



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE UN SECADOR DE CAMA
FLUIDA PARA LA CARBONATACIÓN DE BICARBONATO DE SODIO EN LA
ELABORACIÓN DE TABLETAS EFERVESCENTES**

Roswald Idabel Reyes Serrano

Asesorado por la Inga. Mónica Melissa Mazariegos Soto

Guatemala, febrero de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE UN SECADOR DE CAMA FLUIDA
PARA LA CARBONATACIÓN DE BICARBONATO DE SODIO EN LA ELABORACIÓN DE
TABLETAS EFERVESCENTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ROSWALD IDABEL REYES SERRANO

ASESORADO POR LA INGA. MÓNICA MELISSA MAZARIEGOS SOTO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

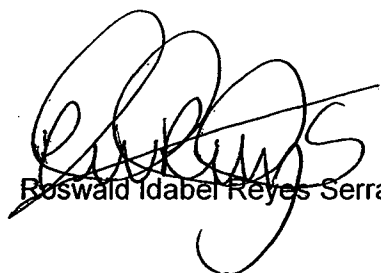
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE UN SECADOR DE CAMA FLUIDA
PARA LA CARBONATACIÓN DE BICARBONATO DE SODIO EN LA ELABORACIÓN DE
TABLETAS EFERVESCENTES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha septiembre del 2010.



Roswalo Idabel Reyes Serrano

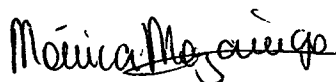
Guatemala, 02 de Agosto de 2011

Ing. Williams Álvarez
Director de Escuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

Por este medio hago constar que asesoro el trabajo de graduación del estudiante **ROSWALD IDABEL REYES SERRANO** con número de carnet **200022747**, el cual se titula **“DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE UN SECADOR DE CAMA FLUIDA PARA LA CARBONATACIÓN DE BICARBONATO DE SODIO EN LA ELABORACIÓN DE TABLETAS EFERVESCENTES”**.

Al mismo tiempo hago constar que he revisado y estoy de acuerdo con el Informe Final de Trabajo de Graduación.

Agradeciendo su atención a la presente,



Mónica Melissa Mazariegos Soto
Ingeniera Química
Col. No. 1369



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 26 de Octubre de 2011
Ref.EIQ.TG.238.2011

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG- 224-2011-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario, **Roswald Idabel Reyes Serrano**, identificado con carné No. 2000-22747, titulado: "DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE UN SECADOR DE CAMA FLUIDA PARA LA CARBONATACIÓN DE BICARBONATO DE SODIO EN LA ELABORACIÓN DE TABLETAS EFERVESCENTES", el cual ha sido asesorado por la Ingeniera Química **Mónica Melissa Mazariegos Soto**.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **REYES SERRANO**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Teresa Lisely del León Arana, M.Sc.
COORDINADORA

Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



C.c.: archivo





El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **ROSWALD IDABEL REYES SERRANO** titulado: "**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE UN SECADOR DE CAMA FLUIDA PARA LA CARBONATACIÓN DE BICARBONATO DE SODIO EN LA ELABORACIÓN DE TABLETAS EFERVESCENTES**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejia; C.Dr.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2012

Cc: Archivo
WGAM/ale

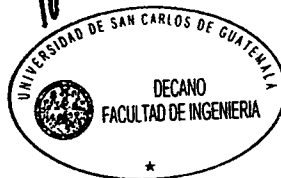


DTG. 063.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CONTROL DE UN SECADOR DE CAMA FLUIDA PARA LA CARBONATACIÓN DE BICARBONATO DE SODIO EN LA ELABORACIÓN DE TABLETAS EFERVECENTES**, presentado por el estudiante universitario **Roswald Idabel Reyes Serrano**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 8 de febrero de 2012.

/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

**Inga. Mónica Melissa Mazariegos
Soto**

Por su asesoría durante la elaboración del presente trabajo.

Mis revisores

Por su ayuda en el desarrollo del presente trabajo de graduación.

Escuela de Ingeniería Química

Por transmitirme los conocimientos necesarios para desarrollarme en el ámbito profesional.

Facultad de Ingeniería

Por permitirme vivir la experiencia de estudiar en tan distinguida facultad.

