



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**MODELACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL EN EL ÁREA DE FILTRADO,
PLANTA PELLETS**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero Civil en Metalurgia

Camila Andrea Guzmán Meneses.

Copiapó, Chile 2022



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA

**MODELACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL EN EL ÁREA DE FILTRADO,
PLANTA PELLETS**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero Civil en Metalurgia

Profesor guía: Dr. Osvaldo Pávez M.

Dra. Ana María Rivera V.

Tutor guía: Walter Gómez M.

Comisión: Mg. Juan Chamorro

Camila Andrea Guzmán Meneses.

Copiapó, Chile 2022

MODELACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL EN EL ÁREA DE FILTRADO, PLANTA PELLETS

Este documento de Trabajo de Titulación fue aprobado por:

Nombre de la comisión	Calificación	Firma
Dr. Osvaldo Pavéz Miqueles Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.4	
Dra. Ana Rivera Varas Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.9	
Mg. Juan Chamorro González Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.2	

Dra. Ana Rivera Varas
Directora Departamento de Ingeniería en Metalurgia

Resumen

Actualmente el área de filtrado tiene la desventaja de no poseer un control automático sobre la humedad del producto, por ende el control es realizado a través de válvulas manuales, algunas de ellas del tipo volante. La apertura o cierre de estas válvulas va a depender de la experiencia del operador, a consecuencia de esto el cambio es lento, tedioso y con una alta variabilidad en la humedad del producto. Debido a esta problemática, es que el objetivo general del presente trabajo es generar un modelo del proceso de filtración para los filtros de discos utilizados en planta Pellet, determinando las variables operaciones más importantes con el fin de implementar un control avanzado. Para esto fue necesario la realización de 81 pruebas de filtración modificando las variables porcentaje de sólidos en la batea, el nivel de caja, la velocidad del filtro y el tiempo de soplado, con esta información se realizó un análisis de varianza para obtener las variables con mayor incidencia sobre el porcentaje de humedad y a continuación se obtuvo un modelo matemático. A partir del modelo matemático se realizaron 4 lógicas de control las cuales fueron desarrolladas con el propósito de poder implementar un control automático en el área.

Abstract

Currently, one of the disadvantages occurring in the filtering area is that it does not have any type of automatic control over the humidity of the product; therefore, the control is carried out through manual valves, being some of them of the flywheel type. The opening or closing of these valves will depend on the operator's experience; as a result, the change is slow, tedious and with a high variability in the humidity of the product. Due to this problem, the general objective of this work is to generate a model of the filtration process for the disc filters used in the Pellet plant, determining the most relevant operational variables in order to implement advanced control. For this, it was necessary to carry out 81 filtration tests varying the variables percentage of solids in the vat, the box level, the filter speed and the blowing time. With this information an analysis of variance was carried out to obtain the variables with greater incidence on the percentage of humidity, and then a mathematical model was obtained. From the mathematical model, 4 control logics were made, which were developed with the purpose of being able to implement an automatic control in the area.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes generales	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
CAPÍTULO II ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.....	3
2.1 Estructura del grupo CAP	3
2.1.1 CAP Minería.....	4
2.1.1.1 Planta de Pellets Huasco	5
2.1.1.2 Productos de Planta de Pellets Huasco	5
2.1.1.3 Descripción del proceso productivo	6
CAPÍTULO III ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	9
3.1 Proceso de filtrado.....	9
3.1.1 Ciclos de formación del queque	10
3.1.2 Variables de operación	11
3.1.3 Equipos de filtrado	12
3.2. Área de filtrado en Planta Pellets	17
3.2.1 Retrofitting de discos a vacío Brasfelt.....	19
3.2.3 Operación y funcionamiento básico del filtro de discos a vacío Brasfelt	20
3.2.4 Componentes	21
3.2.5 Principio de funcionamiento de los filtros.....	26
3.2.6 Condiciones de operación.....	28
3.3 Diseño experimental.....	29
3.3.1 Fundamentos del Modelo Factorial	30
3.3.3.1 Modelo factorial n^k	31
3.4 Modelo Matemático	34
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	35
4.1 Recolección de información en la planta	35
4.1.1 Equipos utilizados	35
4.1.2 Recolección de información para la construcción de un modelo factorial	36

4.1.3 Recolección de información en la planta para el modelo Matemático	38
5.1 Análisis de las Variables en el filtro N°7	39
5.1.1 Comparación de datos	44
5.1.2 Análisis de varianza.....	47
5.2 Obtención del Modelo matemático a través de Statgraphics	51
5.3 Lógica de control e instrumentación para el área de filtrado	52
5.3.1 Sensorización e instrumentación unitaria actual en el filtro.....	52
5.3.2 Nueva Implementación de sensorización e instrumentación unitaria	53
5.3.3 Lógica de control.....	54
5.3.3.1 Lógica de secuencia de puesta en servicio de un filtro.....	54
5.3.3.2 Lógica de secuencia de ajustes para el control de humedad.....	56
5.3.3.3 Lógica del lavado de telas.....	58
5.3.3.4 Lógica de detención del filtro	58
5.4 instrumentación y sensores que se deben incorporar para la correcta lógica de control	59
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES.....	60
6.1. Objetivo específico n°1: Identificar los tipos de variables que influyen en el proceso de filtración	60
6.2. Objetivo específico n°2: Desarrollar un modelo en base a las variables controladas en los filtros de discos.....	60
6.3. Objetivo específico n°3: Proponer una lógica de control e instrumentación para la sensorización del área de filtrado de la planta pellet	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXOS.....	65
ANEXOS A.....	66
ANEXOS B.....	88
ANEXOS C.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema estructural del grupo CAP	3
Figura 2.2 Esquema de las unidades de producción de CAP S.A	4
Figura 2.3 Esquema global diagrama flujo Planta de Pellets	6
Figura 3.1 Esquema de filtración con formación de queque	9
Figura 3.2 Esquema de las distintas formas de aplicar gradiente de presión y sus correspondientes equipos de filtración en minería	10
Figura 3.3 Esquema de las variables de operación en el proceso de filtrado	11
Figura 3.4 Filtro de tambor	12
Figura 3.5 Filtro de discos con tela.....	13
Figura 3.6 Filtro de discos cerámico.....	13
Figura 3.7 Filtro de bandeja.....	14
Figura 3.8 Filtro de banda horizontal.....	14
Figura 3.9 Esquema Filtro de prensa de placas verticales	15
Figura 3.10 Filtro de prensa de placas horizontales.....	15
Figura 3.11 Filtro hiperbárico.....	16
Figura 3.12 Proceso productivo del área de filtrado.....	16
Figura 3.13 Diagrama de retorno de agua en el área de filtrado.....	18
Figura 3.14 Esquema de las etapas o zonas del disco al vacío Brasfelt	20
Figura 3.15 Componentes del filtro de discos a vacío Brasfelt	21
Figura 3.16 Eje principal 1 disco	21
Figura 3.17 Eje principal con todos los discos	21
Figura 3.18 Tubos de filtrado	22
Figura 3.19 Tubos de filtrado con cabezal.....	22
Figura 3.20 Cabezales de vacío	22
Figura 3.21 Cabezal de vacío vista lateral	22
Figura 3.22 Sector plástico	23
Figura 3.23 Sector con tela	23
Figura 3.24 Sectores instalados en el eje	23
Figura 3.25 Sistema de agitación (Eje agitador y motor del eje agitador).....	24
Figura 3.26 Sistema de lavado.....	24
Figura 3.27 Chutes de descarga	25
Figura 3.28 Caja de alimentación	25
Figura 3.29 Diagrama de circuito de vacío y soplado en un filtro.....	27
Figura 3.30 Variables que intervienen en un proceso.....	29
Figura 3.31 pasos para llegar al ANOVA (Gutiérrez, 2008).....	33
Figura 5.10 Gráfico probabilidad normal	48
Figura 5.12 Gráfica orden vs residuos	50
Figura 5.13 Gráfica de superficie del modelo matemático.....	51
Figura 5.14 Esquema unitario de instrumentos, líneas hacia el filtro y algunos componentes	53
Figura 5.15 Nueva implementación de sensores e instrumentación en el área.....	53

Figura 5.16 Representación gráfica de los distintos niveles en la batea..... 55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Variación del porcentaje de sólidos en la batea.....	38
Tabla 4.2 Variación del porcentaje de velocidad.....	38
Tabla 4.3 Variación del porcentaje de nivel de caja 1	38
Tabla 4.4 Variación del tiempo de soplado	39
Tabla 5.1 Clasificación de niveles de las variables independientes	40
Tabla 5.2 Respuestas: porcentaje de humedad	40
Tabla 5.3 Respuestas: porcentaje de humedad	41
Tabla 5.4 Respuestas: porcentaje de humedad	41
Tabla 5.5 Respuestas: porcentaje de humedad	41
Tabla 5.6 Valores de contrastes	42
Tabla 5.7 Valores de los efectos	43
Tabla 5.8 Suma de cuadrados medios.....	45
Tabla 5.9 ANOVA del diseño factorial 2^4 con 3 réplicas	46
Tabla 5.17 Instrumentos y sensores que se deberían incorporar en el área.	59

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

Antecedentes generales

El área de filtrado es parte importante en la planta de Pellets ya que incide directamente sobre el nivel de producción, debido a que en esta área se genera el material denominado pellet feed (concentrado de hierro). El concentrado de hierro tiene dos opciones de ser comercializado, una es pasar directamente hacia las embarcaciones y ser exportado como pellet feed, la otra opción es seguir las etapas denominadas balling y endurecimiento térmico para finalmente obtener pellet producto. Actualmente los principales productos de venta en planta Pellets son pellet feed y pellet producto.

El concentrado de hierro presenta una propiedad en donde el material pasa a comportarse de un estado sólido a comportarse como un fluido viscoso, denominado licuefacción de la carga, está se caracteriza porque se forma una superficie lisa en toda la parte de la carga de la bodega, esto puede dar lugar a un corrimiento de la carga con la consiguiente pérdida de estabilidad que puede ocasionar la zozobra del buque. Es por esto que se debe tener controlada la humedad admisible a efectos de transporte (LHT) en el caso de pellet feed. En el caso de pellet producto es necesario conocer el porcentaje de humedad del concentrado de hierro que se dirige a balling.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Generar un modelo del proceso de filtración para los filtros de discos, determinando las variables operacionales más importantes con el fin de implementar un control avanzado en el área de filtrado de Planta Pellets.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar los tipos de variables que influyen en el proceso de filtración
2. Desarrollar un modelo en base a las variables controladas en los filtros de discos.
3. Proponer lógica de control e instrumentación para la sensorización del área de filtrado de la planta pellet.

CAPÍTULO II ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

2.1 Estructura del grupo CAP

El grupo CAP se estructura principalmente en 3 áreas de negocios, en la figura 2.1 se presenta un esquema estructural del grupo CAP.

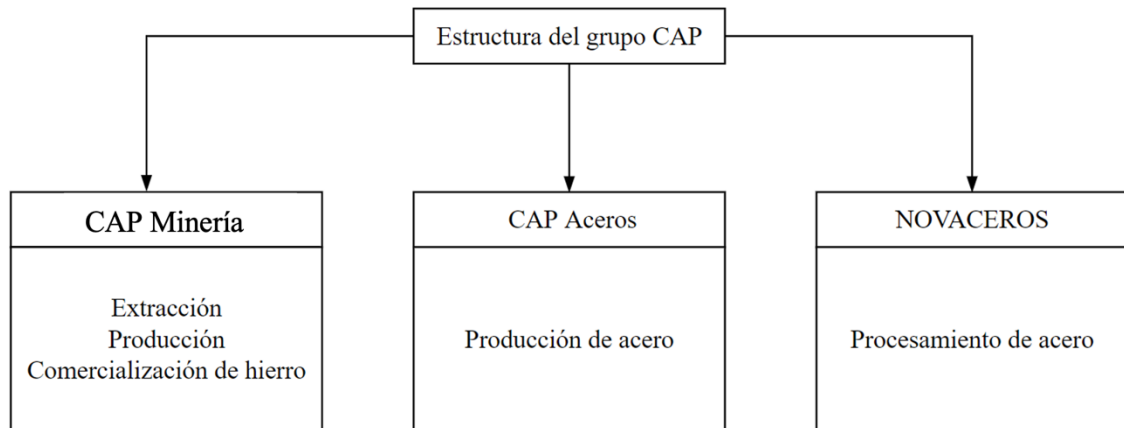


Figura 2.1 Esquema estructural del grupo CAP

CAP Minería está enfocada principalmente en la extracción, producción y comercialización de hierro, principalmente en las regiones de Atacama y Coquimbo.

CAP aceros se dedica a la producción de aceros, en donde se somete el metal de hierro con caliza y carbón a un proceso de fundición en altos hornos, dando como producto un acero de alta calidad. La planta se ubica en la comuna de Talcahuano.

NAVACEROS se dedica a procesar el acero para la industria de construcción e infraestructura, NOVACERO lo conforma a su vez Cintac e Intasa, Tupemesa y TASA.

2.1.1 CAP Minería

Compañía Minera del Pacífico (CMP), fundada en 1981, es el principal productor de minerales de hierro y pellets en la costa americana del pacífico. Su producción de hierro es exportada principalmente a países como China, Japón y Baréin.

Su mayor accionista es CAP S.A, con una participación minoritaria e M.C Inversiones (filial del conglomerado japonés Mitsubishi Corporation).

CAP S.A posee operaciones en las regiones de Atacama y Coquimbo, además en total cuenta con 3 unidades de producción, como se puede observar en la figura 2.2.

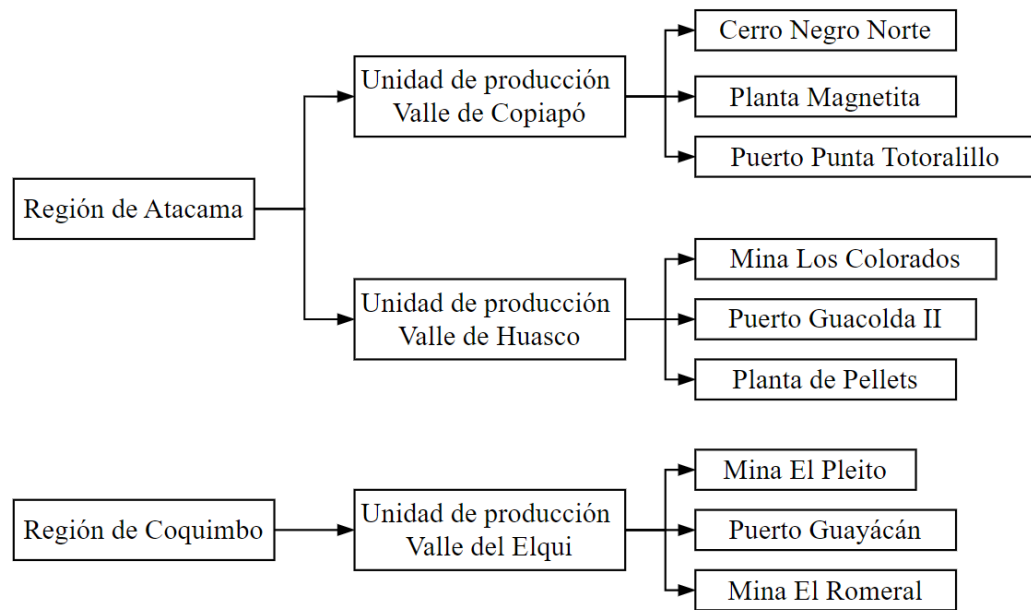


Figura 2.2 Esquema de las unidades de producción de CAP S.A

Actualmente, la compañía opera bajo un modelo operacional, denominado Gestión de Riesgo en los Procesos (GRP), el cual instala la capacidad para controlar todos los procesos de la compañía, identificando peligros, evaluando y controlando los riesgos existentes. Además, permite que las personas tomen decisiones en ambientes acotados y, con la evaluación de riesgos respectiva, para reducir la variabilidad y la accidentabilidad.

La GRP tiene como objetivo proteger a todos los trabajadores y al negocio productivo en todos sus ámbitos. (Minero, 2022)

2.1.1.1 Planta de Pellets Huasco

La Planta de pellets está ubicada a 5 km del puerto de Huasco, es parte de la unidad de producción de Valle de Huasco junto al yacimiento de Mina Los Colorados y el Puerto de Guacolda II. Opera desde fines del año 1978, con una capacidad inicial nominal de producción de 3.5 millones de toneladas anuales de pellets producto. (CMP, Planata de Pellets, 2018)

En el año 2022 la producción global de la planta debe ser de 7.737.725 toneladas métricas en donde se tiene 2.724.646 toneladas métricas de Pellet Feed, 3.178.812 toneladas de Pellet Producto, 222.517 toneladas pellet chips, 1.611.750 toneladas de Sinter Feed. (CMP, Budget Producción Planta Pellets, 2022)

2.1.1.2 Productos de Planta de Pellets Huasco

Son elaborados diferentes productos que son exportados y utilizados como materia prima para fabricar acero. El principal producto de venta es el Pellet Feed, a este le siguen en cantidades, el Pellet Producto y el Sinter Feed. (CMP, Operaciones y Productos, 2018)

Los Productos elaborados por la planta son:

- Pellet Feed
- Pellet Producto
- Pellet Chips
- Sinter Feed

2.1.1.3 Descripción del proceso productivo

La Planta de Pellets ha sido diseñado para producir aglomerados de minerales de hierro y consta de 4 áreas de subprocesos distribuidas en, el subproceso de molienda y concentración magnética, el subproceso de filtrado y balling, el subproceso de endurecimiento térmico y finalmente el subproceso de relaves.

Todo se inicia en la planta de beneficio donde se explota el mineral de hierro proveniente desde Mina Los Colorados, el mineral es sometido a diversas etapas de chancado y concentración magnética seca, obteniendo un preconcentrado de hierro, o Sinter Feed (campañas), ambos son transportados a través de trenes hacia la Planta de Pellets. El tren dispone de un apilador que puede depositar la carga en pilas, formando las canchas de preconcentrado con capacidad de 500 mil toneladas de capacidad total, o transferirlo directamente sobre la línea de preconcentrado, de este modo abastecen de material a 4 silos, que a su vez descargan hacia el proceso de molienda. En la figura 2.3 se puede observar el esquema global del diagrama de flujo de Planta Pellets.

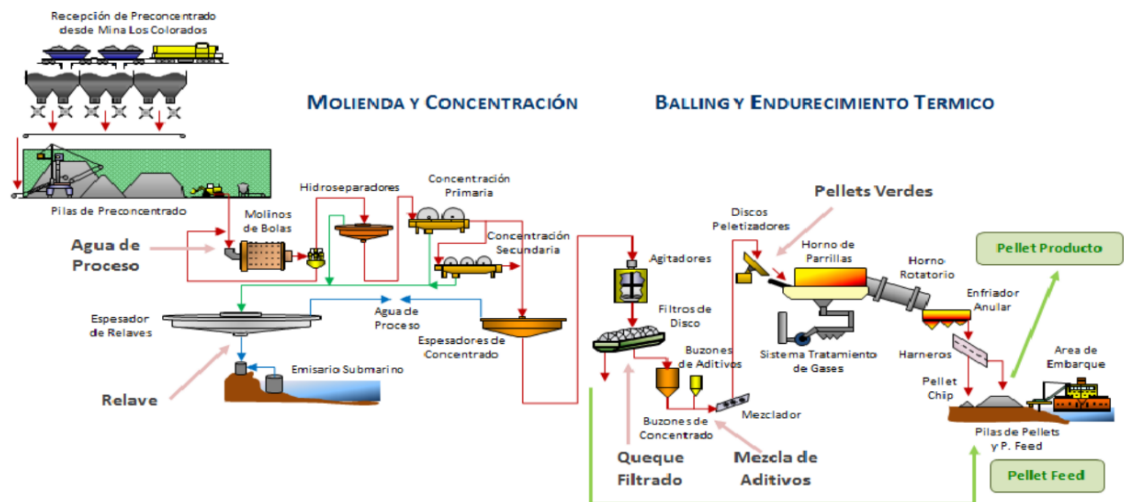


Figura 2.3 Esquema global diagrama flujo Planta de Pellets (Tapia, 2019)

En el área de molienda, la planta opera con un circuito cerrado directo de conminución, el cual posee cuatro líneas de molienda, las líneas L1, L2, L3 y L4. Las líneas L1, L2 y L3 corresponden al diseño original de la planta (1978), mientras que la línea L4 fue construida en el año 2013 como parte del proyecto “Aumento de Producción Valle de Huasco”.

