \times 1,22m \times 6,71m$$

$$A_T = 25,72\text{m}^2$$

La temperatura media entre el secador y los alrededores se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - T_{amb}) + (T_2 - T_{amb})}{2}$$

Ecuación N° B23

Dónde:

T_1 : Temperatura de entrada del aire de calentamiento ($^{\circ}\text{C}$).

T_2 : Temperatura de salida del aire de calentamiento ($^{\circ}\text{C}$).

T_{amb} : Temperatura ambiente del aire ($^{\circ}\text{C}$).

$$\Delta T_m = \frac{(250^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}) + (80^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C})}{2}$$

$$\Delta T_m = 135^{\circ}\text{C}$$

Al sustituir estos valores en la ecuación N° B20 se obtiene:

$$Q_{perd} = 12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times ^{\circ}\text{C}} \times 25,72\text{m}^2 \times 135^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{perd} = 41666\text{W} = 41,666 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 999993,6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Por último, se sustituyen los valores conocidos en el balance de entalpía:

$$G_s = \frac{50525 \frac{Kg}{h} \times (97,66 - 109,7) \frac{kJ}{Kg} - 999993,6 \frac{kJ}{h}}{(284,68 - 332,13) \frac{kJ}{Kg}}$$

$$G_s = 33895 \frac{Kg}{h}$$

Al comparar el flujo de gas caliente obtenido por ambos balances, se puede observar que la diferencia es superior al 5%. Por lo que es necesario suponer un valor ligeramente superior de la humedad del aire caliente en base seca a la salida del secador, y resolver el sistema nuevamente, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla N° B 7 Resultados obtenidos en el secador

Variables	Valor
G_s (Kg _{sol seco} /h)	48.828
Y_{entrada} (Kg _{hum} /Kg _{sol seco})	0,0272
Y_{salida} (Kg _{hum} /Kg _{sol seco})	0,0882
TG _{entrada} (°C)	250
TG _{salida} (°C)	80

Para calcular el flujo máscico de aire de enfriamiento requerido en el proceso de enfriado del producto, se emplea la misma metodología de cálculo descrita para el secador, sin embargo, al ser este proceso en contracorriente, los balances de materia y entalpía sufren algunas modificaciones.

El balance de materia en la unidad de enfriado se describe mediante la siguiente ecuación:

$$G_s = \frac{L_s \cdot (X_2 - X_1)}{(Y_2 - Y_1)}$$

Ecuación N° B24

Finalmente, el balance de entalpía en la unidad de enfriado se describe mediante la siguiente ecuación

$$G_s = \frac{L_s \cdot (H_{L2} - H_{L1}) + Q_{perd}}{(H_{G2} - H_{G1})} \quad \text{Ecuación N° B25}$$

Los resultados obtenidos en el enfriador se pueden observar en la Tabla N° B 8.

Tabla N° B 8 Resultados obtenidos en el enfriador

Variables	Valor
G_s ($\text{Kg}_{\text{sol seco}}/\text{h}$)	32.776
Y_{entrada} ($\text{Kg}_{\text{hum}}/\text{Kg}_{\text{sol seco}}$)	0,0272
Y_{salida} ($\text{Kg}_{\text{hum}}/\text{Kg}_{\text{sol seco}}$)	0,0316
TG_{entrada} ($^{\circ}\text{C}$)	30
TG_{salida} ($^{\circ}\text{C}$)	50

3) FACTIBILIDAD ECONÓMICA

El precio de los equipos se encuentran tabulados en la página web Matche® en dólares (\$) para el año 2007, sin embargo, es necesario determinar el precio de los equipos para el año 2012, para ello se empleó el índice de costos de equipos de Marshall & Swift publicado en la revista Chemical Engineering. Se tomó el índice de costos del 3er trimestre del 2007 y el del 3er trimestre de 2011, debido a que aún no se han publicado índices más recientes para el año 2011.

Para calcular el valor actual de los equipos se empleó la siguiente ecuación:

$$Precio_{2012} = \frac{iCosto_{2011}}{iCosto_{2007}} \times Precio_{2007} \quad \text{Ecuación N° B26}$$

Donde:

$Precio_{2012}$: Precio de los equipos para el año 2012 (\$).

$iCosto_{2011}$: Índice de costo de los equipos en el 3er trimestre del 2011 (adimensional).

$iCosto_{2007}$: Índice de costo de los equipos en el 3er trimestre del 2007 (adimensional).

$Precio_{2012}$: Precio de los equipos para el año 2012 (\$).