**Universidad de San Carlos de
Guatemala**

Por permitirme ser uno más de los egresados de esta casa de estudios.

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme sabiduría y entendimiento a lo largo de mi vida.
Mis padres	Héctor y Miryam, por apoyarme en todo momento, y por darme su amor incondicional.
Mis hermanos	Zedith, Isel y Leonel, por ser buenos ejemplos a seguir.
Mis sobrinos	Luz de María, Julio, Diego, Luis y María Belén, espero ser un buen ejemplo para ustedes.
Mis amigos	Por todos los buenos momentos que hemos compartido, porque de una u otra manera me ayudaron a estar acá.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Propiedades fisicoquímicas	3
2.1.1. Bicarbonato de sodio	3
2.1.2. Carbonato de sodio	4
2.2. Reacción química	4
2.3. Secador en lecho fluidizado	4
2.3.1. Fundamentos.....	5
2.3.2. Ventajas.....	6
2.3.3. Características del polvo	7
2.3.4. La cinética del secado	7
2.3.5. Secado en lecho fluido en acción	10
2.3.6. Diseño de proceso.....	12
2.3.7. Control de proceso	12
2.4. Descripción del equipo.....	13

3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	17
3.1.	Variables	17
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	20
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	20
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	20
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa	21
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	22
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	22
3.8.	Análisis estadístico	22
4.	RESULTADOS.....	27
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	31
	CONCLUSIONES.....	35
	RECOMENDACIONES	37
	BIBLIOGRAFÍA.....	39
	APÉNDICES.....	41
	ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Isotherma de secado del producto.....	8
2. Curva de secado.....	9
3. Diagrama de flujo.....	15

TABLAS

I. Descripción de variables.....	18
II. Parámetros metrológicos.....	19
III. Resumen de resultados de carbonatación.....	27
IV. Resumen estadístico.....	28
V. Límites establecidos.....	29
VI. Capacidad del proceso.....	30

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados celsius
g	Gramo
K	Kelvin
kg	Kilogramo
m	Metro
%	Porcentaje
s	Segundos

GLOSARIO

Ácido débil	Es aquel ácido que no está totalmente disociado en una disolución acuosa. Aporta iones H + al medio, pero también es capaz de aceptarlos.
Calcinación	Es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, pero por debajo de su entalpía o punto de fusión, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química.
Calefacción	Es una forma de climatización que consiste en satisfacer el equilibrio térmico cuando existe una pérdida de calor, disipada hacia el ambiente, mediante un aporte calórico que permite una temperatura ambiente confortable.
Capacidad de proceso	Determina si un proceso, con la variación normal, es capaz de satisfacer las necesidades del cliente; mide el grado en que dicho proceso cumple/incumple los requerimientos.

Carbonatación	Es una reacción química en la que el hidróxido de calcio reacciona con el dióxido de carbono y forma carbonato cálcico insoluble.
Catalizador	Es el que aumenta o disminuye la velocidad de una reacción química.
Centrifugación	Es un método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad mediante una fuerza rotativa, la cual imprime a la mezcla con una fuerza mayor que la de la gravedad, provocando la sedimentación de los sólidos o de las partículas de mayor densidad.
Coefficiente de transferencia de masa	Es el que regula la rapidez con la cual se alcanza el equilibrio, controlan el tiempo que se necesita para la difusión.
Condensación	Es el cambio de estado de la materia que se encuentra en forma gaseosa a forma líquida.
Deshumidificador	Aparato utilizado para disminuir la humedad de una masa de aire con la finalidad de aumentar su capacidad evaporativa.

Diagrama de fases	Es la representación gráfica de las fronteras entre diferentes estados de la materia de un sistema, en función de variables elegidas para facilitar el estudio del mismo.
Ebullición	Es el proceso físico en el que un líquido pasa a estado gaseoso con la fuerza de la temperatura.
Efervescencia	Es el proceso en el que se produce una reacción por la cual se da un escape de gas de una solución acuosa. Este gas es el denominado dióxido de carbono.
Eficiencia	Uso racional de los recursos con que se cuenta para alcanzar un objetivo predeterminado. A mayor eficiencia menor la cantidad de recursos que se emplearán, logrando mejor optimización y rendimiento.
Eficiencia térmica	Es la capacidad que tiene una máquina para aprovechar todo el calor sin que tenga pérdida de éste.