Actualmente cada molino de las líneas L1, L2 y L3 procesan 290 t/h, a su vez el molino de la línea L4 procesa 310 t/h, por lo tanto, las líneas L1, L2 y L3 entregan una capacidad de producción de 5,4 millones de toneladas métricas al año, mientras que la línea L4 presenta una capacidad de producción de 1,92 millones de toneladas métricas al año, logrando en total una producción aproximada de 7,3 millones de toneladas al año, entre Pellet Producto, Pellet Feed, Sinter Feed y Pellet Chip.

Cada línea está formada por un molino de bolas, además de su batería de hidrociclones. En estos equipos se logra un producto con granulometría de 80% bajo 44 μm .

El molino de bolas es alimentado con preconcentrado y agua. Durante la rotación del cilindro, se promueve la caída en cascada de los cuerpos moledores, logrando reducir de tamaño el preconcentrado. El producto es una pulpa que descarga a través de rebalse, la cual se deposita en un sumidero y se envía mediante bombas a un sistema de clasificación de tamaños compuesta por una batería de 6 hidrociclones.

En los hidrociclones el flujo ingresa tangencialmente, en donde se originan dos corrientes, una fracción de partículas gruesas (underflow) que retorna al molino, y un rebalse de partículas finas (overflow) que deja el circuito de molienda. El rebalse pasa hacia un floculador magnético, cuya función es aglomerar el material posibilitando un aumento en la velocidad de sedimentación en el hidroseparador.

El producto del circuito cerrado directo alimenta al hidroseparador, en estos equipos ocurre el deslamado aprovechando la diferencia de densidad entre la magnetita y la sílice, el sobreflujo se compone de sílice y se envía al espesador de relaves, en cambio el underflow con alto contenido de magnetita se dirige a la etapa de concentración

magnética en húmedo, la cual está compuesta por una concentración primaria, en donde se tienen 3 tambores primarios con diámetros de 36” pulgadas y 750 Gauss de campo magnético respectivamente, a continuación, el material se destina a una concentración magnética secundaria, en el lugar se encuentran 2 tambores cada uno con un diámetro de 48” y 1000 Gauss de campo magnético.

El concentrado magnético es transportado mediante bombas hacia los esperadores de concentrado 1, 2 y 3, estos posteriormente alimentaran a 2 agitadores, en este punto se tiene 70-74% de sólidos. A continuación, la pulpa es enviada hacia el área de filtrado.

La pulpa homogenizada ingresa al área de filtrado en donde se recibe en 2 cajas repartidoras, que a su vez distribuyen el concentrado hacia los filtros de discos al vacío, y por efecto de vacío, así como de soplado, dejan caer el producto denominado concentrado de hierro filtrado.

El concentrado de hierro filtrado puede ser comercializado como pellet feed, (el cual se transporta directo a embarque específicamente hacia las bodegas de los buques, en el puerto de Guacolda II), o seguir las siguientes etapas denominadas balling y endurecimiento térmico. La etapa de balling está constituida de 7 discos peletizadores, en donde el concentrado de hierro filtrado se mezcla con cal hidratada además de caliza de alta pureza, de manera que actúen de aglomerantes, el producto obtenido de esta etapa son pellets verdes. La descarga de los discos peletizadores se clasifican en harneros de rodillo, donde el material con el tamaño adecuado descarga a la siguiente área denominada endurecimiento térmico, mientras que el material con sobre tamaño es enviado a remolienda. A continuación, los pellets verdes son transportados en correas hacia el área térmica, en donde son secados y calentados en el horno de parilla alcanzando una temperatura de 1100°C, luego son dirigidos hacia el horno rotatorio donde son endurecidos a 1300°C. Los pellets incandescentes son enfriados mediante un flujo de aire a temperatura ambiente en el enfriador anular. El aire obtenido de la transferencia de calor es recuperado hacia el horno rotatorio y el horno de parrilla. El producto final del área de endurecimiento térmico es almacenado y clasificado de acuerdo a su calidad y tamaño. Finalmente, la recuperación de los pellets producto desde las canchas es a través de capacho, y son transferidos mediante correas transportadoras a la pluma de embarque.

CAPÍTULO III ANTECEDENTES TEÓRICOS

3.1 Proceso de filtrado

Filtración es un proceso mecánico de separación sólido-fluido, mediante el cual el sólido es separado del fluido en una suspensión haciéndola pasar a través de un lecho poroso, denominado medio filtrante. El lecho retiene las partículas mientras el fluido pasa a través del medio filtrante y recibe el nombre de filtrado.

Según el mecanismo de filtración, se dispone de 2 grupos de filtros: están los filtros clarificadores (filtración sin formación de queque además de la filtración profunda) y filtros con formación de torta.

En minería se aplica la filtración con formación de queque o torta. La cual se puede observar en la figura 3.1 esquema de filtración con formación de queque. Ésta se utiliza para suspensiones que poseen más de un 10% de sólidos en volumen. Este tipo de filtración se caracteriza por que el sólido de la suspensión es retenido en la superficie del medio filtrante formando una capa denominada queque. Esto se produce cuando los poros del medio filtrante tienen un tamaño menor que las partículas. Cuando esté no es el caso, se necesita cubrir el medio filtrante con una delgada capa de material fibroso (ayuda de filtración) que bloquea el paso de las partículas a través del medio filtrante. (Concha)

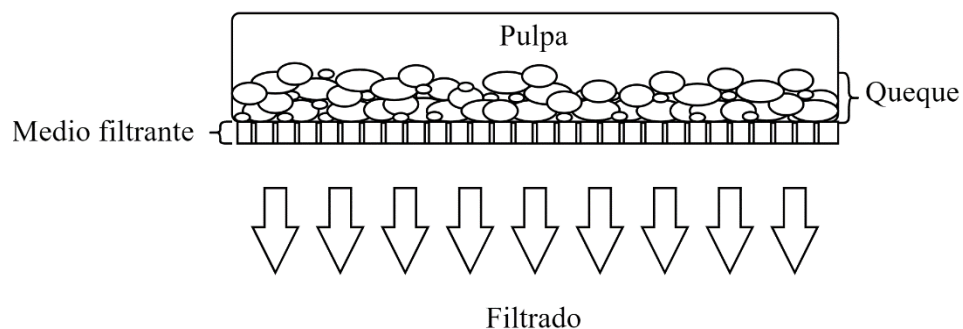


Figura 3.1 Esquema de filtración con formación de queque

Para establecer el flujo a través del medio filtrante es necesario aplicar un gradiente de presión. En la figura 3.2 se puede apreciar un esquema con las distintas formas de aplicar gradientes de presión y sus correspondientes equipos de filtración.

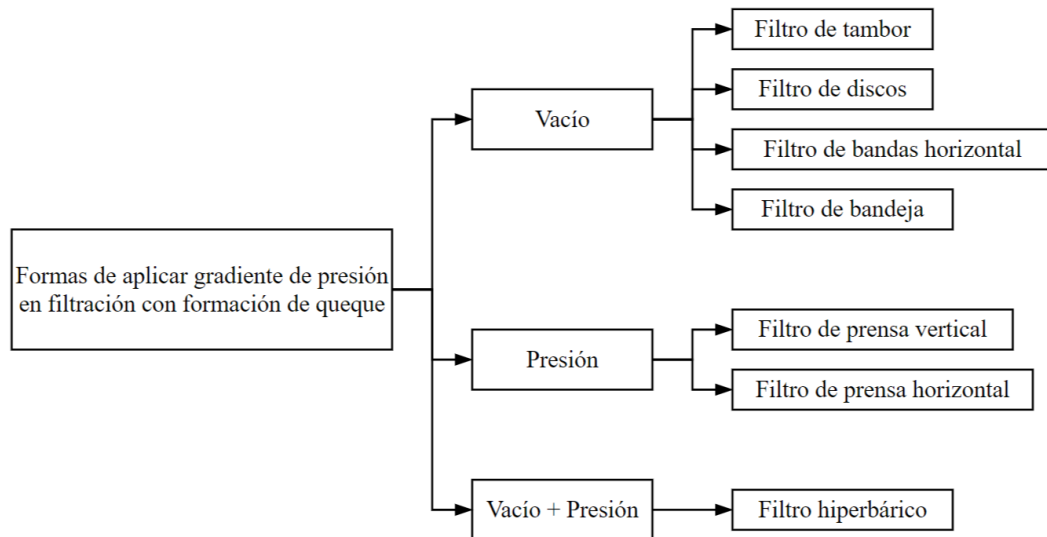


Figura 3.2 Esquema de las distintas formas de aplicar gradiente de presión y sus correspondientes equipos de filtración en minería

3.1.1 Ciclos de formación del coque

La mayoría de los equipos de filtración trabajan con los siguientes ciclos: formación del coque, lavado, secado y descarga, los cuales se detallan a continuación

Formación del coque: el espesor del coque depositado en el medio filtrante, depende de la gradiente de presión, la concentración de suspensión y el tiempo de succión.

Lavado del coque: se realiza para eliminar las impurezas o recuperar líquidos valiosos.

Secado del coque: etapa en la que el agua retenida en los poros del coque se desplaza soplando aire o succionando aire de la atmósfera.

Descarga del coque: en el caso de filtración al vacío la descarga es muy simple y consiste en raspar las telas y eliminar el producto por gravedad. El caso de filtración a

presión o filtración hiperbárica la descarga se complica ya que se necesita mantener la presión en la cámara, de modo que es necesario tener válvulas que permitan presurizar y despresurizar la zona de descarga en ciclos controlado.

3.1.2 Variables de operación

Los diferentes tipos de variables que intervienen en el proceso de filtración, son : variables de entrada, variables de salida, variables de diseño, variables de control, parámetros y perturbaciones, como se puede observar en la figura 3.3.

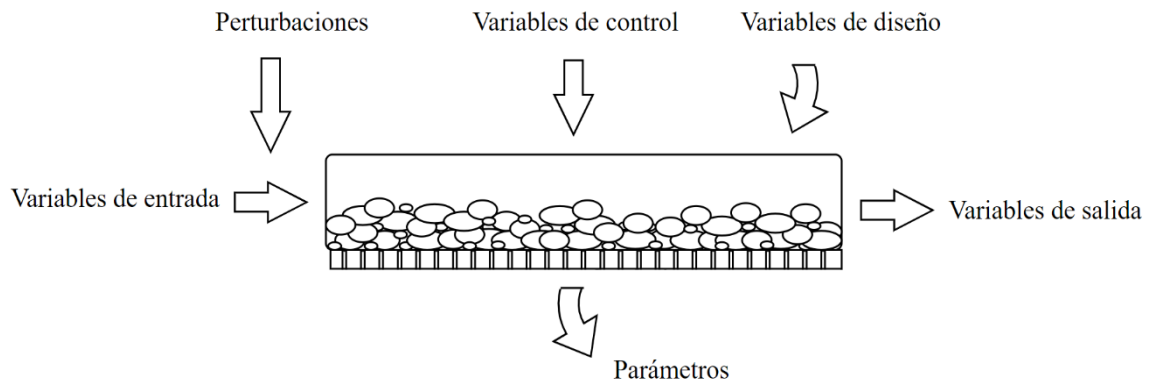


Figura 3.3 Esquema de las variables de operación en el proceso de filtrado

- Variables de entrada: flujo de entrada, concentración de sólidos de entrada.
- Variables de salida: flujo de descarga, porcentaje de humedad del queque.
- Variables de diseño: área de filtración y gradiente de presión.
- Variables de control: tiempo de filtración, tiempo de lavado, tiempo de secado.
- Parámetros: porosidad, permeabilidad, compresibilidad, densidad y forma de las partículas.
- Perturbaciones: granulometría del sólido.

3.1.3 Equipos de filtrado

Según la forma con que se aplica la gradiente de concentración, existen los equipos de filtros al vacío, los equipos de filtración a presión y los filtros hiperbáricos

Filtros al vacío, se subdividen en 4 tipos de filtros: el filtro de tambor, el filtro de disco, el filtro de bandeja y el filtro de banda horizontal. Mientras los 3 primeros son capaces de producir queques con humedades de 12 – 18 %, el filtro de bandas y el filtro de bandeja logran llegar a humedades de 8-10%. A continuación, se describe brevemente cada equipo. (Concha)

Filtros de tambor: lo conforma un tambor rotatorio con su parte inferior sumergido en la pulpa. La superficie del tambor está cubierta por tela filtrante. La pulpa es succionada desde el interior del tambor donde se ha generado un vacío, el sólido es retenido en la superficie cilíndrica formando un queque. Durante el giro es posible lavar el queque rociando agua en su superficie. A continuación en la figura 3.4 se puede observar el filtro de tambor.

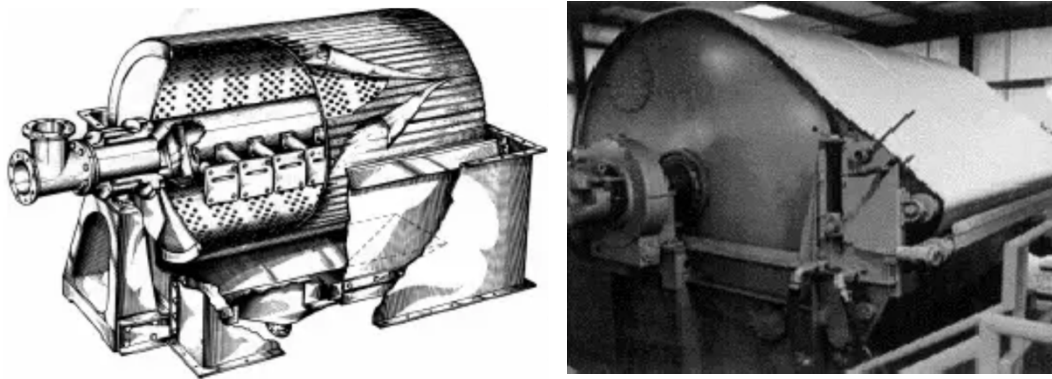


Figura 3.4 Filtro de tambor

Filtro de discos: consiste en un eje central que soporta un número determinado de discos, cada uno de los cuales está conectado a un equipo de vacío. Cada disco está

cubierto de una tela filtrante. Una ventaja de este equipo en comparación con los filtros de tambor es su gran superficie por unidad de área, ya que permite filtrar por ambas caras, además permite una mayor factibilidad y flexibilidad en el cambio de telas. Una variante de estos filtros son los filtros cerámicos, los cuales en funcionamiento son muy similares, pero se diferencian en que el material filtrante es un material cerámico micro poroso. A continuación se puede observar un filtro de discos con tela en la figura 3.5 y un filtro de discos cerámicos en la figura 3.6.

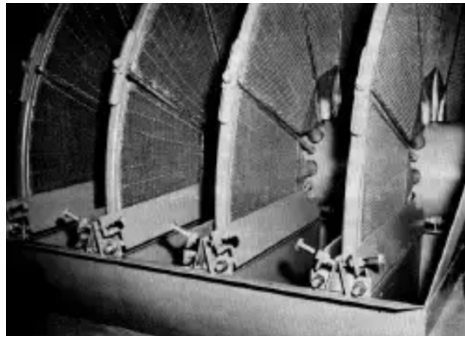


Figura 3.5 Filtro de discos con tela

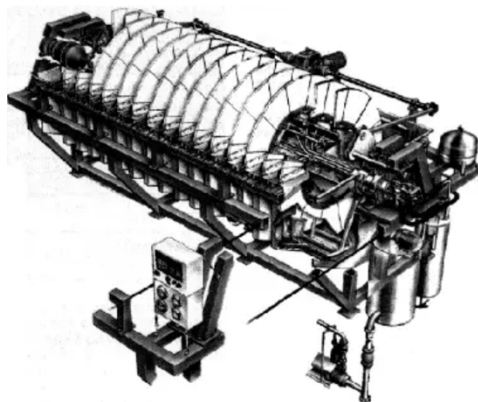


Figura 3.6 Filtro de discos cerámico

Filtros de bandeja: se conforma de una serie de bandejas abiertas posicionadas horizontalmente en un plano que, rota alrededor de un eje vertical, las bandejas esta

formadas por numerosos sectores en forma de trapecio inclinados hacia el eje central que conectan con una válvula común bajo el centro del equipo. Su desventaja es que las bandejas se utilizan solo, por un lado. Este equipo se puede observar en la figura 3.7.

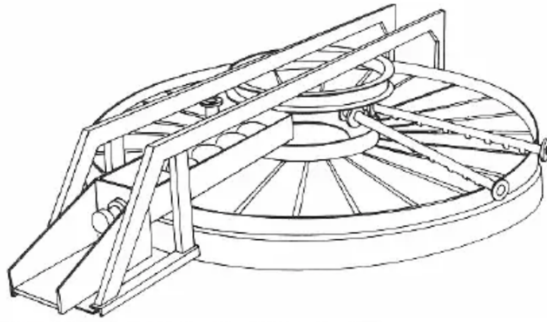


Figura 3.7 Filtro de bandeja

Filtros de banda horizontal: es similar a una correa transportadora, en donde la banda está formada por una tela filtrante, su ventaja es la flexibilidad en la longitud de los ciclos. A continuación en la figura 3.8 se puede observar un filtro de banda horizontal.



Figura 3.8 Filtro de banda horizontal

Los equipos de filtración a presión, son considerados un método eficiente para lograr bajas humedades y mejorar rendimientos. Son equipos discontinuos. Se pueden

distinguir 3 tipos de equipos: filtro de prensas de placas verticales, filtro de prensa de placas horizontales y filtro prensa de discos.

Filtro de prensa de placas verticales: posee placas con orificios para la alimentación de la pulpa y el drenaje del líquido filtrado. En la figura 3.9 se puede observar un filtro de prensa de placas verticales y alguna de sus partes.

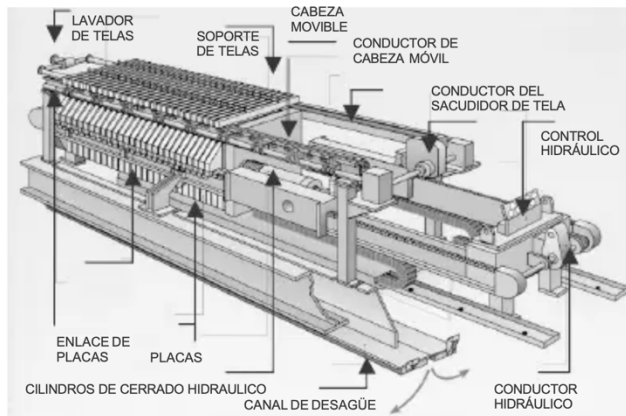


Figura 3.9 Esquema Filtro de prensa de placas verticales

Filtro de prensa de placas horizontales: filtro a presión semi-continuo, otorga una baja humedad además de gran capacidad. Consiste en una cámara filtrante horizontal. En la figura 3.10 se puede observar un filtro de prensa de placas horizontales.

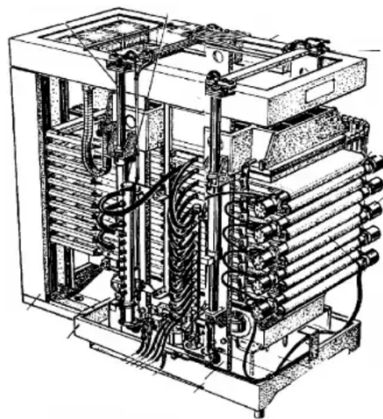


Figura 3.10 Filtro de prensa de placas horizontales

Filtro prensa de discos: se compone de 1 sola cámara, ubicada sobre una correa transportadora, que a su vez es el medio filtrante. Un pistón hidráulico provee la fuerza para producir la filtración.

filtro hiperbárico: consta de un filtro de vacío (disco, tambor o banda) el cual está inmerso en una cámara de presión, obtienen humedades menores o iguales a 8 %. Este equipo se puede observar en la figura 3.11.