Sabiendo que el precio del molino de martillo es de 19.900\$ en el 2007, al sustituir los valores conocidos en la Ecuación N° B26 es posible determinar el precio del molino para el año 2012, tal como se muestra a continuación:

$$Precio_{2012} = \frac{1559,8}{1421} \times 19.900\$$$

$$Precio_{2012} = 21.844\$$$

Luego, se calculó el equivalente en Bs del precio de los equipos, sabiendo que 1 (un) dólar equivale a Bs 4,30, se necesitan Bs 93.928 para adquirir un molino de martillo para el año 2012.

Para realizar el flujo de caja, se estimó el costo de mantenimiento como un porcentaje de la inversión total requerida si la planta se fuese a construir completamente ya que el mantenimiento debe realizarse a todos los equipos presentes en la instalación, en la Tabla N° B 9 se puede apreciar el precio de los equipos presentes en la I-390. Para estimar el costo de la inversión requerida en primer lugar se actualizaron los precios de todos los equipos empleando la Ecuación N° B26, luego, la inversión total de la planta se estimó empleando el factor de Lang, tal como se muestra a continuación:

$$Inversión_{Total} = valor_{equipos} \times Factor_{Lang} \times Factor_{extra} \quad \text{Ecuación N° B27}$$

Donde:

Inversión_{Total}: Cantidad total necesaria en el 2012 para instalar la planta (Bs).

Valor_{equipos}: Costo en el 2012 de todos los equipos requeridos para llevar a cabo el proceso (Bs).

Factor_{Lang}: Factor de Lang para procesos que involucran sólidos (adimensional).

Factor_{extra}: Factor extra añadido para cubrir imprevistos.

Tabla N° B 9 Precio de los equipos presentes en la I-390.

Equipo	TAG	Precio Bs (2012)
Granulador	TR-201	1.206.908
Secador rotatorio	TR-401	169.449
Enfriador rotatorio	TR-601	169.449
Criba	SV-501	87.320
Molino	MF-501	93.928
Molino	MF-501	93.928
Cinta Transportadora	ET-101	56.168
Lavador de gases	SC-301	261.961

(Continuación) Tabla N° B 9 Precio de los equipos presentes en la I-390

Equipo	TAG	Precio Bs (2012)
Lavador de gases	SC-302	386.569
Ventilador	VV-301	155.288
Ventilador	VV-302	271.873
Ventilador de combustión	VV-400	43.424
Ciclón del secador	SC-401	198.713
Elevador de cangilones	ET-501	116.584
Elevador de cangilones	ET-502	116.584
Ciclón de despolvamiento	SC-501	64.664
Cinta Transportadora	ET-503	62.304
Ventilador del enfriador	VV-601	30.400
Ciclón enfriador	SC-601	29.400
Elevador de cangilones	ET-603	21.500
Cinta Transportadora	ET-601	103.300
Cinta Transportadora móvil	ET-602	30.800
Cinta Transportadora	ET-604	14.400
TOTAL		4.639.774

Al sustituir los valores conocidos en la Ecuación N° B27, se obtiene:

$$Inversión_{Total} = 4.639.774Bs \times 3,1 \times 1,2$$

$$Inversión_{Total} = 17.259.959Bs$$

Una vez estimada la inversión inicial, se calculan los costos asociados al flujo de caja, tomando en cuenta los estimados reportados por Bassel, siendo los costos anuales de mantenimiento de 5% de la inversión inicial, mientras que los costos de operación se estiman con un 15% de los costos de mantenimientos anuales.

En la Ecuación N° B28 presentada a continuación, se puede observar el cálculo realizado para estimar los costos de mantenimiento:

$$Costo_mantenimiento = \frac{5\%}{100\%} \times Inversión_{Total} \quad \text{Ecuación N° B28}$$

Donde:

Costo_mantenimiento: Costo anual destinado al mantenimiento general de la instalación (Bs).

Al sustituir los valores conocidos, se obtiene:

$$Costo_mantenimiento = \frac{5\%}{100\%} \times 17.259.959Bs$$

$$Costo_mantenimiento = 862.998Bs$$

Luego, se estiman los costos anuales de operación, mediante la siguiente ecuación:

$$Costo_operación = \frac{15\%}{100\%} \times Costo_mantenimiento$$

Ecuación N° B29

Costo_operación: Costo de operación anual de la instalación (Bs).

Al sustituir los valores conocidos, se obtiene:

$$Costo_operación = \frac{15\%}{100\%} \times 862.998Bs$$

$$Costo_operación = 129450Bs$$

Por último, para la estimación del flujo de caja anual, se debe calcular el valor residual de los equipos al final de la vida del proyecto. Para esto, es necesario determinar la depreciación anual de los equipos adquiridos, empleando la siguiente ecuación:

$$DEP = \frac{Costo_inicial}{Vida_util} \quad \text{Ecuación N° B30}$$

Donde:

DEP: Depreciación anual del equipo (Bs/año).