Especificación	Documento técnico oficial que establece de forma clara todas las características, los materiales y los servicios necesarios para producir componentes destinados a la obtención de productos. Estos incluyen requerimientos para la conservación de dichos productos, su empaquetamiento, almacenaje y marcado así como los procedimientos para determinar su obtención exitosa y medir su calidad.
Evaporación	Es el proceso físico del cambio de estado, de líquido a gaseoso en el cual una sustancia se puede separar de otra por su punto de ebullición.
Fluidización	Es un proceso por el cual una corriente ascendente de fluido (líquido, gas o ambos) se utiliza para suspender partículas sólidas.
Flujo másico	Es en física la magnitud que expresa la variación de la masa en el tiempo. Matemáticamente es la diferencial de la masa con respecto al tiempo.

Gráficos de control	Gráfico especializado de series temporales que muestra el rendimiento de un proceso, el promedio y los límites de control; sirve para determinar las influencias de las causas comunes o especiales sobre procesos.
Granulación	Es el proceso de mezclado de un polvo en presencia de un líquido (solución aglutinante) para formar el gránulo. Este proceso disminuye el riesgo de segregación y producción de finos relacionada con la compresión de tabletas. La granulación ocurre por la formación de enlaces tipo puentes de hidrógeno entre las partículas primarias.
Hidráulico	Relativo a la parte de la mecánica que estudia el equilibrio y movimiento de los fluidos.
Higroscópico	Propiedad de algunas sustancias de absorber y exhalar la humedad según el medio en que se encuentran.
Humedad absoluta	Es la cantidad de vapor de agua por unidad de volumen de aire ambiente. Es uno de los modos de valorar la cantidad de vapor contenido en el aire, lo que sirve, con el dato de la temperatura, para estimar la capacidad del aire para admitir o no mayor cantidad de vapor.

Humedad relativa	Es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua real que contiene el aire y la que necesitaría contener para saturarse a idéntica temperatura.
Isoterma	Es una curva que une los puntos, en un plano cartográfico, que presentan las mismas temperaturas en la unidad de tiempo considerada.
Litmus	Es una mezcla soluble en agua de diferentes tintes extraídos de líquenes, especialmente <i>Roccella tinctoria</i> . A menudo se absorben en papel de filtro para producir una de las formas más antiguas de indicador de pH, que se utiliza para probar la acidez de los materiales.
Optimización	Es dar respuesta a un tipo general de problemas donde se desea elegir el mejor entre un conjunto de elementos.
Parámetro	Variable que aparece en una ecuación, cuyo valor se fija a voluntad.
Partícula	Es la menor porción de materia de un cuerpo que conserva sus propiedades químicas.

pH	La sigla significa "potencial de hidrógeno", es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio [H ₃ O ⁺] presentes en determinadas sustancias.
Porcentaje de rendimiento	Sirve para medir la efectividad de un procedimiento. Es calculado al dividir la cantidad de producto obtenido por el rendimiento teórico.
Presión	Magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo sobre la unidad de superficie. Su unidad en el Sistema Internacional es el pascal.
Principio activo	Es toda sustancia química purificada utilizada en la prevención, diagnóstico, tratamiento, mitigación y cura de una enfermedad.
Proceso	Es un conjunto de actividades o eventos que se realizan o suceden bajo ciertas circunstancias con un fin determinado.
Reacción química	Es todo proceso químico en el cual dos o más sustancias llamadas reactantes, por efecto de un factor energético, se transforman en otras sustancias llamadas productos.
Requerimiento	Es una necesidad documentada sobre el

contenido, forma o funcionalidad de un producto o servicio.

Secador

Es un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimento cerrado, el cual consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo.

Secador de cama fluida

Es el secador donde se atomiza una suspensión líquida, la cual es recibida por una corriente a contraflujo de aire caliente que evapora el líquido, de modo que caen las partículas sólidas que se separan de la corriente de gas, por no ser volátiles.

Serpentín

Tubo de forma frecuentemente espiral, utilizado comúnmente para enfriar vapores provenientes de la destilación en un calderín y así condensarlos en forma líquida. Suele ser de vidrio, cobre u otro material que conduzca el calor fácilmente.