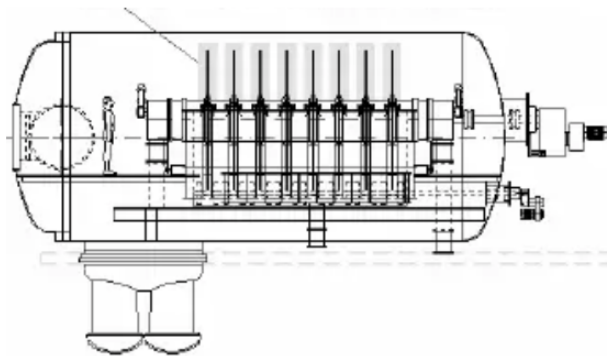


Figura 3.11 Filtro hiperbárico

3.2. Área de filtrado en Planta Pellets

En la teoría de filtrado existe una fuerza mecánica que es transmitida entre las partículas y por contacto entre ellas se produce el desplazamiento del líquido a través del medio filtrante. Además se consideran 2 tipos de materiales; los compresibles y los incompresibles, en estos últimos se clasifican las pulpas de hierro. (R, 1996)

El área de filtrado en Planta Pellets está conformada por, 2 cajas repartidoras con una altura de 3 metros, 4 bombas centrífugas (2 activas), 3 compresores de soplado Atlas Copco, 4 sellos barométricos, 5 bombas de vacío (4 activas) Unozawa-gumi Iron Works, 1 bomba NASH, 2 estanques agitadores Shinko con 15,8 metros de diámetro, 12,2 metros de altura, con una capacidad de 3760 toneladas métricas, 7 discos de filtros al vacío, así mismo cada filtro cuenta con un acumulador y una trampa de humedad.

En esta área se comienza con la recepción del concentrado de hierro proveniente de los esperadores N°1 y N°2, estos a su vez a través de bombas distribuyen la pulpa hacia una caja repartidora, la cual descarga a los estanques agitadores 1 y 2, en cambio el espesador de concentrado N°3 descarga directamente a ambos agitadores. (espesador de concentrado N°3 pertenece a la línea L4, la cual es la última línea construida para aumentar la producción en el Valle de Huasco).

El objetivo de estos equipos es mantener en suspensión y homogenizar la pulpa dentro del estanque. Los estanques agitadores mediante bombas impulsan la pulpa a 2 cajas repartidoras, la caja repartidora 1 o la caja repartidora 2, ambas cajas presentan sensores de nivel del tipo ultrasónico. La caja repartidora 1 alimenta a los 7 filtros, en cambio la caja repartidora 2 solo alimenta a 6 filtros (exceptuando al filtro 7), por lo tanto, en el proceso solo se trabaja con una caja repartidora, también se puede trabajar con hasta 100% de su nivel de caja. El sobreflujo de ambas cajas retorna a los agitadores.

El concentrado de hierro filtrado de los filtros N°4, N°5 y N°6 cae a la correa transportadora N° 7109, la cual es reversible, de modo que puede llevar el producto a balling mediante la correa 7110 o dirigirse a Pellet Feed a través de la correa 7108-1. Lo mismo ocurre con los filtros N°1, N°2 y N°3 en donde el producto cae a la correa N°7108, también reversible, y el producto será guiado de acuerdo a las necesidades de la

producción. En cambio, la descarga del filtro N°7 es enviada solo al proceso de balling mediante la correa 7110. A continuación se puede observar en la figura 3.12 el proceso productivo del área de filtrado.

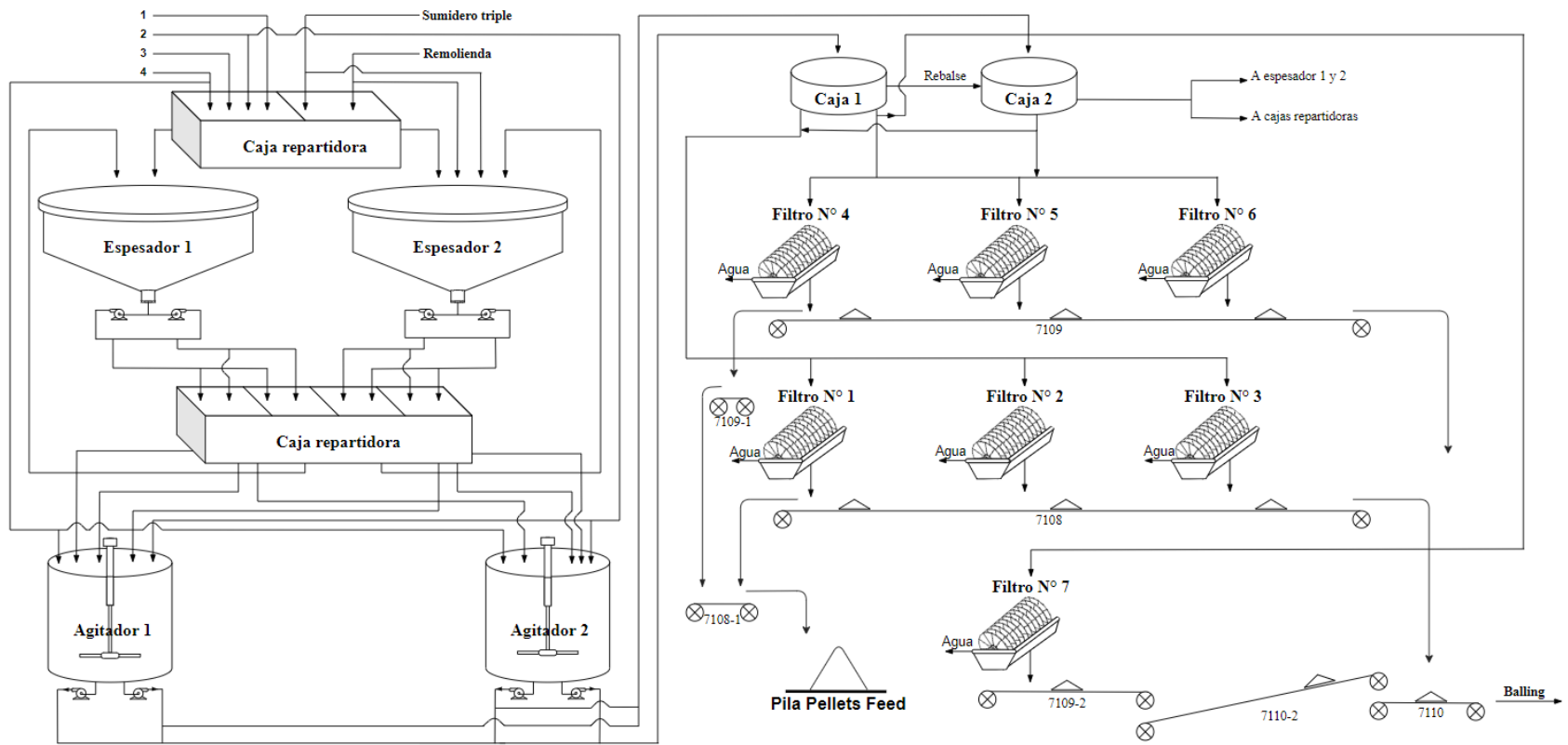


Figura 3.12 Proceso productivo del área de filtrado

Los sobreflujos de la batea de los filtros N°1, N°2 y N°3, además del filtro N°7, retornan a la caja repartidora, para luego ser distribuida a los espesadores de concentrado, mientras que los sobreflujos de las bateas de los filtros N°4, N°5 y N°6 retornan directamente hacia los espesadores.

El agua extraída del queque en la etapa de succión se recoge en el separador de filtro, donde se produce la separación de aire y agua. El filtrado de los filtros N°4 y N°1 se dirigen al sello barométrico 7125-1, a su vez el filtrado de los filtros N°5 y N°2 llegan al sello barométrico 7125-2, al igual que el filtrado de los filtros N°6 y N°3 ambos descargan en el sello barométrico 7125-3, el filtrado del filtro N°7 se envía al sello barométrico 7125-4 (único que no comparte sello barométrico).

El sobreflujo de los sellos barométricos al igual que su descarga van al estanque 7118-1, a su vez este retorna hacia ambos espesadores de concentrado.

El sobreflujo de ambos espesadores de concentrado va al estanque 7118, en donde su descarga es utilizada como agua de dilución en la batea de los filtros para la pulpa. Dependiendo del material a filtrar (campañas) o del porcentaje de sólidos proveniente del agitador se le agrega una cantidad de agua de dilución.

A su vez el sobreflujo del estanque 7118 cae al estanque 7002, en donde su sobreflujo se ira al espesador de colas, y la descarga puede dirigirse hacia la canaleta de remolienda o retornar a los espesadores de concentrado. A continuación se puede observar en la figura 3.13 el diagrama de retorno de agua en el área de filtrado.

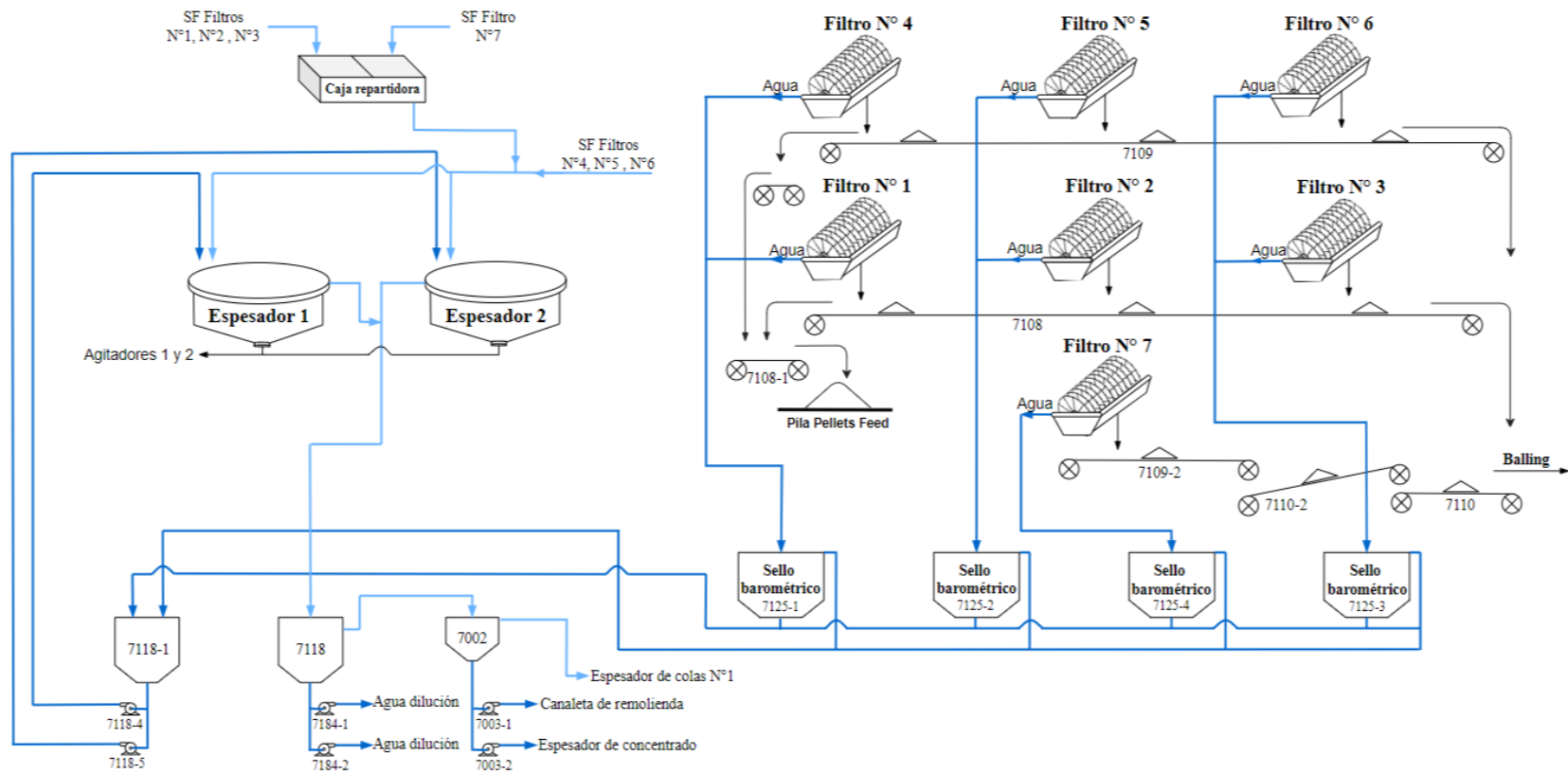


Figura 3.13 Diagrama de retorno de agua en el área de filtrado

3.2.1 Retrofitting de discos a vacío Brasfelt

El retrofitting de discos a vacío Brasfelt fue desarrollado para trabajar en condiciones severas de operación, a la vez obtener una mayor productividad, facilidad en la operación, bajo mantenimiento y consumo de energía. (Lohner, 2004)

El funcionamiento básico del retrofitting consiste en recibir la pulpa y hacer la separación de la misma formando un queque de minería con un nivel de humedad que varía desde 8 a 12% de humedad.

Los 7 filtros utilizados en Planta de Pellets son retrofitting de discos a vacío Brasfelt, cada equipo tiene un largo de 7464 mm, ancho de 3340 mm y una altura de 2547 mm. Cada filtro está constituido de 12 discos con 10 sectores, así mismo cada disco presenta un diámetro de 2690 mm, además 6 discos cuentan con salida para el lado 1 o lado A (lado derecho) y los 6 discos restantes poseen salidas para el lado 2 o lado B (lado izquierdo).

Los sectores revestidos con tela filtrante van conectados al eje principal a través de los “o-ring” específicamente en los bocales de los tubos de filtrado, donde el vacío lleva el agua filtrada. Los bocales conectados a los tubos forman los discos de sectores los cuales tienen contacto directo con la pulpa.

El eje principal está apoyado en los descansos, con lubricación constante, a través del sistema de lubricación automatizado (localizado en el lateral de la batea), abajo del eje principal se encuentra el eje de agitación, que tiene el objetivo de mantener la pulpa en suspensión.

En los sectores del filtro se comienza con una succión de la pulpa, lo que posibilita que el agua pase a través de las aberturas de la tela y el concentrado de hierro quede retenido sobre la superficie de la tela. En un punto determinado ocurre la inversión de succión para la presión, denominada soplado, la cual actúa de forma de desprender el queque retenido en la superficie, este es dejado caer fuera del sector y es descargado a través de chutes.

3.2.3 Operación y funcionamiento básico del filtro de discos a vacío Brasfelt

Si se analiza el recorrido de un sector hasta que complete un giro, se producen 5 etapas o zonas que están determinadas por la posición del sector en un punto de su recorrido.

Zona de formación de queque: ocurre cuando el sector ingresa a la batea con pulpa y se prolonga hasta donde se inicia la zona de vacío.

Zona de crecimiento: se inicia cuando el sector ingresa a la zona de vacío (succión) y finaliza cuando este sale de la pulpa.

Zona de desaguado: comprende desde que el sector inicia su salida de la pulpa hasta que quede totalmente fuera de ella.

Zona de secado: está comprendida entre el término de la etapa de desaguado y el inicio de la descarga (soplado).

Zona de descarga: Es la zona inmediata antes que el sector ingrese a la pulpa. A continuación se presenta un esquema de las etapas o zonas del disco al vacío Brasfelt en la figura 3.14.

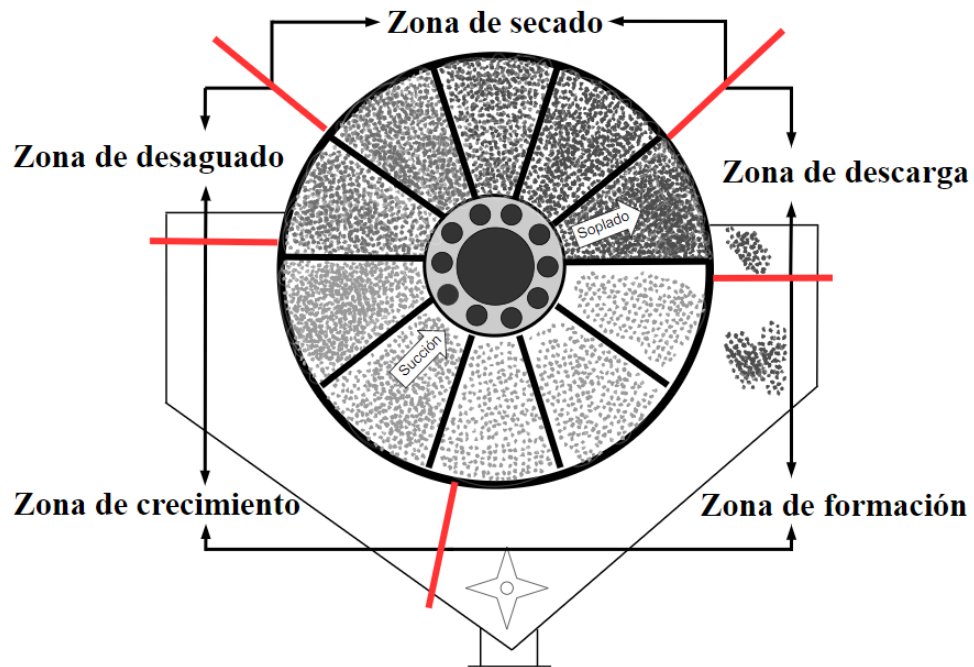


Figura 3.14 Esquema de las etapas o zonas del disco al vacío Brasfelt

3.2.4 Componentes

Para el adecuado funcionamiento del Retrofitting de discos a vacío Brasfelt son necesario los siguientes componentes, los cuales se pueden observar en la figura 3.15. A continuación se describe cada uno de ellos.

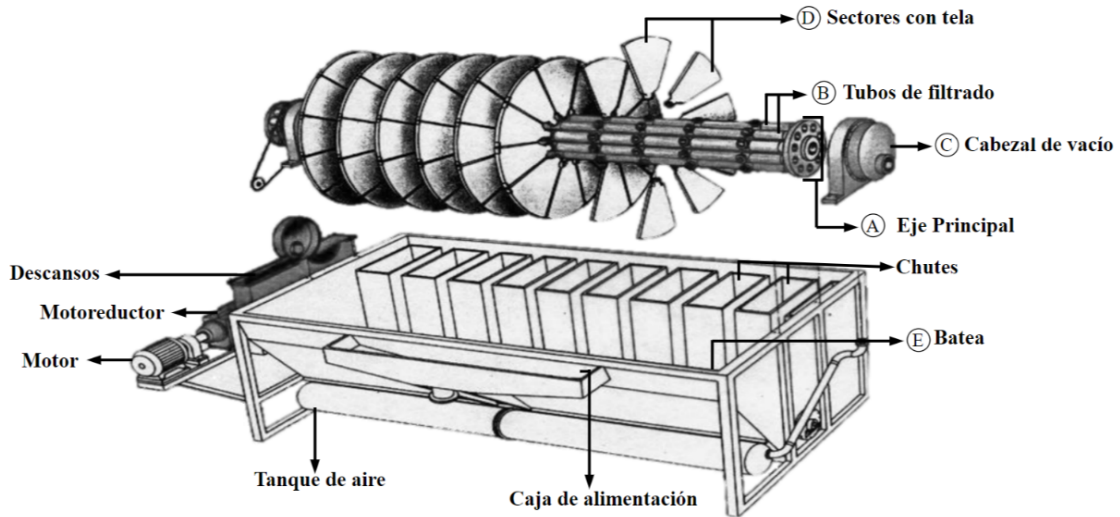


Figura 3.15 Componentes del filtro de discos a vacío Brasfelt

A) Eje principal: Estructura cilíndrica que presenta 10 canalizaciones independientes, cada una de ellas conectadas a un sector a través de “o-rings”. Además, el eje está unido por sus extremos al circuito de vacío por dos cabezales. Dispone de un sistema motriz con convertidor de frecuencia permitiendo ajustar la velocidad de rotación. En la figura 3.16 se puede observar el eje principal con solo 1 disco, en cambio en la figura 3.17 se esquematiza el eje principal con todos los discos.

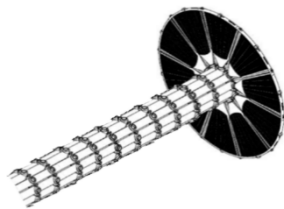


Figura 3.16 Eje principal 1 disco
discos

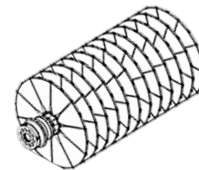


Figura 3.17 Eje principal con todos los
discos

B) Tubos de filtrado: se ubican en la parte exterior del eje principal y son los que transportan el agua filtrada hacia el cabezal de vacío. En la figura 3.18 se pueden observar los tubos de filtrado y en la figura 3.19 se muestran los tubos de filtrado con el cabezal.