Costo_inicial: Costo inicial del equipo (Bs).

Vida_util: Vida útil del equipo (años).

Para el caso del molino, la vida útil de este equipo según Aries y Newton (1955) es de 12 años, por lo que la depreciación anual del mismo sería:

$$DEP = \frac{93.928Bs}{12 \text{ años}}$$

$$DEP = 7.827,3 \text{ Bs/año}$$

Una vez determinada la depreciación, se procede a determinar el valor en residual de cada uno de los equipos adquiridos, siendo este valor la diferencia entre su valor original y la depreciación acumulada. Para calcular el valor residual de los activos se emplea la siguiente ecuación:

$$VRm = Costo_inicial - DEP \times N \quad \text{Ecuación N° B31}$$

Donde:

VRm: Valor residual del molino. (Bs).

N: Vida del proyecto (años).

Sustituyendo en la Ecuación N° B31 los valores conocidos, se determina el valor residual del molino de la siguiente manera:

$$VRm = 93.928Bs - 7.827,3 \text{ Bs/año} \times 10 \text{ años}$$

$$VRm = 15.655Bs$$

Sin embargo, es necesario adquirir dos molinos de martillo, por lo cual el valor residual total al final de la evaluación sería:

$$VR = VRm \times 2$$

Ecuación N° B32

Donde:

VR: Valor residual (Bs).

Al sustituir los valores conocidos en la ecuación anterior, se obtiene:

$$VR = 15.655Bs \times 2$$

$$VR = 31.309Bs$$

El flujo monetario neto (Ft) es la sumatoria algebraica de los flujos monetarios de un proyecto al final del año t. En consecuencia, si para cada año t los flujos monetarios de un proyecto son: Inversión (It), Ingresos Brutos (IBt), Costos operacionales (Copt), Costos de mantenimiento (Cmant) y Valor residual (VRt), entonces, para cada año, el flujo monetario neto es:

$$Ft = IBt - It - Copt - Cmant - Cmpt + VRt$$

Ecuación N° B33

Por lo que la convención usual de signos determina que: se le asigna signo positivo (+) a todo flujo que represente un ingreso para el proyecto, y signo negativo (-) a todo flujo que represente un egreso para el proyecto.

Donde:

Ft: Flujo de caja del año t (Bs).

It: Inversión realizada en el año t (Bs).

Copt: Costos de operación en el año t (Bs).

Cmant: Costos de mantenimientos del año t (Bs).

Cmpt: Cantidad de dinero desembolsada anualmente para comprar las materias primas (Bs).

IBt: Ingresos brutos producto de las ventas del año t (Bs).

Al sustituir los valores conocidos para el año cero, asumiendo que la operación empieza el mismo año en el cual se realiza la modificación, se obtiene:

$$Ft_0 = 61.992.000Bs - 225.428Bs - 129.450Bs - 862.998Bs - 37.344.000Bs$$

$$Ft_0 = 23.430.124Bs$$

El Valor Actual del proyecto, mediante la siguiente ecuación:

$$VA(i) = \sum_{t=0}^t Ft \left(1 + \frac{i}{100\%}\right)^{-t} \quad \text{Ecuación N° B34}$$

Donde:

VA(i): Valor actual del proyecto (Bs).

i: Tasa de interés.

Al sustituir los valores conocidos en la Ecuación N° B31, se obtiene:

$$VA(i) = \frac{23.430.124Bs}{(1+0,1762)^0} + \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^1} + \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^2} + \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^3} + \\ \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^4} + \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^5} + \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^6} + \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^7} + \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^8} + \\ \frac{23.655.552Bs}{(1+0,1762)^9} + \frac{23.686.862Bs}{(1+0,1762)^{10}}$$

$$VA(i) = 131.198.247Bs$$

Por último, se calcula el Equivalente Anual del proyecto mediante la siguiente ecuación:

$$EA(i) = VA(i) \times \left(\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad \text{Ecuación N° B35}$$

Donde:

EA(i): Equivalente Anual del proyecto (Bs).

Al sustituir los valores conocidos en la ecuación, se obtiene:

$$EA(i) = 131.198.247Bs \times \left(\frac{0,1762 \cdot (1+0,1762)^{10}}{(1+0,1762)^{10} - 1} \right)$$

$$EA(i) = 28.800.213Bs$$