Siderurgia

Es la técnica del tratamiento del mineral de hierro para obtener diferentes tipos de éste o de sus aleaciones.

Solución acuosa

Preparación líquida que contiene una o más sustancias químicas solubles disueltas en agua.

Temperatura	Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente. Su unidad en el Sistema Internacional es el kelvin (K).
Titulador potenciométrico	Aparato utilizado para conocer la concentración de soluciones, a partir de estándares cuya concentración es conocida, aprovechando las variaciones de una fuerza electromotriz inducida entre un electrodo indicador y uno de referencia, hasta detectar a diferentes intervalos durante el proceso de una valoración qué cantidades químicamente equivalentes de las dos hayan reaccionado.
Válvula	Es un dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.
Vapor	Es un gas que se obtiene por evaporación o ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo. Es inodoro e incoloro.
Variable	Magnitud que puede tener un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto.

Volumen

Magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones: largo, ancho y alto. Su unidad en el Sistema Internacional es el metro cúbico (m^3).

RESUMEN

El objetivo de la investigación es obtener parámetros de control en el proceso de carbonatación de bicarbonato de sodio al 86 por ciento en un secador de cama fluida.

Para lo cual se realizó la carbonatación del bicarbonato de sodio se procedió a la instalación de un secador de cama fluida, que consta de un sistema de alimentación por medio de súper sacos (*Big Bags*), hacia la cámara del horno, con capacidad por carga de 750 kilogramos. El secador trabaja con un volumen de aire entrante de 6 000 metros cúbicos por horas, con capacidad de alcanzar una temperatura máxima de 150 grados centígrados, un consumo de vapor de 509 kilogramos por hora. La descarga del equipo es llevada a cabo por un ciclón hacia un contenedor de 1 600 metros cúbicos. El proceso de carga, carbonatación y descarga es cerrado.

Se realizaron pruebas de carbonatación de diferentes muestras de bicarbonato de sodio variando parámetros de temperaturas, porcentaje de apertura de válvulas, volumen de aire de entrada a lo largo del proceso, los datos obtenidos fueron tabulados y analizados con el fin de determinar las condiciones óptimas necesarias para cumplir con los requerimientos del proceso farmacéutico y especificaciones del material.

OBJETIVOS

General

Determinar parámetros de control en el proceso de carbonatación debicarbonato de sodio en un secador de cama fluida, manteniendo la calidad del producto

Específicos

1. Determinar la presión estática de succión del secador para verificar que se encuentre dentro los parámetros establecidos.
2. Determinar la temperatura del producto para verificar que se encuentre dentro los parámetros establecidos.
3. Determinar la temperatura del aire de entrada del secador para verificar que se encuentre dentro los parámetros establecidos.
4. Determinar la temperatura del aire de salida del secador para verificar que se encuentre dentro los parámetros establecidos.
5. Determinar los parámetros óptimos para la carbonatación de bicarbonato de sodio en el secador de cama fluida evaluado.
6. Definir los gráficos de control para cada una de las variables dependientes del proceso.

7. Determinar la capacidad del proceso y el coeficiente de la capacidad del proceso.

INTRODUCCIÓN

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El agua u otros líquidos pueden separarse de sólidos mecánicamente mediante prensas o centrifugas, o bien térmicamente mediante evaporación.

El secado por lecho fluido se basa principalmente en que el aire (gas), pasa a través de una cama de partículas a una velocidad suficientemente alta como para suspender las partículas en el fluido. El movimiento de las partículas en el aire o gas producen una transferencia de calor eficiente provocando la evaporación del agua.

El bicarbonato de sodio es un sólido blanco cristalino, de sabor alcalino que se asemeja al del carbonato de sodio. Se conoce la forma mineral natural como nahcolite. También es producido artificialmente. Es utilizado en la industria de detergentes, siderúrgica, alimenticia, farmacéutica y como regulador de pH, entre otras.

En la industria farmacéutica el bicarbonato de sodio es utilizado en la preparación de productos efervescentes, para la protección de los activos contra la humedad y para que se lleve a cabo la efervescencia en si.