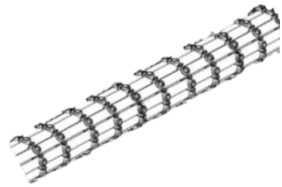


Figura 3.18 Tubos de filtrado

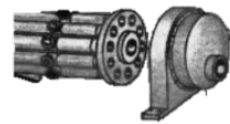


Figura 3.19 Tubos de filtrado con cabezal

C) Cabezales de vacío: Son 2 cabezales por filtro, es donde se conecta la parte exterior de la línea de vacío, además de soplado. A continuación en la figura 3.20 se observan los cabezales de vacío y en la figura 3.21 la vista lateral del cabezal de vacío.

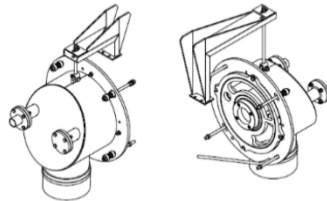


Figura 3.20 Cabezales de vacío

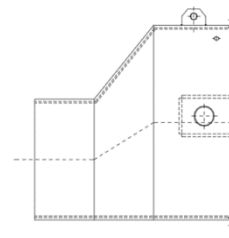


Figura 3.21 Cabezal de vacío vista lateral

Placas de vacío: son los que definen los ciclos de filtraje de formación de queque, fase de secado y desprendimiento del queque, determinan el vacío y la secuencia de flujo, van atornilladas al cabezal de vacío.

D) Sectores con telas de filtraje: El sector es una estructura plástica, provista de una tela. Los sectores en su interior llevan unas canalizaciones por donde se transporta el líquido hasta los tubos de filtrado (canalizaciones del eje central). A continuación se presenta la figura 3.22 el sector plástico, en la figura 3.23 se representa el sector provisto de tela y en la figura 3.24 se muestran los sectores instalados en el eje.

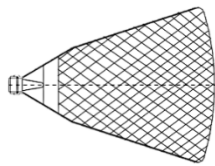


Figura 3.22 Sector plástico

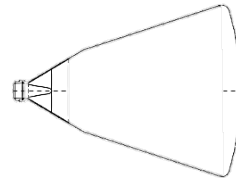


Figura 3.23 Sector con tela



Figura 3.24 Sectores instalados en el eje

E) Batea: Es donde llega la pulpa, está confeccionada de acero y en forma de “V” en cuyo vértice está ubicado el eje agitador. Un nivel adecuado de batea logra un adecuado funcionamiento de los filtros.

Sistema de agitación: Se ubica al fondo de la batea, consiste en un cilindro metálico sobre el cual van paletas que con el movimiento de rotación del eje logran agitar la pulpa para mantenerla homogénea y evitar la sedimentación. A continuación en la figura 3.25 se observa el sistema de eje de agitación.

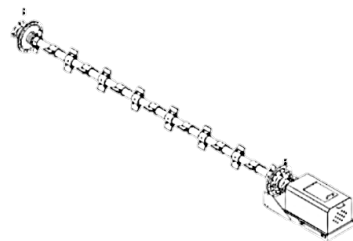


Figura 3.25 Sistema de agitación (Eje agitador y motor del eje agitador)

Sistema de lavado: son conductos que están dirigidos a la superficie de las telas en un ángulo de aproximadamente 30° , y son alimentados con agua presurizada entre 8-10 bar a través de un tubo de distribución común. Este sistema está controlado por una válvula manual en donde se debe realizar con el filtro girando, el soplado activo, y con la batea vacía o llena. A continuación en la figura 3.26 se observa el sistema de lavado.

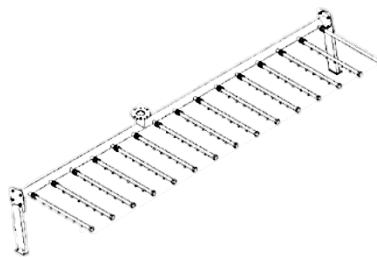


Figura 3.26 Sistema de lavado

Chutes de descarga: Es un cajón abierto por ambos lados (inferior y superior) por donde pasa el queque filtrado hacia la correa transportadora. A continuación en la figura 3.27 se observan los chutes de descarga.

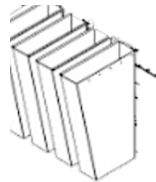


Figura 3.27 Chutes de descarga

Raspadores de queque: están conformados por una placa ubicada sobre la parte superior del chute, la cual canaliza el queque filtrado hasta los chutes de descarga, evitando que este retorne al interior de la batea.

Descansos: Es donde el eje principal está apoyado, además presenta lubricación constante, gracias al sistema de lubricación.

Sistema de lubricación automatizado: está ubicado al costado de la batea y otorga lubricación a las placas de vacío y descansos.

Caja de alimentación: La descarga proveniente desde la caja repartidora es transportada a través de un manifold, el cual descarga en la caja de alimentación y esta a su vez descargara hacia la batea a través de 3 puntos de descarga. En la figura 3.28 se observa la caja de alimentación

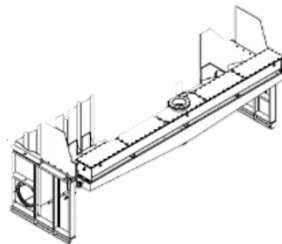


Figura 3.28 Caja de alimentación

3.2.5 Principio de funcionamiento de los filtros

El principio de la operación del filtro utiliza como agente de proceso el aire comprimido y aire de vacío. El vacío es producido por las bombas de vacío, las cuales producen una succión en los cabezales de vacío, dicha succión se propaga en los sectores del filtro, esto origina el queque en la superficie de la tela, a continuación, ocurre un soplado el cual es ejercida por los compresores, provocando desprender el queque de hierro filtrado, descargándolo en los chutes de descarga para posteriormente caer en la correa transportadora.

Para que esto ocurra el filtro presenta 2 sensores inductivos los cuales están sobre el exterior de los cabezales, uno actúa para el lado 1 (ZS1) y el otro para el lado 2 (ZS2), estos sensores captan la posición del eje de rotación del eje principal. También dispone de 2 válvulas solenoides, SG1 para el lado 1 y SG2 para el lado 2, las cuales están ubicadas cerca del equipo en la línea de aire comprimido, estas válvulas son las responsables de controlar el paso del fluido de forma de abrir o cerrar el paso, dependiendo de la posición que indique el sensor inductivo.

Si se analiza una fila de sectores del filtro en operación, se tiene que la fila está sumergida en la pulpa, y luego que un sector se posicione en la zona de formación se inicia el proceso, mediante la succión de las bombas de vacío hasta salir de la pulpa, retirando el máximo de humedad al queque, y en cierto instante cuando la fila de sectores está posicionada sobre los chutes, se da una inversión y donde se tenía vacío ahora ocurre un soplado actuando directamente sobre la fila. Este procedimiento funciona de manera alternada y continua, solo se detiene cuando el filtro no está operativo.

Luego de que ocurre la succión el líquido es extraído por la bomba de vacío, al salir por el tubo de filtrado es enviado al cabezal el cual presenta un vacuómetro (con una medición de -760mmHg a 0mmHg) en donde se verifica continuamente la existencia de las condiciones ideales de vacío. De este cabezal la pulpa es enviada al tanque de vacío, el líquido baja a través de una pierna barométrica hacia el sello barométrico. El aire que

todavía contiene humedad se dirige a la trampa de humedad, donde es retirada el agua. A continuación, llega hasta el manifold principal y al pasar hacia el condensador la presión cambia de negativa a positiva, posibilitando la separación del agua restante y aire. El agua restante caerá en la canaleta, y el aire será expulsado a través de manifold de descarga.

Para que el soplado ocurra, se tienen 3 compresores los cuales están en línea para soplar en cada equipo. Se posiciona un collar metálico en los cubos, que, al pasar por un sensor inductivo, envía la señal a la válvula selenoide (posicionada en la línea de aire comprimido en la salida del tanque de aire del filtro), que abre, dando pasaje al aire que realizara el soplado para desprender el queque.

El tanque separador de filtrado tiene la función de separar el filtro y el vacío generado por la bomba de vacío. Esta separación es necesaria para que no vaya líquido a la bomba de vacío. A continuación en la figura 3.29 se puede observar el diagrama de circuito de vacío y soplado de un filtro.

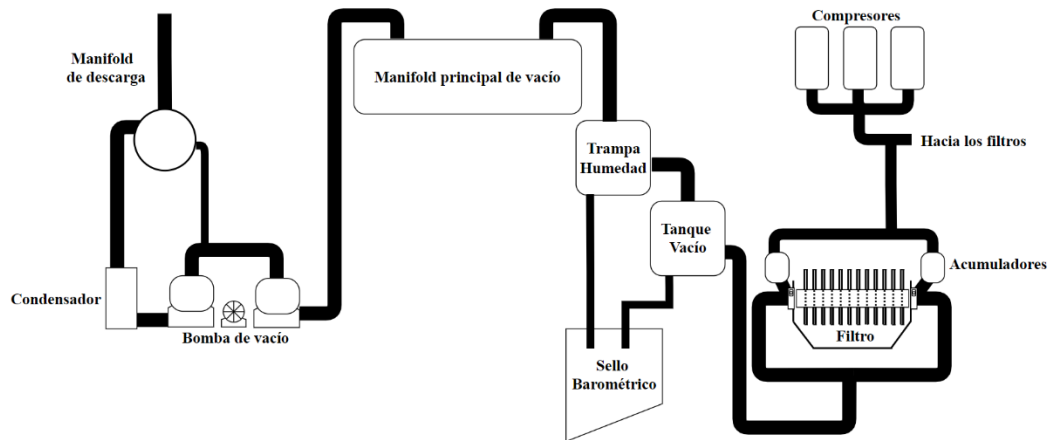


Figura 3.29 Diagrama de circuito de vacío y soplado en un filtro

3.2.6 Condiciones de operación

El retrofitting debe producir, aproximadamente, un máximo de 8-12% de humedad en el queque, con una presión de aire de succión de 640 mmHg, con un peso específico de finos de 4,9 g/cm³. (Lohner, 2004)

En la salida de cada equipo se tiene una descarga estimada de 210 t/h húmeda, el material que constituye a los sectores es Tamfelt-poliámido.

En cuanto al aire comprimido se presenta un volumen de aire de 12 a 15m³/m²h con una presión de 2,5 a 3 bar en el acumulador de aire. El vacío presenta un flujo mínimo por filtro de 180m³/min.

Se espera que el Retrofitting no opere con menos de 0,75 rpm (u 80 segundos por rotación) ni por encima de 1,5 rpm (40 segundos por rotación).

El porcentaje de humedad y la producción son parámetros inversamente proporcionales.

3.3 Diseño experimental

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un proceso, que se realiza con el objetivo de medir el efecto sobre una o varias variables. En todo proceso intervienen distintas variables (o factores), como lo son las variables independientes o de entrada, además de las variables dependientes o de salida. (Gutiérrez, 2008)

Las variables independientes en la mayoría de los casos se controlan durante la operación normal del proceso, además se distinguen de las otras variables, debido a que se pueden manipular, se denotan con la letra x.

También se presentan las variables dependientes o de respuesta en donde se obtiene el efecto de cada prueba experimental, se denota con la letra y

A continuación, se presenta en la figura 3.30 un esquema de las variables que intervienen en un proceso.

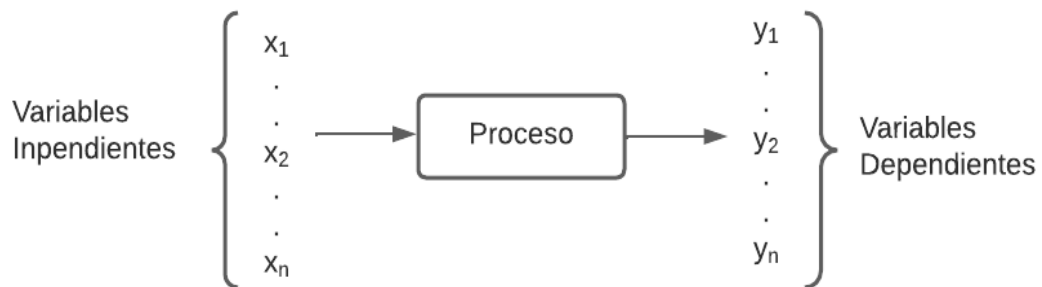


Figura 3.30 Variables que intervienen en un proceso

Finalmente, los distintos valores que se le asignan a cada variable en un diseño experimental se les denomina niveles los cuales pueden ser cuantitativos o cualitativos, una combinación de niveles de todas las variables se denomina tratamiento.

Un aspecto fundamental del diseño de experimentos es decidir cuáles pruebas o tratamientos se van a realizar y cuántas repeticiones de cada uno se requieren, de manera que se obtenga la máxima información al mínimo costo posible. El arreglo formado por los diferentes tratamientos que serán corridos, incluyendo las repeticiones, recibe el nombre de matriz de diseño.

3.3.1 Fundamentos del Modelo Factorial

En el campo de la ingeniería es frecuente hacer experimentos o pruebas con la intención de resolver un problema o comprobar una idea. En este caso específico, en el área de filtrado se desea optimizar las condiciones de operación, con el objetivo de lograr un mayor control sobre las variables que influyen en el proceso, otorgando una idónea humedad para el siguiente proceso ya sea en balling o para su posterior embarque.

El diseño de experimentos o modelo estadístico es precisamente la forma más eficaz de realizar pruebas, ya que manipula las variables para que proporcionen información, esto es gracias a que determina cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas. (Gutiérrez, 2008)

Existen varios diseños experimentales, en donde su objetivo es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores.

3.3.3.1 Modelo factorial n^k

Los modelos factoriales 2^k está compuesto de k factores con 2 niveles de prueba cada uno. Este tipo de modelo factorial completo es útil principalmente cuando el número de factores a estudiar esta entre dos y cinco ($2 \leq k \leq 5$), rango en el cual su tamaño se encuentra entre 32 tratamientos. (Arturo Ruiz, 2009)

Con el modelo factorial 2^4 se tienen 4 efectos principales; 6 interacciones dobles; 4 interacciones triples, y una interacción cuádruple.

Los efectos principales de cada factor son cómo influye en la variable dependiente por sí solo, mientras que las interacciones son cómo los factores trabajan juntos para influir en la variable dependiente. Cada uno de los efectos ya sea efectos principales o efectos de las interacciones, se obtiene a partir de sus contrastes.

Para obtener los contrastes se debe construir la tabla de signos del diseño (Tabla A2). El contraste de cada efecto se obtiene multiplicandola columna de signos por la columna de totales expresados en la notación de yates, o conocido como el método de algoritmo de yates. Con los contrastes calculados se procede a calcular los efectos con la ecuación 3.1 que se puede observar a continuación.

$$Efecto_{ABC \dots K} = \frac{1}{n2^{k-1}} [\text{contraste } ABC \dots K] \quad (3.1)$$

n: replicas k: factores

A continuación, se realiza la suma de cuadrados de los tratamientos el cual mide la variación o diferencia entre tratamientos, se calcula con un grado de libertad, con la ecuación 3.2.

$$SC_{AB\dots k} = \frac{1}{n2^k} [\text{contraste } ABC \dots k]^2 \quad (3.2)$$

n:replicas k: factores

Luego se debe aplicar ANOVA del diseño factorial, la suma de cuadrados totales SC_T en el diseño factorial se calcula de la ecuación 3.3.

$$SC_T = \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 - \frac{Y^2}{n2^k} \quad (3.3)$$

Tiene $n2^k-1$ grados de libertad, el subíndice i corre sobre el total de observaciones. En donde la suma de cuadrados totales representa una medida de variabilidad total presente en las observaciones, que mide la parte explicada por el modelo, como la parte no explicada.

La suma de cuadrados del error SC_E mide la variación dentro de tratamientos y se calcula por diferencia con la ecuación 3.4.

$$SC_E = SC_T - (SC_A + SC_B + \dots) \quad (3.4)$$

Cada efecto de interés en el ANOVA es una fuente de variación para la cual se prueba la hipótesis

H_0 : efecto = 0 H_A : efecto \neq 0.

Cuando se concluye que un efecto está activo, significa que es estadísticamente diferente de cero.

A continuación, se presenta el diagrama de pasos para llegar al ANOVA en la figura 3.31.

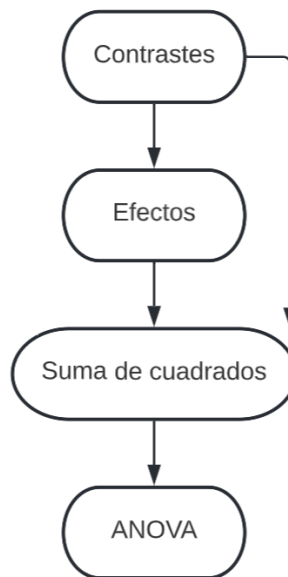


Figura 3.31 pasos para llegar al ANOVA (Gutiérrez, 2008)

Para elaborar la tabla ANOVA se debe realizar lo siguiente, en primera instancia se calcula la varianza de cuadrados medios(MC) con la ecuación 3.5.

$$\text{Varianza de cuadrados}(MC) = \frac{\text{suma de cuadrados}(SC)}{\text{grados de libertad}(GL)} \quad (3.5)$$

Grados de libertad = niveles -1.

A continuación se procede a calcular el estadístico de prueba(F_0) con la ecuación 3.6.

$$F_0 = \frac{\text{Varianza de cuadrados medios (MC)}}{\text{varianza de cuadrados medios del error (MC}_E\text{)}} \quad (3.6)$$

Para determinar si las distribuciones de datos comparadas son o no son significativamente diferentes hay que observar el valor-P entregado por la tabla. Un pequeño valor-P lleva a la conclusión de que hay una diferencia significativa entre las muestras comparadas. Para decir que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las muestras con un nivel del 95,0% de confianza el valor-P debe ser mayor a 0,05.

3.4 Modelo Matemático

Los modelos matemáticos son simplificaciones formales del mundo utilizando otro lenguaje, las matemáticas (Cervantes, 2022).

Los modelos son utilizados para analizar la relación entre 2 o más variables, además de parámetros y restricciones, pueden ser utilizados para entender distintos tipos de fenómenos. Dependiendo del objetivo se puede predecir un valor, hacer hipótesis, entre otros objetivos.

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE TRABAJO

En el siguiente capítulo se describen los métodos y procedimientos empleados para el desarrollo del trabajo. Se inició con la recuperación de datos obtenidos desde terreno para luego poder delimitar los rangos de las variables a estudiar, a continuación, se desarrolló el modelo factorial con los rangos anteriormente delimitados, y gracias a esto se obtuvo el modelo matemático.

4.1 Recolección de información en la planta

El proceso experimental fue realizado en función del levantamiento de datos otorgados por el personal del área de filtrado, además del personal de sala de control y personal de control automático, gracias a esto se pudo llevar acabo de manera correcta la toma de muestras.

4.1.1 Equipos utilizados

Los equipos en el área fueron los siguientes:

- Sonda
- Balanza Marcy
- Pesa gravimétrica

La sonda permitió extraer las muestras en 3 niveles distintos de la batea logrando un mejor valor acerca del porcentaje de sólidos. La balanza Marcy fue utilizada para medir el porcentaje de sólidos que se encontraba en la batea del filtro. La pesa gravimétrica, se utilizó para obtener el porcentaje de humedad de las muestras en donde, gracias a una diferencia entre el peso húmedo del queque y el peso seco del mismo, otorga la humedad de la muestra. Estos equipos utilizados se pueden observar en el anexo C.

4.1.2 Recolección de información para la construcción de un modelo factorial

En la recolección de información del proceso experimental se recolectaron en total 48 muestras aleatorias desde el área de filtrado, 16 muestras con 3 réplicas cada una. Todas las muestras recolectadas tuvieron lugar en el filtro N°7, todos los puntos de muestreo fueron realizados en ambas caras del disco, en la primera, media y última sección del filtro, con el objetivo de obtener una humedad promedio del queque.

En el área de filtrado se utilizó el modelo o diseño factorial 2^4 , con este tipo de modelo corresponde aplicar 2 niveles (n) y 4 factores cuantitativos (k) los cuales fueron A, B, C y D, esto nos generó un diseño con 16 tratamientos (Tabla A.1). A continuación, se presentan los 4 factores con sus 2 niveles respectivamente (nivel superior e inferior), los cuales se modificaron para obtener la(s) variable(s) más influyente(s) del área, se presenta además de una breve descripción de cada factor.

Factor A: Porcentaje de sólidos en la batea	Nivel inferior	60%
	Nivel superior	65%

Factor B: Porcentaje de velocidad	Nivel inferior	80%
	Nivel superior	100%

Factor C: Porcentaje de nivel de caja 1	Nivel inferior	50%
	Nivel superior	100%

Factor D: Tiempo de soplado(segundos)	Nivel inferior	0,7(s)
	Nivel superior	1,2(s)

Con estas modificaciones se procedió a medir la humedad (variable respuesta) del queque en una pesa gravimétrica.

- Porcentaje de sólidos en batea: En operación normal va a depender del tipo de material (campana) con el cual se está trabajando. Cuando la batea presenta sobre 70% de sólidos, genera alta producción y a la vez alta humedad, como producto se obtiene un queque grueso, pero con mayor humedad provocando que los chutes se saturen mucho más rápido.
- Porcentaje de velocidad: en operación normal del filtro se trabaja con 85%, si se trabaja la velocidad menor a 80% se tiene un exceso de sobre flujo en la batea.
- Porcentaje del nivel de caja 1: va a depender de las líneas que estén alimentando a la caja, y de las líneas de alimentación hacia los filtros que se estén operando
- Tiempo de soplado: en operación normal, el lado A del filtro se trabaja con 800 milisegundos y el lado B con 1100 milisegundos.

4.1.3 Recolección de información en la planta para el modelo Matemático

Para el modelo matemático fueron recolectadas 81 muestras aleatorias desde terreno, se modificaron 4 variables en el filtro 7. Las cuales fueron :el porcentaje de sólidos (la cual se modificó a través de la apertura o cierre de la válvula de dilución), la velocidad del filtro(se alteró mediante el cambio de las RPM en el motor), el porcentaje de nivel de caja 1(se modificó por medio de las bombas) y el tiempo de soplado. A continuación se puede observar en la tabla 4.1 la variación del porcentaje de sólidos en la batea que se utilizó, en la tabla 4.2 la variación del porcentaje de velocidad , en la tabla 4.3 la variación del porcentaje de nivel de caja 1 y en la tabla 4.4 la variación del tiempo de soplado.

Finalmente se procedió a medir la muestra en la pesa gravimétrica para obtener su correspondiente porcentaje de humedad.

Porcentaje de sólidos en la batea	60%
	62%
	63%
	64%
	65%

Tabla 4.1 Variación del porcentaje de sólidos en la batea

Porcentaje de velocidad	80%
	85%
	95%
	100%

Tabla 4.2 Variación del porcentaje de velocidad

Porcentaje de nivel de caja 1	50%
	60%
	70%
	80%
	100%

Tabla 4.3 Variación del porcentaje de nivel de caja 1

Tiempo de soplado	0,7 segundos
	0,9 segundos
	1 segundo
	1,1 segundo
	1,2 segundo

Tabla 4.4 Variación del tiempo de soplado

CAPÍTULO V ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del porcentaje de humedad realizados aleatoriamente en el filtro N°7, durante el periodo de Junio a Julio del año 2022.

Para llevar a cabo el análisis de forma más clara se creó un archivo en Microsoft Excel, en donde se realizó el vaciado de todos los datos obtenidos para posteriormente ser analizados mediante el método de ANOVA, descrito anteriormente, además de la utilización del software estadístico Statgraphics con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados.

5.1 Análisis de las Variables en el filtro N°7

Mediante el diseño de experimentos, el cual fue definido anteriormente, se analizaron las siguientes variables.

Las Variables independientes a analizar fueron son:

- Porcentaje de sólidos en la batea, con un 60% y 65% de sólidos
- Porcentaje de velocidad del filtro, 80% y 100% de la velocidad de giro del filtro
- Porcentaje de nivel de caja, 50% y 100% del nivel de caja 1
- Tiempo de soplado en segundos, de 0,7 segundos y 1,2 segundos

La variable dependiente o respuesta en el diseño experimental:

- Porcentaje de humedad.

Con los resultados de las pruebas experimentales del porcentaje de humedad (anexo A tabla A3), se procedió a realizar un análisis estadístico de efectos principales, basado en la metodología de algoritmos de yates, para determinar el nivel de importancia de cada una de las variables sobre el valor del porcentaje de humedad.

Para aplicar la metodología y lograr evaluar los efectos debido a las 4 variables independientes, se deben establecer en dos niveles, un nivel superior y un nivel inferior.

A continuación, en la tabla 5.1 se pueden observar las variables con sus correspondientes niveles.

Variables	Nivel	
	inferior	superior
Porcentaje de sólidos en la batea	60	65
Porcentaje de velocidad	80	100
Porcentaje de nivel de caja 1	50	100
Tiempo de soplado (segundos)	0,7	1,2

Tabla 5.1 Clasificación de niveles de las variables independientes

Posteriormente las respuestas obtenidas en las pruebas experimentales,(en este caso el porcentaje de humedad), se ingresan a una matriz donde se cuantifica la respuesta dependiendo de los niveles de cada variable utilizado en las pruebas. Esta matriz completa se puede observar en el anexo A tabla 1. Los valores de las respuestas obtenidas en las 48 pruebas experimentales se presentan en las tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 respectivamente.

	0,7 segundos tiempo de soplado					
	50% nivel de caja					
	60% sólidos			65% sólidos		
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
80% velocidad	8,79	8,54	8,68	9,35	9,20	9,19
100% velocidad	8,90	8,80	9,05	9,57	9,34	9,40

Tabla 5.2 Respuestas: porcentaje de humedad

	0,7 segundos tiempo de soplado					
	100% Nivel de caja					
	60% sólidos			65% sólidos		
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
80% velocidad	8,72	8,76	8,64	9,58	9,54	9,37
100% velocidad	9,07	8,84	8,87	8,94	9,12	9,01

Tabla 5.3 Respuestas: porcentaje de humedad

	1,2 segundos tiempo de soplado					
	50% nivel de caja					
	60% sólidos			65% sólidos		
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
80% velocidad	8,92	8,89	8,90	8,59	8,87	9,31
100% velocidad	8,97	8,96	9,09	8,91	8,99	8,96

Tabla 5.4 Respuestas: porcentaje de humedad

	1,2 segundos tiempo de soplado					
	100% Nivel de caja					
	60% sólidos			65% sólidos		
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
80% velocidad	8,97	8,92	8,9	9,50	9,15	9,41
100% velocidad	9,06	9,06	8,99	9,50	9,40	9,50

Tabla 5.5 Respuestas: porcentaje de humedad

A continuación se pueden observar los valores de los contraste en la tabla 5.6.

Fuentes de variabilidad(FV)	Valor de contrastes
sólidos (%)	8,41
velocidad (%)	1,61
nivel de caja (%)	2,65
tiempo de soplado (s)	0,45
sólidos (%) - velocidad (%)	-2,45
sólidos (%) - nivel de caja(%)	2,03
sólidos (%) - tiempo de soplado (s)	-3,49
velocidad (%) - nivel de caja (%)	-1,81
velocidad (%) - tiempo de soplado(s)	0,51
nivel de caja (%)- tiempo de soplado(s)	3,35
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%)	-1,67
velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado(s)	2,33
sólidos (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado(s)	3,29
sólidos (%) - velocidad (%) - tiempo de soplado(s)	2,05
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado(s)	2,15

Tabla 5.6 Valores de contrastes

Resultados de los efectos principales según el algoritmo de yates se pueden observar en la tabla 5.7

Fuentes de variabilidad (FV)	Valor de efectos
sólidos (%)	0,350
velocidad (%)	0,067
nivel de caja (%)	0,11
tiempo de soplado (s)	0,018
sólidos (%) - velocidad (%)	-0,102
sólidos (%) - nivel de caja(%)	0,084
sólidos (%) - tiempo de soplado (s)	-0,145
velocidad (%) - nivel de caja (%)	-0,075
velocidad (%) - tiempo de soplado (s)	0,021
nivel de caja (%)- tiempo de soplado (s)	0,139
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%)	-0,069
velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado (s)	0,097
sólidos (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado (s)	0,137
sólidos (%) - velocidad (%) - tiempo de soplado (s)	0,085
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado (s)	0,089

Tabla 5.7 Valores de los efectos

Según la metodología de yates, la variable que más efecto provoca en la respuesta es la que tiene mayor valor ,tal como se observa en la tabla 5.7.

De los 4 efectos principales, los que tienen mayor influencia sobre el porcentaje de humedad, serían:

- el porcentaje de sólidos en la batea
- porcentaje del nivel de caja.

En las interacciones dobles, los mayores efectos se ven reflejado en la interacción:

- porcentaje de sólidos junto al tiempo de soplado.
- el porcentaje de nivel de caja junto al tiempo de soplado.

En las interacciones triples el mayor efecto se ve reflejado en la interacción

- porcentaje de sólidos, porcentaje de nivel de caja, tiempo de soplado.

En cambio, el menor efecto se ve en el tiempo de soplado y el porcentaje de velocidad.

5.1.1 Comparación de datos

La medición de efectos por algoritmo de yates realizada determinó que la variable de tiempo de soplado es la que menor influencia presenta sobre el porcentaje de humedad. En base a esto no es suficiente para concluir que no afecten de manera significativa en el porcentaje de humedad. Para afirmar que esta variable no influye en el comportamiento de la variable respuesta, se debe realizar la prueba de estadística del análisis de varianza (ANOVA), y así poder posteriormente rectificar que el tiempo de soplado no influye en el porcentaje de humedad. Para el análisis de datos se realizó en primera instancia en Excel y a continuación se corrobora en el software estadístico Statgraphics, en donde se comparan las muestras a través del método ANOVA.

A continuación, en la tabla 5.8 se pueden observar los resultados de la suma de cuadrados medios, y en la tabla 5.9 se puede apreciar la tabla ANOVA del diseño factorial 2^4 con 3 replicas.

Análisis de varianza

Fuentes de variabilidad (FV)	Valor de la suma de cuadrados
sólidos (%)	1,473
velocidad (%)	0,054
nivel de caja (%)	0,146
tiempo de soplado (s)	0,004
sólidos (%) - velocidad (%)	0,125
sólidos (%) - nivel de caja (%)	0,085
sólidos (%) - tiempo de soplado (s)	0,253
velocidad (%) - nivel de caja (%)	0,068
velocidad (%) - tiempo de soplado(s)	0,005
nivel de caja (%) - tiempo de soplado(s)	0,233
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%)	0,058
velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado(s)	0,113
sólidos (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado(s)	0,225

sólidos (%) - velocidad (%) - tiempo de soplado(s)	0,087
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado(s)	0,096
SC _E	0,549

Tabla 5.8 Suma de cuadrados medios

Fuentes de variabilidad (FV)	Suma de cuadrados(SC)	Grado de libertad(GL)	Varianza de cuadrados medios(MC)	Estadístico de prueba (F ₀)	valor-p
sólidos (%)	1,473502083	1	1,473502083	86,6872166	1,2634E-10
velocidad (%)	0,054002083	1	0,054002083	3,17698247	0,06417363
nivel de caja (%)	0,146302083	1	0,146302083	8,60705969	0,00614666
tiempo de soplado (s)	0,00421875	1	0,00421875	0,24819218	0,62175779
sólidos (%) - velocidad (%)	0,125052083	1	0,125052083	7,35690648	0,01066036
sólidos (%) - nivel de caja(%)	0,085852083	1	0,085852083	5,05074151	0,03164036
sólidos (%) - tiempo de soplado (s)	0,253752083	1	0,253752083	14,9284226	0,00051279
velocidad (%) - nivel de caja (%)	0,068252083	1	0,068252083	4,0153205	0,05361587
velocidad (%) - tiempo de soplado (s)	0,00541875	1	0,00541875	0,31878907	0,57627309
nivel de caja (%) - tiempo de soplado (s)	0,233802083	1	0,233802083	13,7547494	0,00078775
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%)	0,058102083	1	0,058102083	3,4181885	0,0737395
velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado (s)	0,113102083	1	0,113102083	6,65387915	0,01469277
sólidos (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado (s)	0,225502083	1	0,225502083	13,2664542	0,00094541
sólidos (%) - velocidad (%) - tiempo de soplado (s)	0,087552083	1	0,087552083	5,15075377	0,03011289
sólidos (%) - velocidad (%) - nivel de caja (%) - tiempo de soplado (s)	0,096302083	1	0,096302083	5,66552274	0,02342724
Error	0,543933333	32	0,016997917		
Total	3,574647917	47			

Tabla 5.9 ANOVA del diseño factorial 2⁴ con 3 réplicas

5.1.2 Análisis de varianza

Del análisis de varianza se puede concluir que el tiempo de soplado no influye de manera significativa en la respuesta dado que su valor-p es mayor a 0,05. Por otra parte, se encuentran activas las variables de porcentaje de sólidos y porcentaje de nivel de caja ya que su valor-p es menor a 0,05. En cambio, el valor-p de la variable de velocidad está muy cercana al valor-p 0,05, por lo cual, si se ve influenciado el porcentaje de humedad, pero de menor manera que en comparación con el porcentaje de sólidos o el porcentaje de nivel de caja.

Puesto que el valor-p en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 65,9424% de la variabilidad en Humedad %.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,6217, que corresponde al tiempo de soplado, Consecuentemente, debería considerarse eliminar el tiempo de soplado del modelo. Al realizar la eliminación de la variable del tiempo de soplado, el estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 70,7658% de la variabilidad del porcentaje de humedad.

Todo resultado realizado a través de análisis de varianza debe cumplir 3 supuestos, los cuales son:

- Normalidad (proviene de una distribución normal)
- Varianza constante (igual varianza de los tratamientos)
- Independencia

Si se cumplen todos los supuestos, la validez de los resultados y conclusiones obtenidas en el análisis de varianza quedan consolidados y validan su confiabilidad.

Una manera para verificar el cumplimiento del primer supuesto denominado supuesto de normalidad, es mediante la gráfica de probabilidad normal, la cual se puede observar en la figura 5.10.

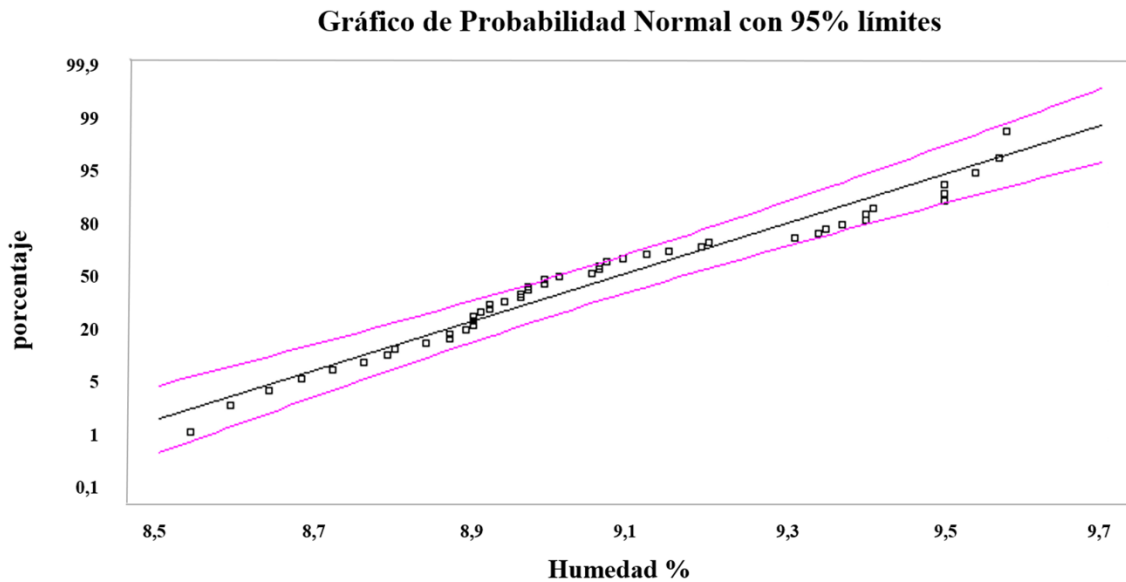


Figura 5.10 Gráfico probabilidad normal

Como se puede analizar en la figura 5.10, se puede observar que los puntos se acercan a la línea recta, a lo largo de esta con lo que se puede concluir que los datos siguen una distribución normal. En el caso de que los puntos se alejaran de manera extrema de la línea recta se podría concluir que los datos no siguen una distribución normal por lo cual al no cumplirse uno de los supuestos no se podría validar la confiabilidad de los resultados.

La manera de representar el segundo supuesto denominado varianza constante es a través de la representación de la gráfica predichos v/s residuos como se puede observar en la figura 5.11.

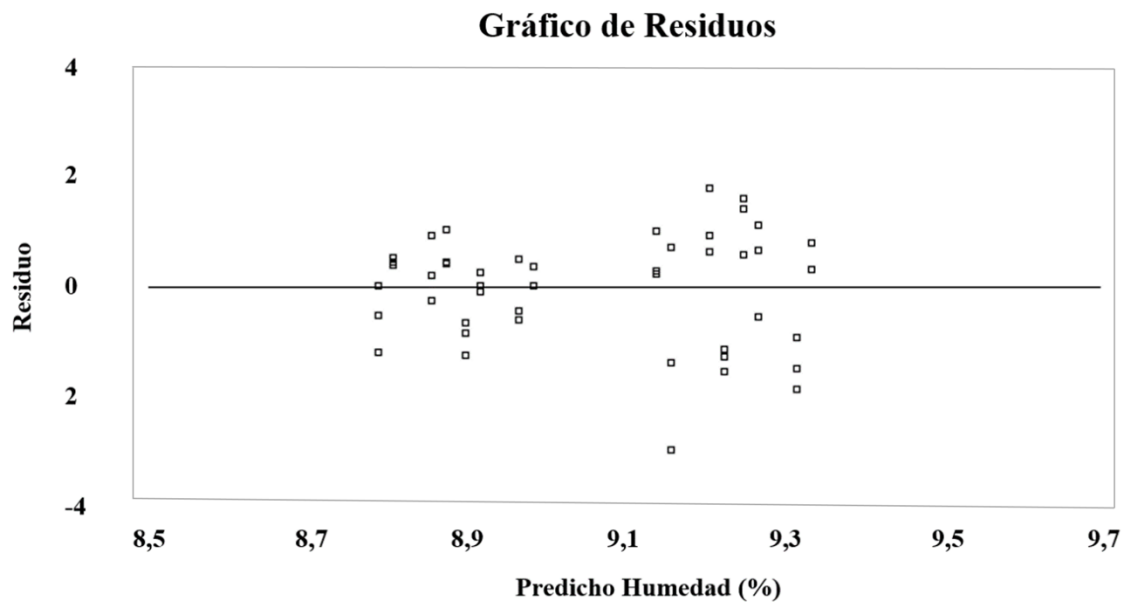


Figura 5.11 Gráfico de Residuos

Como se puede observar en la figura 5.11 los puntos se distribuyen de manera aleatoria sobre la banda horizontal, esto es señal que cumple el supuesto de los tratamientos tiene igual varianza. Por el contrario, si los puntos no se distribuyen de manera aleatorio, ósea que siguen un patrón muy definido el supuesto de varianza no se cumpliría.

La última suposición denominada independencia, puede verificarse si se grafica el orden en que se colectó un dato contra el residuo correspondiente. La manera de representar la independencia es a través de la gráfica orden vs residuos como se puede observar en la figura 5.12.

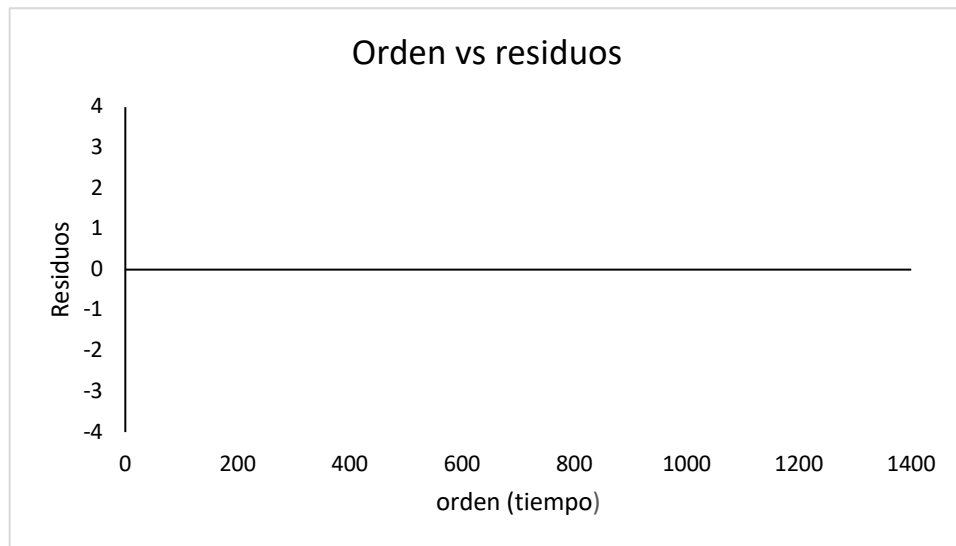


Figura 5.12 Gráfica orden vs residuos

Como se puede observar en la figura 5.12, el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de la banda horizontal, por lo que se afirma el supuesto de independencia.