1. ANTECEDENTES

Se encontraron tres trabajos de graduación relacionadas con el tema de investigación, los cuales se enlistan a continuación:

- a. MAZARIEGOS SOTO, Mónica Melissa. “Aumento de la eficiencia de calcinación de bicarbonato de sodio en un secador de cama fluida en una industria farmacéutica”. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala, 2007.
- b. MUÑOZ PÉREZ, Luis Felipe. “Optimización del horneado de bicarbonato de sodio en un secador de cama fluida. Comparación con un secador de bandejas”. Universidad de San Carlos Facultad de Ingeniería, Guatemala, 1990.
- c. ZETINA TOACHE, Rodrigo. “Estudio de fluidización de bicarbonato de sodio, su aplicación a la industria farmacéutica”. Universidad de San Carlos Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, Guatemala, 1978.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas del bicarbonato de sodio y carbonato de sodio se describen a continuación:

2.1.1. Bicarbonato de sodio

El bicarbonato de sodio es un sólido blanco cristalino, con fórmula molecular NaHCO_3 y peso molecular 84,01.

El bicarbonato de sodio inicia a perder dióxido de carbono cerca de los 50 grados celsius y a los 100 grados celsius es convertido en carbonato de sodio.

Se descompone rápidamente en la presencia de ácidos débiles. En una solución acuosa inicia a formar dióxido de carbono y carbonato de sodio a los 20 grados Celsius y se descompone completamente a temperatura de ebullición.

Soluble en 10 partes de agua a 25 grados celsius y 12 partes de agua a 18 grados celsius. Insoluble en alcohol.

La solución acuosa preparada con agua fría sin agitación, es ligeramente alcalina al litmus o fenolftaleína; al mantenerla en reposo o al incrementar la temperatura la alcalinidad aumenta. El pH de una solución 0,1 molar a 25 grados celsius recién preparada es 8,3.

2.1.2. Carbonato de sodio

El carbonato de sodio es un polvo higroscópico e inodoro de sabor alcalino, con fórmula molecular Na_2CO_3 y peso molecular 105,99.

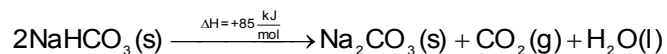
Densidad de 2,53, punto de fusión 851 grados celsius pero inicia a perder dióxido de carbono incluso a los 400 grados celsius. Expuesto al aire gradualmente absorbe 1 molécula de agua (15 por ciento).

Soluble en glicerol; en agua soluble en 3,5 partes a temperatura ambiente y 2,2 partes de agua a 35 grados celsius. Insoluble en alcohol. Se descompone en presencia de ácidos con efervescencia. Se disuelve con agua al aumentar la temperatura.

En solución acuosa es altamente alcalina, pH 11,6.

2.2. Reacción química

La reacción química que se da en el proceso es la siguiente:



2.3. Secador en lecho fluidizado

El aire del proceso, se suministra al lecho, a través de una placa especial de distribuidor perforada y fluye a través del lecho de sólidos, a una velocidad suficiente, para soportar el peso de las partículas en estado fluidizado. Se forman burbujas y caen en el lecho fluidizado del material, promoviendo un intenso movimiento de partículas. En este estado, los sólidos se comportan como un líquido en ebullición que fluye libremente. Las temperaturas muy altas

y los coeficientes de transferencia de masa se obtienen como resultado del contacto íntimo con los sólidos y el diferencial de velocidades entre cada una de las partículas y el gas fluidizante.

El lecho fluidizado, se puede usar para secar productos, en muchas industrias incluyendo las de alimentos, productos químicos, minerales y polímeros. La gama de materiales alimentados, puede ser muy diversa como polvos, cristales, gránulos y esferas pequeñas.

2.3.1. Fundamentos

El procesamiento en lechos fluidizados puede servir para el secado, enfriamiento, aglomeración, granulación y revestimiento de los materiales en gránulos. Es ideal para una amplia gama de productos sensibles y no sensibles al calor. El procesamiento uniforme, se logra haciendo pasar un gas (por lo general aire) a una velocidad controlada, a través de una capa del producto para crear un estado fluidizado.

El gas de fluidización, aporta el calor para el secado en lechos fluidizados, pero el flujo del gas no tiene que provenir de una sola fuente. El calor se puede introducir de manera eficaz calentando las superficies (paneles o tubos) inmersas en la capa fluidizada.