5.2 Obtención del Modelo matemático a través de Statgraphics

Se realizó una regresión múltiple con los valores de la tabla B1, obteniendo la siguiente ecuación del modelo :

$$\text{Humedad (\%)} = 4,37883 + 0,0741808 * \text{sólidos (\%)} + 0,00178514 * \text{nivel de caja (\%)}$$

El estadístico de R-Cuadrado ajustado , explicaría el 70,768% de la variabilidad en la humedad. A continuación en la figura 5.13 se presenta la gráfica de superficie del modelo matemático.

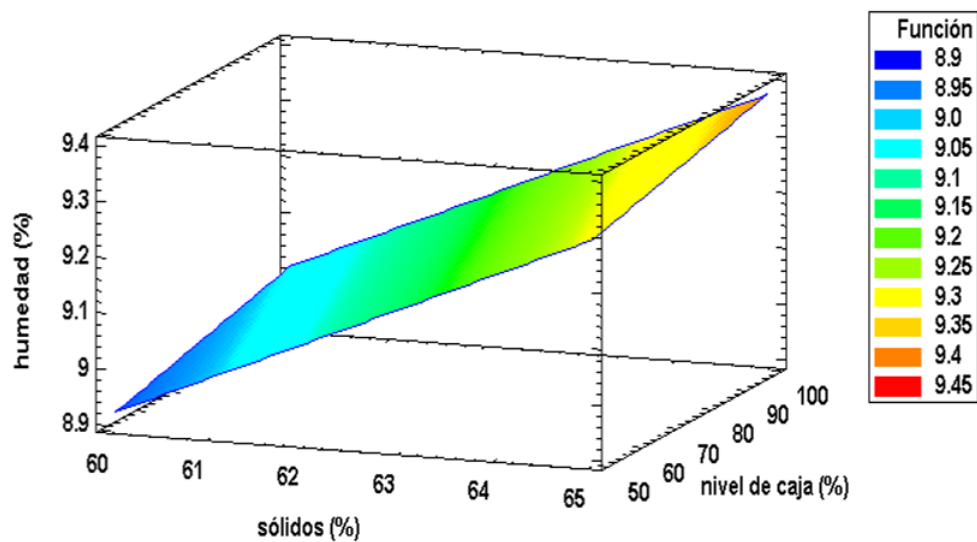


Figura 5.13 Gráfica de superficie del modelo matemático

5.3 Lógica de control e instrumentación para el área de filtrado

5.3.1 Sensorización e instrumentación unitaria actual en el filtro

Luego de la obtención del modelo que permitió establecer las variables principales del proceso además de sus rangos óptimos, posteriormente se debe conocer la sensorización e instrumentación unitaria actual de cada filtro para comprender de mejor manera las lógicas de control. En la figura 5.14 se presenta la instrumentación actual

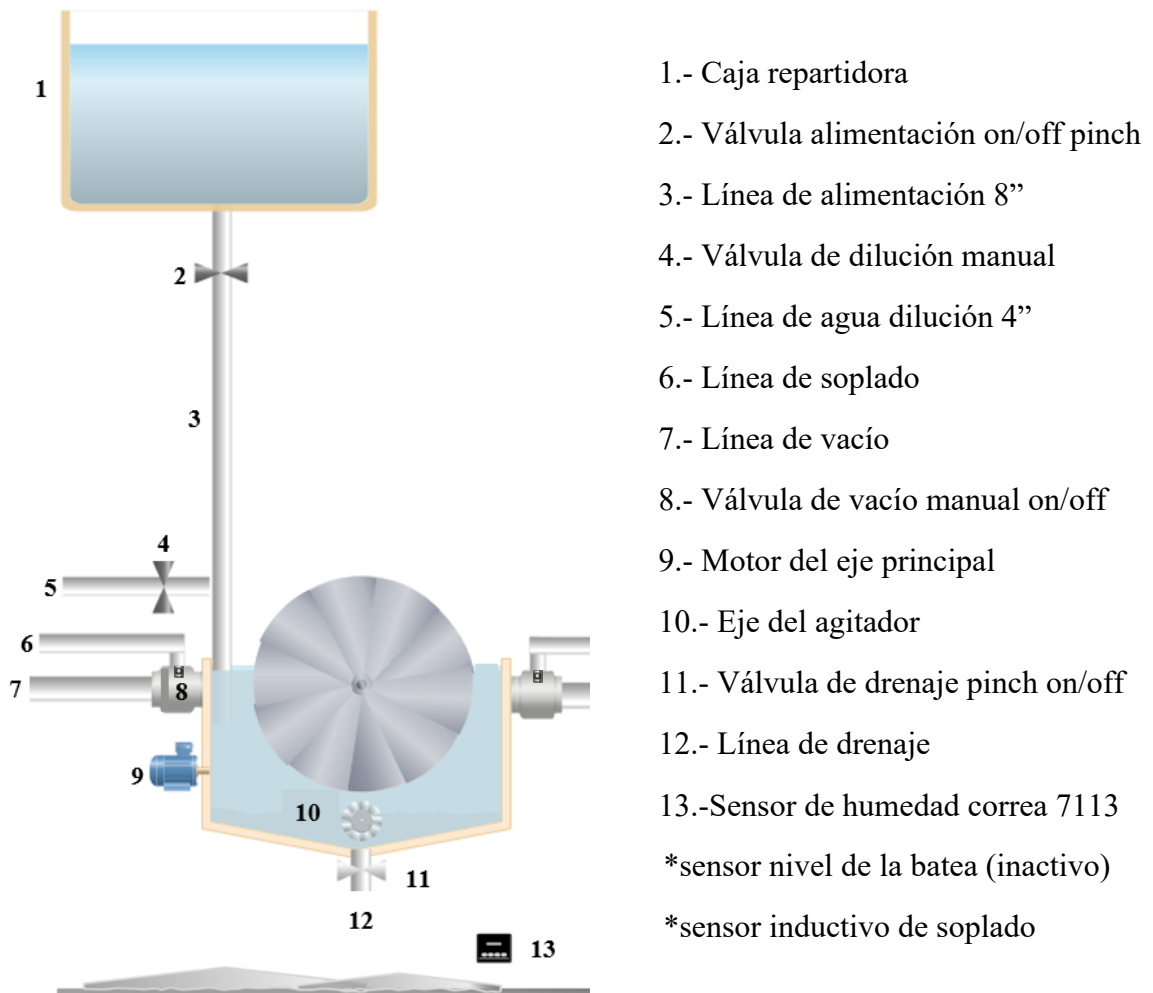


Figura 5.14 Esquema unitario de instrumentos, líneas hacia el filtro y algunos componentes

5.3.2 Nueva Implementación de sensorización e instrumentación unitaria

A continuación, se procedió a generar una lógica de control del área que incluye criterios de decisión y control, para prevenir altos valores de porcentaje de humedad en el producto de pellet feed y/o pellet producto, esto se lograría en base a la nueva implementación de instrumentación y sensorización del área. En la figura 5.15 se puede observar la nueva implementación de sensores e instrumentación en el área.

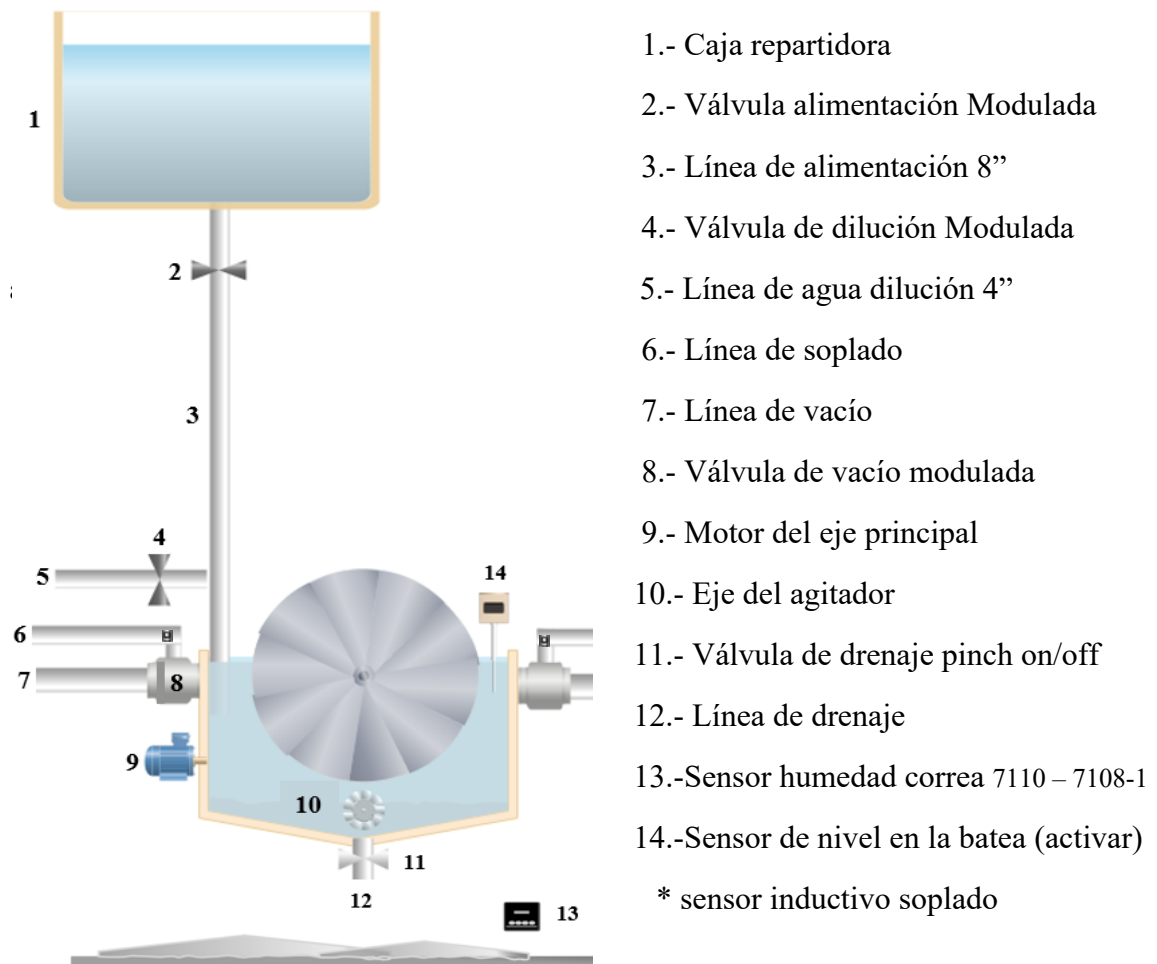


Figura 5.15 Nueva implementación de sensores e instrumentación en el área

5.3.3 Lógica de control

A continuación, se presentarán 4 lógicas de control con la implementación de sensores e instrumentación para el área, de esta manera es como debería funcionar el área de filtrado para una mayor automatización, además con esto se lograría un mayor control sobre el porcentaje de humedad de sus productos. La primera será la lógica de puesta en servicio del filtro, seguida de la lógica de control de humedad, luego se presentará la lógica de lavado de telas y para finalizar la lógica para la detención del filtro.

5.3.3.1 Lógica de secuencia de puesta en servicio de un filtro

Considerando que en el área de filtrado se pueden obtener 2 productos además de la selección de los filtros a operar, al inicio de la secuencia el operador de sala definirá:

- El filtro a operar y el producto del filtro, a continuación, se procederá a:
 - Encendido del eje agitador 3 minutos después.
 - Encendido del eje principal.

Una vez realizada estas acciones :

- Se cierra la válvula automática (on/off) de drenaje de la batea.
- Apertura de la válvula automática modular de alimentación al filtro y válvula automática modular de agua de dilución.

Una vez alcanzado el nivel L (del sensor de nivel), el cual es el nivel de la batea en donde el sector está cubierto completamente por la pulpa

- Se abre la válvula automática modulada de vacío, 10% cada 20 segundos.
- una vez abierta completamente la válvula de vacío, se activa el soplado.

Con estas acciones el filtro esta puesto en servicio. Se debe iniciar la lógica de secuencia de ajuste de operaciones para el control de humedad que se presenta a continuación.

5.3.3.1.1 Funcionamiento del sensor en la batea del filtro

A continuación, se puede observar una representación gráfica en la figura 5.16, además de una breve descripción de los distintos niveles que se pueden presentar en la batea, para comprender de mejor manera el funcionamiento del sensor.

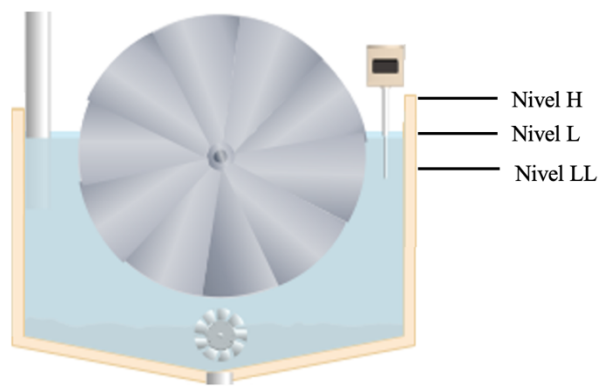


Figura 5.16 Representación gráfica de los distintos niveles en la batea

- Nivel H: es en nivel que esta sobre el nivel óptimo o nivel alto en donde se presenta el sobreflujo, en este caso el sensor debería emitir una alarma de nivel alto, para poder cambiar hacia un nivel óptimo.
- Nivel L: es el nivel óptimo, en donde el sector se cubre por completo, y seguidamente puede iniciar la apertura de la válvula de vacío.
- Nivel LL: es el nivel bajo o bajo nivel en donde el sector no logra cubrirse por completo, en este caso el sensor debería emitir una alarma de nivel bajo, ya que, si sigue trabajando con este nivel, al abrirse el vacío, este se pierde y lograría un producto muy húmedo.

5.3.3.2 Lógica de secuencia de ajustes para el control de humedad

Se deben instalar 2 sensores de humedad, uno en la correa 7110 en la cual su producto va a balling y el otro en la correa 7108-2 la cual va a pellet feed.

El operador de sala central, con el filtro en servicio podrá definir:

- Valor de la humedad (VH).

Si la humedad actual es menor al valor VH, se debe aumentar el porcentaje de humedad con las siguientes acciones:

- Aumentar 5% la velocidad del filtro cada 10 minutos.

una vez alcanzado el valor VH, se mantienen las condiciones de porcentaje de velocidad de la válvula modular y válvula de dilución.

Si la humedad sigue siendo menor al valor VH, se pasa a la siguiente acción la cual es

- Cerrar válvula modular de alimentación al 10% cada 10 minutos.

una vez alcanzado el valor VH, se mantienen las condiciones de porcentaje de velocidad de la válvula modular y válvula de dilución.

Si la humedad sigue siendo menor al valor VH, se pasa a la siguiente acción

- Cerrar válvula modular de dilución al 5% cada 8 minutos.

Una vez alcanzado el valor VH, se mantienen las condiciones de porcentaje de velocidad de la válvula modular y válvula de dilución.

Si la humedad sigue siendo menor al valor VH

- Se deben revisar los parámetros de calidad como por ejemplo la granulometría de molienda.

Si la humedad actual es mayor al valor VH, se debe disminuir el porcentaje de humedad con las siguientes acciones:

- disminuir 5% la velocidad del filtro cada 10 minutos.

Una vez alcanzado el valor VH, se mantienen las condiciones de porcentaje de velocidad de la válvula modular y válvula de dilución.

Si la humedad sigue siendo mayor al valor VH

- Abrir la válvula modular de alimentación 10% cada 10 minutos.

Una vez alcanzado el valor VH, se mantienen las condiciones de la válvula modular y válvula de dilución.

Si la humedad sigue siendo mayor al valor VH

- Abrir la válvula de dilución en 10% cada 10 minutos.

una vez alcanzado el valor VH, se mantienen las condiciones de la válvula modular y válvula de dilución.

Si la humedad sigue siendo mayor al valor VH

- Se deben revisar los parámetros de calidad como por ejemplo la granulometría de molienda.

5.3.3.3 Lógica del lavado de telas

- Cierre total de la válvula modulada de alimentación y la válvula modulada de agua de dilución.
- Cerrar la válvula automática modulada de vacío, 20% cada 20 segundos, luego de estar completamente cerrada la válvula de vacío.
- Desactivar el soplado, luego de 10 segundos.
- Abrir válvula automática de drenaje.
- Luego de 10 minutos, Activar la regadera, el operador tendrá la opción de colocar el tiempo y la frecuencia para el lavado.
- Activar el soplado por 5 minutos.

5.3.3.4 Lógica de detención del filtro

- Cierre total de las válvulas moduladas de alimentación y de agua de dilución.
- Apertura de válvula automática on/off de drenaje de batea.
- Cerrar la válvula automática modulada de vacío, 20% cada 20 segundos, luego de estar completamente cerrada la válvula de vacío.
- Desactivar el soplado, luego de 10 segundos.
- Detención del eje del motor luego de 2 minutos.
- Detención del eje agitador luego de 3 minutos.

5.4 instrumentación y sensores que se deben incorporar para la correcta lógica de control

A continuación se presenta la tabla 5.17 los instrumentos y sensores que se deberían incorporar en el área.

INSTRUMENTO	APLICACIÓN	CANTIDAD
Válvula automática modulada 8"	Alimentación	7
Válvula automática modulada 4"	Agua dilución	7
Válvula automática modulada	Vacío	14
Activar Sensor de nivel	Bateas	2
Sensor de humedad	Correas	2

Tabla 5.17 Instrumentos y sensores que se deberían incorporar en el área.

En el caso de las válvulas automáticas moduladas estas deben ser instaladas en las líneas de alimentación. Las válvulas automáticas moduladas en las líneas de agua de dilución. En el caso de los 7 sensores de nivel inactivos en el área, estos son del tipo ultrasónico, el cual funciona a través de ondas de sonidos (de alta frecuencia inaudibles para el oído humano) y se espera que la onda luego de ser emitida rebote en algún objeto regresando al mismo sensor. Estos 7 sensores deben activarse, además de ubicar alguno de ellos en la correcta posición, la cual es lo más centrada sobre la batea. En el caso de los sensores de humedad, estos deberían ser del tipo infrarrojo, e instaladas en la correa 7110 y 7108-1.

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudiaron 4 variables las cuales fueron : porcentaje de sólidos en la batea, nivel de caja, porcentaje de velocidad del filtro y tiempo de soplado. Además se hizo variar cada uno de sus rangos simultáneamente, y luego se obtuvo su correspondiente porcentaje de humedad. Luego se estudió cómo estas influían en la humedad final del producto. Con toda la información recolectada se realizó un modelo matemático y se presentaron las lógicas de control.

6.1. Objetivo específico n°1: Identificar los tipos de variables que influyen en el proceso de filtración

Con base a los resultados obtenidos de porcentaje de humedad y su análisis estadístico. La variable con mayor influencia sobre el porcentaje de humedad fue el porcentaje de sólidos presentes en la batea, seguido del porcentaje de nivel de caja repartidora.

La validez de los resultados obtenidos en el análisis de varianza queda corroborada gracias a que los supuestos del moldeo se cumplen.

6.2. Objetivo específico n°2: Desarrollar un modelo en base a las variables controladas en los filtros de discos.

A partir de los datos obtenidos del porcentaje de humedad se determinó que el modelo matemático se ajusta en un 70,768% . El porcentaje de sólidos en la batea al ser una variable con una alta incidencia sobre el porcentaje de humedad su valor numérico fue mayor en comparación con el porcentaje de nivel de caja.

6.3. Objetivo específico n°3: Proponer una lógica de control e instrumentación para la sensorización del área de filtrado de la planta pellet

Se propuso la lógica de control en base a las variables con mayor incidencia sobre el porcentaje de humedad del queque. En este caso la variable con mayor influencia es el porcentaje de sólidos presentes en la batea, según el modelo matemático para obtener un porcentaje de humedad que varié desde 8,0% a 8,5%, el porcentaje de sólidos presentes en la batea debe ser de 58% a 61% , si se quiere un porcentaje de humedad mayor a 8,7% el porcentaje de sólidos presente en la batea debe ser mayor a 62% ,con esto se comprueba que es necesaria la implementación de una válvula modulada que se abra de 0-100% y así lograr cambios puntuales en el porcentaje de sólidos. Otra variable que incide en el porcentaje de humedad fue el porcentaje de nivel de caja, en donde con un mayor porcentaje de nivel de caja el resultado fue un mayor porcentaje de sólidos y viceversa, para poder controlar de manera unitaria el flujo que ingresa a cada batea es necesario la implementar válvulas moduladoras para que controlen cuando sea necesario el paso de la alimentación. La tercera variable es el porcentaje de velocidad, esta no incide de gran manera sobre la humedad, pero aun así se tomó en cuenta ya que desde sala de operaciones se puede manipular de manera remota.

A modo de conclusión general se ha logrado generar 4 lógica de control considerando las 3 variables mencionadas, se obtendría una automatización en la puesta en servicio, en el lavado de telas y en la detención del filtro. En cambio, con la lógica de control de humedad además de la automatización, se obtendría una menor variabilidad del proceso, con esto se lograría estabilizar el área provocando una mayor durabilidad y por ende un menor desgaste en los equipos del área.

Recomendaciones

Como la variable más influyente es el porcentaje de sólidos en la batea, se podría tener un control mucho más riguroso sobre esta variable, para lograrlo se debería implementar un densímetro nuclear en las líneas de alimentación, con esto conseguiría obtener en línea el porcentaje de sólidos que está pasando a través de la línea y con un balance de masa en el punto donde se encuentra la válvula de dilución, podría controlar de manera mucho más rigurosa el porcentaje de sólidos que se encuentra en la batea. Además, serviría como aviso cuando alguna de las líneas de alimentación se embanque, ya que cuando esto ocurre, la batea se llena solo de agua.

El agua de dilución utilizada para diluir el porcentaje de sólidos es agua de proceso específicamente proviene del sobreflujo de los espesadores, cuando el material es de baja calidad viene con alto contenido de sílice, y como el agua es recirculada (también contiene una cantidad de sílice) se tapan de manera mucho más rápido los entramados de las telas en los sectores provocando que el queque obtenga mayor humedad, además de un menor rendimiento ya que el periodo para lavar los sectores se alarga y además aumenta su frecuencia. Una solución para prevenir este problema es un by-pass que envíe agua desde el espesador 1 a las líneas de agua de dilución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- R, A. (1996). *Manual de operación área de filtrado*.
- Minero, C. (2022). *CMP*. Obtenido de Consejo Minero :
<https://consejominero.cl/nosotros/socios/cmp/>
- CMP. (2018). *Planata de Pellets*. Obtenido de CMP:
<https://www.cmp.cl/capmineria/site/edic/base/port/operaciones.html>
- CMP. (2018). *Operaciones y Productos*. Obtenido de CMP:
<https://www.cmp.cl/capmineria/site/edic/base/port/operaciones.html>
- Concha, F. (s.f.). *Manual de filtración*. Obtenido de academia:
https://www.academia.edu/11466933/Manual_de_Filtracion_Fernando_Concha
- Lohner, T. A. (2004). *Retrofitting de discos a vacío Brasfelt*.
- Gutiérrez, H. . (2008). *Análisis de experimentos*.
- Cervantes, A. m. (2022). *Zaragoza*. Obtenido de <https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/ecocuan/statgraphics.pdf>
- Arturo Ruiz, F. R. (2009). *cortland*. Obtenido de cortland.edu:
<https://web.cortland.edu/matresearch/ANOVA-I.pdf>
- MAVAINSA. (19 de Octubre de 2022). Obtenido de Mavainsa:
https://mavainsa.com/pdfs/5_valvulas.pdf
- Copyright. (2012). Obtenido de 911 Metallurgist:
<https://www.911metallurgist.com/metallurgia/filtro-a-vacio-de-discos/>
- Micronics Engineered Filtration Group, Inc. (2022). *Micronics*. Obtenido de
<https://www.micronicsinc.com/es/filtration-news/rotary-vacuum-disc-filter-basics/>
- Bao, S. F. (Julio de 2020). *Diseño de experimentos : Diseño Factorial*. Obtenido de
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1
- Ferré, J. (s.f.). *El Diseño Factorial Completo*. Obtenido de
<http://www.quimica.urv.es/quimio/general/doecast.pdf>
- CMP. (2022). Budget Producción Planta Pellets.
- Tapia, A. E. (2019). *Evaluación técnica de alternativas de adecuación de los circuitos de molienda/clasificación y concentración magnética para optimizar la capacidad de Planta de Pellets Huasco CAP Minería*.

Statgraphics. (2017). *Statgraphics.net*. Obtenido de <https://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/Grafico%20de%20Probabilidad%20Normal.pdf>

Academia. (2022). *Academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/35990461/Sensor_de_nivel

CMP. (2021). *Memoria integrada 2021*. Obtenido de https://www.cmp.cl/capmineria/site/artic/20181002/asocfile/20181002104256/memoria_integrada_cmp_2021_optimizado.pdf

(s.f.). Obtenido de https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/14084/mod_resource/content/0/instrumentosnivel.pdf

ANEXOS

ANEXOS A

**TABLAS Y CALCULOS PARA OBTENER LAS VARIABLES MAS
INFLUYENTES**

En la tabla A1 matriz diseño factorial se observa que se utilizó la nomenclatura A para representar el porcentaje de sólidos en la batea, la letra B para indicar el porcentaje de velocidad del filtro, la letra C para indica el nivel de la caja, la letra D para indicar el tiempo de soplado y R son las respuestas medidas.

Combinación	A	B	C	D	Humedad(%)
1	-	-	-	-	Respuesta 1
A	+	-	-	-	Respuesta 2
B	-	+	-	-	Respuesta 3
C	-	-	+	-	Respuesta 4
D	-	-	-	+	Respuesta 5
AB	+	+	-	-	Respuesta 6
AC	+	-	+	-	Respuesta 7
AD	+	-	-	+	Respuesta 8
BC	-	+	+	-	Respuesta 9
BD	-	+	-	+	Respuesta 10
CD	-	-	+	+	Respuesta 11
ABC	+	+	+	-	Respuesta 12
BCD	-	+	+	+	Respuesta 13
ACD	+	-	+	+	Respuesta 14
ABD	+	+	-	+	Respuesta 15
ABCD	+	+	+	+	Respuesta 16

Tabla A1. Matriz diseño factorial

A continuación se presenta la tabla de signos del diseño factorial en la tabla A2.

Efecto factorial	Combinación de factores														
	A Sólidos(%)	B Velocidad(%)	C Nivel Caja (%)	D Tiempo de soplado(seg)	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	BCD	ACD	ABD	ABCD
I	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
A	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-
B	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
C	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	-
D	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
AB	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+
AC	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
AD	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+
BC	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+
BD	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
CD	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+
ABC	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
BCD	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-
ACD	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
ABD	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	+	-
ABCD	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Tabla A2. Tabla de signos del diseño factorial

A continuación se observa la tabla A3 la cual entrega los resultados de humedad y sus respectivas replicas

Humedad (%)	Sólidos (%)	Velocidad (%)	Nivel caja (%)	Tiempo de soplado(segundos)
8,79	60	80	50	0,7
8,54	60	80	50	0,7
8,68	60	80	50	0,7
9,35	65	80	50	0,7
9,2	65	80	50	0,7
9,19	65	80	50	0,7
8,9	60	100	50	0,7
8,8	60	100	50	0,7
9,05	60	100	50	0,7
8,72	60	80	100	0,7
8,76	60	80	100	0,7
8,64	60	80	100	0,7
8,92	60	80	50	1,2
8,89	60	80	50	1,2
8,9	60	80	50	1,2
9,57	65	100	50	0,7
9,34	65	100	50	0,7
9,4	65	100	50	0,7
9,58	65	80	100	0,7
9,54	65	80	100	0,7
9,37	65	80	100	0,7
8,59	65	80	50	1,2
8,87	65	80	50	1,2
9,31	65	80	50	1,2
9,07	60	100	100	0,7
8,84	60	100	100	0,7
8,87	60	100	100	0,7
8,97	60	100	50	1,2
8,96	60	100	50	1,2
9,09	60	100	50	1,2

Humedad (%)	Sólidos (%)	Velocidad (%)	Nivel caja (%)	Tiempo de soplado(segundos)
8,97	60	80	100	1,2
8,92	60	80	100	1,2
8,9	60	80	100	1,2
8,94	65	100	100	0,7
9,12	65	100	100	0,7
9,01	65	100	100	0,7
9,06	60	100	100	1,2
9,06	60	100	100	1,2
8,99	60	100	100	1,2

Tabla A3 Tabla de los resultados de humedad con sus respectivas réplicas

A continuación se observa la tabla A4 los valores de humedad con su respectiva replica y la suma de las réplicas.

Humedad (%)	Sólidos (%)	Velocidad (%)	Nivel caja (%)	Tiempo de soplado(s)	Suma réplicas	Combinación
8,79	60	80	50	0,7	26,01	I
8,54	60	80	50	0,7		
8,68	60	80	50	0,7		
9,35	65	80	50	0,7	27,74	A
9,20	65	80	50	0,7		
9,19	65	80	50	0,7		
8,90	60	100	50	0,7	26,75	B
8,80	60	100	50	0,7		
9,05	60	100	50	0,7		
8,72	60	80	100	0,7	26,12	C
8,76	60	80	100	0,7		
8,64	60	80	100	0,7		
8,92	60	80	50	1,2	26,71	D
8,89	60	80	50	1,2		
8,90	60	80	50	1,2		
9,57	65	100	50	0,7	28,31	AB
9,34	65	100	50	0,7		
9,40	65	100	50	0,7		
9,58	65	80	100	0,7	28,49	AC
9,54	65	80	100	0,7		
9,37	65	80	100	0,7		
8,59	65	80	50	1,2	26,77	AD
8,87	65	80	50	1,2		
9,31	65	80	50	1,2		
9,07	60	100	100	0,7	26,78	BC
8,84	60	100	100	0,7		
8,87	60	100	100	0,7		
8,97	60	100	50	1,2	27,02	BD
8,96	60	100	50	1,2		
9,09	60	100	50	1,2		
8,97	60	80	100	1,2	26,79	CD
8,92	60	80	100	1,2		
8,90	60	80	100	1,2		

Humedad (%)	Sólidos (%)	Velocidad (%)	Nivel caja (%)	Tiempo de soplado(seg)	Suma replicas	Combinación
8,94	65	100	100	0,7	27,07	ABC
9,12	65	100	100	0,7		
9,01	65	100	100	0,7		
9,06	60	100	100	1,2	27,11	BCD
9,06	60	100	100	1,2		
8,99	60	100	100	1,2		
9,5	65	80	100	1,2	28,06	ACD
9,15	65	80	100	1,2		
9,41	65	80	100	1,2		
8,91	65	100	50	1,2	26,86	ABD
8,99	65	100	50	1,2		
8,96	65	100	50	1,2		
9,50	65	100	100	1,2	28,40	ABCD
9,40	65	100	100	1,2		
9,50	65	100	100	1,2		

Tabla A4. Tabla valores de humedad con su respectiva replica y la suma de las réplicas

Cálculo para obtener los contrastes a partir de la tabla A2 y tabla A4

$$\text{Contraste A} = -I + a - b - c - d + ab + ac + ad - bc - bd - cd + abc - bcd + acd + abd + abcd$$

$$\text{Contraste A} = -26,01 + 27,74 - 26,75 - 26,12 - 26,71 + 28,31 + 28,49 + 26,77 - 26,78 - 27,02 - 26,79 + 27,07 - 27,11 + 28,06 + 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste A} = 8,41$$

$$\text{Contraste B} = -I - a + b - se - d + ab - ac - ad + bc + bd - cd + abc + bcd - acd + abd + abcd$$

$$\text{Contraste B} = -26,01 - 27,74 + 26,75 - 26,12 - 26,71 + 28,31 - 28,49 - 26,77 + 26,78 + 27,02 - 26,79 + 27,07 + 27,11 - 28,06 + 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste B} = 1,61$$

$$\text{Contraste C} = -I - a - b + c - d - ab + ac - ad + bc - bd + cd + abc + bcd + acd - abd + abcd$$

$$\text{Contraste C} = -26,01 - 27,74 - 26,75 + 26,12 - 26,71 - 28,31 + 28,49 - 26,77 + 26,78 - 27,02 + 26,79 + 27,07 + 27,11 + 28,06 - 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste C} = 2,65$$

$$\text{Contraste D} = -I - a - b - c + d - ab - ac + ad - bc + bd + cd - abc + bcd + acd + abd + abcd$$

$$\text{Contraste D} = -26,01 - 27,74 - 26,75 - 26,12 + 26,71 - 28,31 - 28,49 + 26,77 - 26,78 + 27,02 + 26,79 - 27,07 + 27,11 + 28,06 + 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste D} = 0,45$$

Contraste AB

$$= +I - a - b + c + d + ab - ac - ad - bc - bd + cd + abc - bcd - acd + abd + abcd$$

Contraste AB

$$= +26,01 - 27,74 - 26,75 + 26,12 + 26,71 + 28,31 - 28,49 - 26,77 \\ - 26,78 - 27,02 + 26,79 + 27,07 - 27,11 - 28,06 + 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste AB} = -2,45$$

Contraste AC

$$= +I - a + b - c + d - ab + ac - ad - bc + bd - cd + abc - bcd \\ + acd - abd + abcd$$

$$\text{Contraste AC} = +26,01 - 27,74 + 26,75 - 26,12 + 26,71 - 28,31 + 28,49 \\ - 26,77 - 26,78 + 27,02 - 26,79 + 27,07 - 27,11 + 28,06 - 26,86 \\ + 28,40$$

$$\text{Contraste AC} = 2,03$$

Contraste AD

$$= +I - a + b + c - d - ab - ac + ad + bc - bd - cd - abc - bcd \\ + acd + abd + abcd$$

Contraste AD

$$= +26,01 - 27,74 + 26,75 + 26,12 - 26,71 - 28,31 - 28,49 + 26,77 \\ + 26,78 - 27,02 - 26,79 - 27,07 - 27,11 + 28,06 + 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste AD} = -3,49$$

Contraste BC

$$= +I + a - b - c + d - ab - ac + ad + bc - bd - cd + abc + bcd \\ - acd - abd + abcd$$

Contraste BC

$$= +26,01 + 27,74 - 26,75 - 26,12 + 26,71 - 28,31 - 28,49 + 26,77 \\ + 26,78 - 27,02 - 26,79 + 27,07 + 27,11 - 28,06 - 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste BC} = -1,81$$

Contraste BD

$$= +I + a - b + c - d - ab + ac - ad - bc + bd - cd - abc + bcd \\ - acd + abd + abcd$$

Contraste BD

$$= +26,01 + 27,74 - 26,75 + 26,12 - 26,71 - 28,31 + 28,49 - 26,77 \\ - 26,78 + 27,02 - 26,79 - 27,07 + 27,11 - 28,06 + 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste BD} = 0,51$$

Contraste CD

$$= +I + a + b - c - d + ab - ac - ad - bc - bd + cd - abc + bcd \\ + acd - abd + abcd$$

Contraste CD

$$= +26,01 + 27,74 + 26,75 - 26,12 - 26,71 + 28,31 - 28,49 - 26,77 \\ - 26,78 - 27,02 + 26,79 - 27,07 + 27,11 + 28,06 - 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste CD} = 3,35$$

Contraste ABC

$$= -I + a + b + c - d - ab - ac + ad - bc + bd + cd + abc - bcd \\ - acd - abd + abcd$$

Contraste ABC

$$= -26,01 + 27,74 + 26,75 + 26,12 - 26,71 - 28,31 - 28,49 + 26,77 \\ - 26,78 + 27,02 + 26,79 + 27,07 - 27,11 - 28,06 - 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste ABC} = -1,67$$

Contraste BCD

$$= -I - a + b + c + d + ab + ac + ad - bc - bd - cd - abc + bcd \\ - acd - abd + abcd$$

Contraste BCD

$$= -26,01 - 27,74 + 26,75 + 26,12 + 26,71 + 28,31 + 28,49 + 26,77 \\ - 26,78 - 27,02 - 26,79 - 27,07 + 27,11 - 28,06 - 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste BCD} = 2,33$$

Contraste ACD

$$= -I + a - b + c + d + ab - ac - ad + bc + bd - cd - abc - bcd \\ + acd - abd + abcd$$

Contraste ACD

$$= -26,01 + 27,74 - 26,75 + 26,12 + 26,71 + 28,31 - 28,49 - 26,77 \\ + 26,78 + 27,02 - 26,79 - 27,07 - 27,11 + 28,06 - 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste ACD} = 3,29$$

Contraste ABD

$$= -I + a + b - c + d - ab + ac - ad + bc - bd + cd - abc - bcd \\ - acd + abd + abcd$$

Contraste ABD

$$= -26,01 + 27,74 + 26,75 - 26,12 + 26,71 - 28,31 + 28,49 - 26,77 \\ + 26,78 - 27,02 + 26,79 - 27,07 - 27,11 - 28,06 + 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste ABD} = 2,05$$

Contraste ABCD

$$= +I - a - b - c - d + ab + ac + ad + bc + bd + cd - abc - bcd \\ - acd - abd + abcd$$

Contraste ABCD

$$= +26,01 - 27,74 - 26,75 - 26,12 - 26,71 + 28,31 + 28,49 + 26,77 \\ + 26,78 + 27,02 + 26,79 - 27,07 - 27,11 - 28,06 - 26,86 + 28,40$$

$$\text{Contraste ABCD} = 2,15$$

Variables	Valor de contrastes
A	8,41
B	1,61
C	2,65
D	0,45
AB	-2,45
AC	2,03
AD	-3,49
BC	-1,81
BD	0,51
CD	3,35
ABC	-1,67

BCD	2,33
ACD	3,29
ABD	2,05
ABCD	2,15

Tabla A5. Valores de contrastes

Cálculo de estimación de los efectos

$$EfectoABC \dots K = \frac{1}{n2^{k-1}} [contraste ABC \dots K] \quad (3.1)$$

n: replicas k: factores

Ejemplo calculo estimación efecto A, sustituyendo los valores en la ecuación 3.1 se obtiene los siguiente :

$$Efecto A = \frac{1}{3 * 2^{4-1}} [Contraste A]$$

n: 3 k: 4

$$Efecto A = \frac{1}{3 * 2^3} [Contraste A]$$

$$Efecto A = \frac{1}{24} [Contraste A]$$

$$Efecto A = \frac{1}{24} [Contraste A] = \frac{1}{24} [8,41] = 0,350$$

$$Efecto B = \frac{1}{24} [Contraste B] = \frac{1}{24} [1,61] = 0,067$$

$$Efecto C = \frac{1}{24} [Contraste C] = \frac{1}{24} [2,65] = 0,110$$

$$Efecto D = \frac{1}{24} [Contraste D] = \frac{1}{24} [0,45] = 0,018$$

$$Efecto AB = \frac{1}{24} [Contraste AB] = \frac{1}{24} [-2,45] = -0,102$$

$$Efecto AC = \frac{1}{24} [Contraste AC] = \frac{1}{24} [2,03] = 0,084$$

$$Efecto AD = \frac{1}{24} [Contraste AD] = \frac{1}{24} [-3,49] = -0,145$$

$$Efecto BC = \frac{1}{24} [Contraste BC] = \frac{1}{24} [-1,81] = -0,075$$

$$Efecto BD = \frac{1}{24} [Contraste BD] = \frac{1}{24} [0,51] = 0,021$$

$$Efecto CD = \frac{1}{24} [Contraste CD] = \frac{1}{24} [3,35] = 0,139$$

$$Efecto ABC = \frac{1}{24} [Contraste ABC] = \frac{1}{24} [-1,67] = -0,069$$

$$Efecto BCD = \frac{1}{24} [Contraste BCD] = \frac{1}{24} [2,33] = 0,097$$

$$Efecto ACD = \frac{1}{24} [Contraste ACD] = \frac{1}{24} [3,29] = 0,137$$

$$Efecto ABD = \frac{1}{24} [Contraste ABD] = \frac{1}{24} [2,05] = 0,085$$

$$Efecto ABCD = \frac{1}{24} [Contraste ABCD] = \frac{1}{24} [2,15] = 0,089$$

A continuación se observa en la tabla A6 una tabla resumen de los valores de los efectos.

Variables	Valor de efectos
A	0,350
B	0,067
C	0,11
D	0,018
AB	-0,102
AC	0,084
AD	-0,145
BC	-0,075
BD	0,021
CD	0,139
ABC	-0,069
BCD	0,097
ACD	0,137
ABD	0,085
ABCD	0,089

Tabla A6. Tabla resumen valores de efectos

Análisis de varianza

Cálculo de la suma de cuadrados(SC) de los efectos calculada a partir de sus contrastes

$$SC_{AB\dots k} = \frac{1}{n2^k} [\text{contraste } ABC \dots k]^2 \quad (3.2)$$

n: replicas k: factores

Ejemplo cálculo de la suma de cuadrados de la variable A (SC_A), sustituyendo sus valores en la ecuación 3.2, se obtiene lo siguiente

$$SC_A = \frac{1}{n2^k} [\text{contraste } A]^2$$

$n: 3 \quad k: 4$

$$SC_A = \frac{1}{3 * 2^4} [\text{contraste } A]^2$$

$$SC_A = \frac{1}{48} [\text{contraste } A]^2$$

$$SC_A = \frac{1}{48} [\text{contraste } A]^2 = \frac{1}{48} [8,41]^2 = 1,473$$

$$SC_B = \frac{1}{48} [\text{contraste } B]^2 = \frac{1}{48} [1,61]^2 = 0,054$$

$$SC_C = \frac{1}{48} [\text{contraste } C]^2 = \frac{1}{48} [2,65]^2 = 0,146$$

$$SC_D = \frac{1}{48} [\text{contraste } D]^2 = \frac{1}{48} [0,45]^2 = 0,004$$

$$SC_{AB} = \frac{1}{48} [\text{contraste } AB]^2 = \frac{1}{48} [-2,45]^2 = 0,125$$

$$SC_{AC} = \frac{1}{48} [\text{contraste } AC]^2 = \frac{1}{48} [2,03]^2 = 0,085$$

$$SC_{AD} = \frac{1}{48} [\text{contraste } AD]^2 = \frac{1}{48} [-3,49]^2 = 0,253$$

$$SC_{BC} = \frac{1}{48} [\text{contraste } BC]^2 = \frac{1}{48} [-1,81]^2 = 0,068$$

$$SC_{BD} = \frac{1}{48} [\text{contraste } BD]^2 = \frac{1}{48} [0,51]^2 = 0,005$$

$$SC_{CD} = \frac{1}{48} [\text{contraste } CD]^2 = \frac{1}{48} [3,35]^2 = 0,233$$

$$SC_{ABC} = \frac{1}{48} [\text{contraste } ABC]^2 = \frac{1}{48} [-1,67]^2 = 0,058$$

$$SC_{BCD} = \frac{1}{48} [\text{contraste } BCD]^2 = \frac{1}{48} [2,33]^2 = 0,113$$

$$SC_{ACD} = \frac{1}{48} [\text{contraste } ACD]^2 = \frac{1}{48} [3,29]^2 = 0,225$$

$$SC_{ABD} = \frac{1}{48} [\text{contraste } ABD]^2 = \frac{1}{48} [2,05]^2 = 0,087$$

$$SC_{ABCD} = \frac{1}{48} [\text{contraste } ABCD]^2 = \frac{1}{48} [2,15]^2 = 0,096$$

A continuación se presenta la tabla A7 la cual es un resumen de los valores de análisis de varianza.

Suma de cuadrados (SC)	Valor
SC _A	1,473
SC _B	0,054
SC _C	0,146
SC _D	0,004
SC _{AB}	0,125
SC _{AC}	0,085
SC _{AD}	0,253
SC _{BC}	0,068
SC _{BD}	0,005
SC _{CD}	0,233
SC _{ABC}	0,058
SC _{BCD}	0,113
SC _{ACD}	0,225
SC _{ABD}	0,087
SC _{ABCD}	0,096
SC _E	0,549

Tabla A7. Resumen de los valores de análisis de varianza

Aplicación de ANOVA del diseño factorial

Cálculo de la suma de cuadrados totales SC_T en el diseño factorial

$$SC_T = \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 - \frac{Y^2}{n2^k} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 &= 8,792 + 8,542 + 8,682 + 9,352 + 9,202 + 9,192 + 8,902 \\ &+ 8,802 + 9,052 + 8,722 + 8,762 + 8,642 + 8,922 + 8,892 \\ &+ 8,902 + 9,572 + 9,342 + 9,402 + 9,582 + 9,542 + 9,372 \\ &+ 8,592 + 8,872 + 9,312 + 9,072 + 8,842 + 8,872 + 8,972 \\ &+ 8,962 + 9,092 + 8,972 + 8,922 + 8,902 + 8,942 + 9,122 \\ &+ 9,012 + 9,062 + 9,062 + 8,992 + 9,502 + 9,152 + 9,412 \\ &+ 8,912 + 8,992 + 8,962 + 9,502 + 9,402 + 9,502 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 = 3945,5809$$

$$\begin{aligned} Y^2 &= (8,79 + 8,54 + 8,68 + 9,35 + 9,20 + 9,19 + 8,90 + 8,80 + 9,05 + \\ &8,72 + 8,76 + 8,64 + 8,92 + 8,89 + 8,90 + 9,57 + 9,34 + 9,40 + 9,58 + \\ &9,54 + 9,37 + 8,59 + 8,87 + 9,31 + 9,07 + 8,84 + 8,87 + 8,97 + 8,96 + \\ &9,09 + 8,97 + 8,92 + 8,90 + 8,94 + 9,12 + 9,01 + 9,06 + 9,06 + 8,99 + \\ &9,50 + 9,15 + 9,41 + 8,91 + 8,99 + 8,96 + 9,50 + 9,40 + 9,50)^2 \end{aligned}$$

$$Y^2 = 189216,30$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 3.3, se obtiene lo siguiente

$$SC_T = \sum_{i=1}^{n2^k} Y_i^2 - \frac{Y^2}{n2^k}$$

$$SC_T = 3945,5809 - \frac{189216,30}{3 * 2^4}$$

$$SC_T = 3,57465$$

Cálculo de la suma de cuadrados del error (SC_E)

$$SC_E = SC_T - (SC_A + SC_B + SC_C + SC_D + SC_{AB} + SC_{AC} + SC_{AD} + SC_{BC} + SC_{BD} + SC_{CD} + SC_{ABC} + SC_{BCD} + SC_{ACD} + SC_{ABD} + SC_{ABCD}) \quad (3.4)$$

Remplazando en la ecuación 3.4, se obtiene lo siguiente

$$SC_E = 3,57465 - (1,473 + 0,054 + 0,146 + 0,004 + 0,125 + 0,085 + 0,253 + 0,068 + 0,005 + 0,233 + 0,058 + 0,113 + 0,225 + 0,087 + 0,096)$$

$$SC_E = 3,57465 - 3,025$$

$$SC_E = 0,54965$$

Cálculo de varianza de cuadrados medios(MC)

$$\text{varianza de cuadrados medios}(MC) = \frac{\text{suma de cuadrados}(SC)}{\text{grados de libertad}(GL)} \quad (3.5)$$

Ejemplo de cálculo de varianza de cuadrados medios para variable A (MC_A), reemplazando los valores se obtiene lo siguiente

$$\text{varianza de cuadrados medios}(MC_A) = \frac{\text{suma de cuadrados}(SC_A)}{\text{grados de libertad}(GL_A)}$$

$$\text{varianza de cuadrados medios}(MC_A) = \frac{1,473}{1}$$

$$MC_A = \frac{SC_A}{GL_A} = \frac{1,473}{1} = 1,473$$

$$MC_B = \frac{SC_B}{GL_B} = \frac{0,054}{1} = 0,054$$

$$MC_C = \frac{SC_C}{GL_C} = \frac{0,146}{1} = 0,146$$

$$MC_D = \frac{SC_D}{GL_D} = \frac{0,004}{1} = 0,004$$

$$MC_{AB} = \frac{SC_{AB}}{GL_{AB}} = \frac{0,125}{1} = 0,125$$

$$MC_{AC} = \frac{SC_{AC}}{GL_{AC}} = \frac{0,085}{1} = 0,085$$

$$MC_{AD} = \frac{SC_{AD}}{GL_{AD}} = \frac{0,253}{1} = 0,253$$

$$MC_{BC} = \frac{SC_{BC}}{GL_{BC}} = \frac{0,068}{1} = 0,068$$

$$MC_{BD} = \frac{SC_{BD}}{GL_{BD}} = \frac{0,005}{1} = 0,005$$

$$MC_{CD} = \frac{SC_{CD}}{GL_{CD}} = \frac{0,233}{1} = 0,233$$

$$MC_{ABC} = \frac{SC_{ABC}}{GL_{ABC}} = \frac{0,058}{1} = 0,058$$

$$MC_{BCD} = \frac{SC_{BCD}}{GL_{BCD}} = \frac{0,113}{1} = 0,113$$

$$MC_{ACD} = \frac{SC_{ACD}}{GL_{ACD}} = \frac{0,225}{1} = 0,225$$

$$MC_{ABD} = \frac{SC_{ABD}}{GL_{ABD}} = \frac{0,087}{1} = 0,087$$

$$MC_{ABCD} = \frac{SC_{ABCD}}{GL_{ABCD}} = \frac{0,096}{1} = 0,096$$

$$MC_E = \frac{SC_E}{GL_E}$$

$$SC_E = 0,54965$$

$$GL_E = ((n * 2^k) - 1) - (GL_A + GL_B + GL_C + GL_D + GL_{AB} + GL_{AC} + GL_{AD} + GL_{BC} + GL_{BD} + GL_{CD} + GL_{ABC} + GL_{BCD} + GL_{ACD} + GL_{ABD} + GL_{ABCD})$$

$$= (3 * 2^4 - 1) - (1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1)$$

$$= (47) - (15)$$

$$GL_E = 32$$

$$MC_E = \frac{SC_E}{GL_E} = \frac{0,54965}{32} = 0,017$$

Cálculo del estadístico de prueba (F_0)

$$F_0 = \frac{\text{varianza de cuadrados medios (MC)}}{\text{varianza de cuadrados medios del error (MC}_E\text{)}} \quad (3.6)$$

Ejemplo de cálculo del estadístico de prueba (F_0) para la variable A (F_{0A}), reemplazando los valores se obtiene lo siguiente

$$F_{0A} = \frac{\text{Varianza de cuadrados medios (MC}_A\text{)}}{\text{varianza de cuadrados medios del error (MC}_E\text{)}}$$

$$F_{0A} = \frac{1,473}{0,017}$$

$$F_{0A} = 86,647$$

$$F_{0A} = \frac{MC_A}{MC_E} = \frac{1,473}{0,017} = 86,647$$

$$F_{0B} = \frac{MC_B}{MC_E} = \frac{0,054}{0,017} = 3,176$$

$$F_{0C} = \frac{MC_C}{MC_E} = \frac{0,0146}{0,017} = 0,858$$

$$F_{0D} = \frac{MC_D}{MC_E} = \frac{0,004}{0,017} = 0,235$$

$$F_{0AB} = \frac{MC_{AB}}{MC_E} = \frac{0,125}{0,017} = 7,352$$

$$F_{0AC} = \frac{MC_{AC}}{MC_E} = \frac{0,085}{0,017} = 5,000$$

$$F_{0AD} = \frac{MC_{AD}}{MC_E} = \frac{0,253}{0,017} = 14,882$$

$$F_{0BC} = \frac{MC_{BC}}{MC_E} = \frac{0,068}{0,017} = 4,000$$

$$F_{0BD} = \frac{MC_{BD}}{MC_E} = \frac{0,005}{0,017} = 0,294$$

$$F_{0CD} = \frac{MC_{CD}}{MC_E} = \frac{0,233}{0,017} = 13,705$$

$$F_{0ABC} = \frac{MC_{ABC}}{MC_E} = \frac{0,058}{0,017} = 3,411$$

$$F_{0BCD} = \frac{MC_{BCD}}{MC_E} = \frac{0,113}{0,017} = 6,647$$

$$F_{0ACD} = \frac{MC_{ACD}}{MC_E} = \frac{0,225}{0,017} = 13,235$$

$$F_{0ABD} = \frac{MC_{ABD}}{MC_E} = \frac{0,087}{0,017} = 5,117$$

$$F_{0ABCD} = \frac{MC_{ABCD}}{MC_E} = \frac{0,096}{0,017} = 5,647$$

ANEXOS B

RESULTADOS PARA OBTENER EL MODELO MATEMATICO

A continuación se observa la tabla B1 la cual otorga los datos de humedad.

Humedad (%)	Sólidos (%)	Velocidad (%)	Nivel caja (%)	Tiempo de soplado(seg)
8,79	60	80	50	0,7
8,54	60	80	50	0,7
8,68	60	80	50	0,7
9,35	65	80	50	0,7
9,2	65	80	50	0,7
9,19	65	80	50	0,7
8,9	60	100	50	0,7
8,8	60	100	50	0,7
9,05	60	100	50	0,7
8,72	60	80	100	0,7
8,76	60	80	100	0,7
8,64	60	80	100	0,7
8,92	60	80	50	1,2
8,89	60	80	50	1,2
8,9	60	80	50	1,2
9,57	65	100	50	0,7
9,34	65	100	50	0,7
9,4	65	100	50	0,7
9,58	65	80	100	0,7
9,54	65	80	100	0,7
9,37	65	80	100	0,7
8,59	65	80	50	1,2
8,87	65	80	50	1,2
9,31	65	80	50	1,2
9,07	60	100	100	0,7
8,84	60	100	100	0,7
8,87	60	100	100	0,7
8,97	60	100	50	1,2
8,96	60	100	50	1,2
9,09	60	100	50	1,2
8,97	60	80	100	1,2
8,92	60	80	100	1,2
8,9	60	80	100	1,2
8,94	65	100	100	0,7
9,12	65	100	100	0,7
9,01	65	100	100	0,7
9,06	60	100	100	1,2
9,06	60	100	100	1,2
8,99	60	100	100	1,2

Humedad (%)	Sólidos (%)	Velocidad (%)	Nivel caja (%)	Tiempo de soplado(seg)
9,5	65	80	100	1,2
9,15	65	80	100	1,2
9,41	65	80	100	1,2
8,91	65	100	50	1,2
8,99	65	100	50	1,2
8,96	65	100	50	1,2
9,5	65	100	100	1,2
9,4	65	100	100	1,2
9,5	65	100	100	1,2
9,07	62	85	80	0,9
9,4	62	95	80	0,9
9,15	63	85	80	0,9
9,47	63	95	80	0,9
9,55	64	85	80	0,9
9,56	64	95	80	0,9
9,27	62	85	70	0,9
9,4	62	95	70	0,9
9,33	63	85	70	0,9
9,46	63	95	70	0,9
9,4	64	85	70	0,9
9,5	64	95	70	0,9
9,08	62	85	60	0,9
9,05	62	95	60	0,9
8,9	63	85	60	0,9
8,98	63	95	60	0,9
9	64	85	60	0,9
9,2	64	95	60	0,9
8,96	62	85	80	1
9,16	62	95	80	1
9,2	63	85	80	1
9,18	63	95	80	1
9,4	64	85	80	1
9,41	64	95	80	1
9,13	62	85	70	1
9,27	62	95	70	1
9,22	63	85	70	1
9,32	63	95	70	1

Humedad (%)	Sólidos (%)	Velocidad (%)	Nivel caja (%)	Tiempo de soplado(seg)
9,3	64	95	70	1
9,3	64	85	70	1
9,12	62	85	60	1
9,2	62	95	60	1
9,25	63	85	60	1
9,12	63	95	60	1
9,35	64	85	60	1
9,5	64	95	60	1
9,09	62	85	60	1,1
9,28	62	95	60	1,1
9,15	63	85	60	1,1
9,31	63	95	60	1,1
9,3	64	85	60	1,1
9,35	64	95	60	1,1
9,2	62	85	70	1,1
9,34	62	95	70	1,1
9,37	63	85	70	1,1
9,36	63	95	70	1,1
9,39	64	85	70	1,1
9,4	64	95	70	1,1
9	62	85	80	1,1
9,07	62	95	80	1,1
9,4	63	85	80	1,1
9,12	63	95	80	1,1
9,48	64	85	80	1,1
9,52	64	95	80	1,1

Tabla B1. Datos de humedad

A continuación se observa la tabla B2, en donde se presentan los valores de humedad.

Humedad (%)	Sólidos (%)	Nivel caja (%)
8,79	60	50
8,54	60	50
8,68	60	50
9,35	65	50
9,2	65	50
9,19	65	50
8,9	60	50
8,8	60	50
9,05	60	50
8,72	60	100
8,76	60	100
8,64	60	100
8,92	60	50
8,89	60	50
8,9	60	50
9,57	65	50
9,34	65	50
9,4	65	50
9,58	65	100
9,54	65	100
9,37	65	100
8,59	65	50
8,87	65	50
9,31	65	50
9,07	60	100
8,84	60	100
8,87	60	100
8,97	60	50
8,96	60	50
9,09	60	50
8,97	60	100
8,92	60	100
8,9	60	100
8,94	65	100
9,12	65	100
9,01	65	100
9,06	60	100
9,06	60	100
8,99	60	100

Humedad (%)	Sólidos (%)	Nivel caja (%)
9,5	65	100
9,15	65	100
9,41	65	100
8,91	65	50
8,99	65	50
8,96	65	50
9,5	65	100
9,4	65	100
9,5	65	100
9,07	62	80
9,4	62	80
9,15	63	80
9,47	63	80
9,55	64	80
9,56	64	80
9,27	62	70
9,4	62	70
9,33	63	70
9,46	63	70
9,4	64	70
9,5	64	70
9,08	62	60
9,05	62	60
8,9	63	60
8,98	63	60
9	64	60
9,2	64	60
8,96	62	80
9,16	62	80
9,2	63	80
9,18	63	80
9,4	64	80
9,41	64	80
9,13	62	70
9,27	62	70
9,22	63	70
9,32	63	70

Humedad (%)	Sólidos (%)	Nivel caja (%)
9,3	64	70
9,3	64	70
9,12	62	60
9,2	62	60
9,25	63	60
9,12	63	60
9,35	64	60
9,5	64	60
9,09	62	60
9,28	62	60
9,15	63	60
9,31	63	60
9,3	64	60
9,35	64	60
9,2	62	70
9,34	62	70
9,37	63	70
9,36	63	70
9,39	64	70
9,4	64	70
9	62	80
9,07	62	80
9,4	63	80
9,12	63	80
9,48	64	80
9,52	64	80

Tabla B2. Datos de humedad

ANEXOS C

EQUIPOS UTILIZADOS

Equipos utilizados :



Figura C1.Sonda

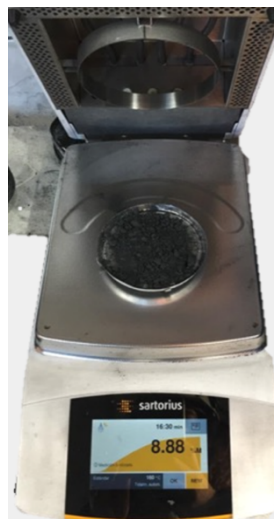


Figura C2.Pesa gravimétrica.

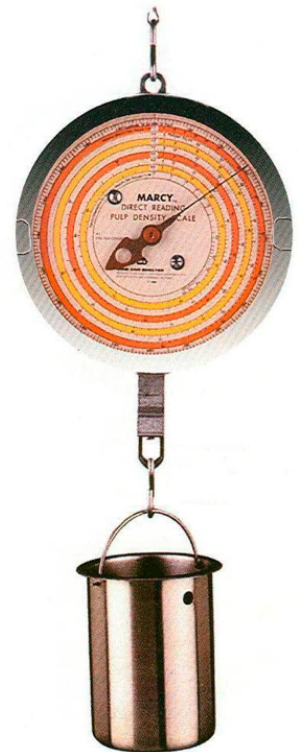


Figura C3.Balanza Marcy