En el enfriamiento en lechos fluidizados se usa gas frío (por lo general aire acondicionado o ambiental). El calor también se puede eliminar enfriando las superficies inmersas en la capa fluidizada.

La aglomeración y la granulación se pueden realizar de varias formas, dependiendo del producto que se vaya a alimentar y las propiedades que deba tener el producto final.

2.3.2. Ventajas

La fluidización de los materiales en gránulos permite una mayor facilidad en el transporte de los materiales, altas velocidades de intercambio de calor con una gran eficiencia térmica, a la vez que evita el sobrecalentamiento de las partículas.

Las propiedades de los productos se determinan basándose en la información derivada de su velocidad de secado, por ejemplo, la forma en que el contenido de partículas volátiles, cambia con el tiempo, en un lote en lecho fluidizado que opera en condiciones controladas. Otras propiedades importantes son la velocidad del gas de fluidización, el punto de fluidización (es decir, el contenido de partículas volátiles bajo el cual se logra la fluidización sin agitación mecánica o vibración), el contenido de partículas volátiles en equilibrio y el coeficiente de transferencia de calor para las superficies de calentamiento inmersas.

El secado en lechos fluidizados resulta adecuado para polvos, gránulos aglomerados y pastillas con un tamaño de partícula promedio entre 50 y 500 micras. Es muy probable que los polvos muy finos y ligeros o las partículas altamente alargadas requieran movimientos vibratorios para lograr con éxito el secado en lechos fluidizados.

2.3.3. Características del polvo

Los sistemas de secado de lecho fluido, tienen poca o nula influencia sobre las características del polvo seco. Por otro lado, el secado por atomización presenta un número de posibilidades de crear productos acorde a requisitos particulares.

El control del tamaño de partícula puede ser importante por varias razones. Por ejemplo, en la fabricación de catalizadores usados en reacciones en fase gas, el tamaño de partícula del catalizador es crítico para su distribución dentro de la corriente de gas. Otras características, tales como volumen del poro y el área de superficie pueden ser afectadas por el proceso de secado, los cuales a su vez afectan la actividad del catalizador.

2.3.4. La cinética del secado

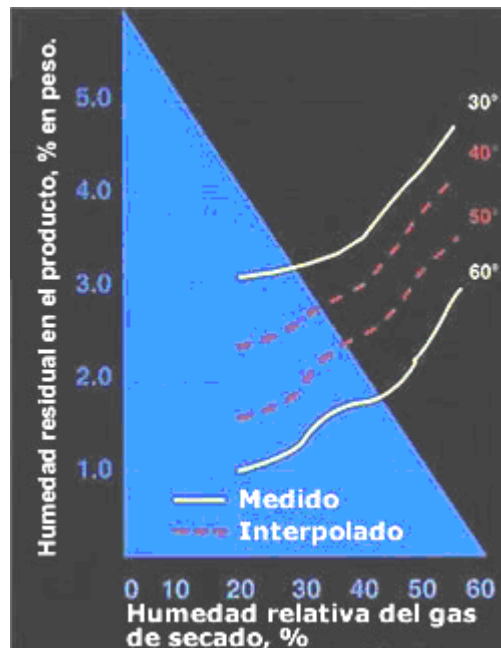
La relación entre el contenido de humedad de los sólidos a secar y la humedad relativa del gas de secado se describe mejor por medio del diagrama isotérmico de equilibrio o abreviando "isoterma" (figura 1). Cuanta más alta es la temperatura de un sólido en contacto con un gas a humedad constante, más seco es el sólido.

Se puede controlar el contenido de humedad del producto sólido al controlar su temperatura en presencia del gas a humedad constante. Inversamente, si la temperatura máxima está limitada por los requerimientos del producto o del proceso, el contenido de humedad del producto puede ser controlada ajustando la humedad del gas.

Para crear las fuerzas de secado para evaporación de la humedad en la alimentación de sólidos húmedos, se debe poner en contacto la alimentación de sólidos con una corriente de gas teniendo una temperatura requerida, considerablemente alta para alcanzar el equilibrio a la humedad final deseada. La diferencia de temperaturas determina la cantidad de evaporación que una cantidad dada de gas puede lograr.

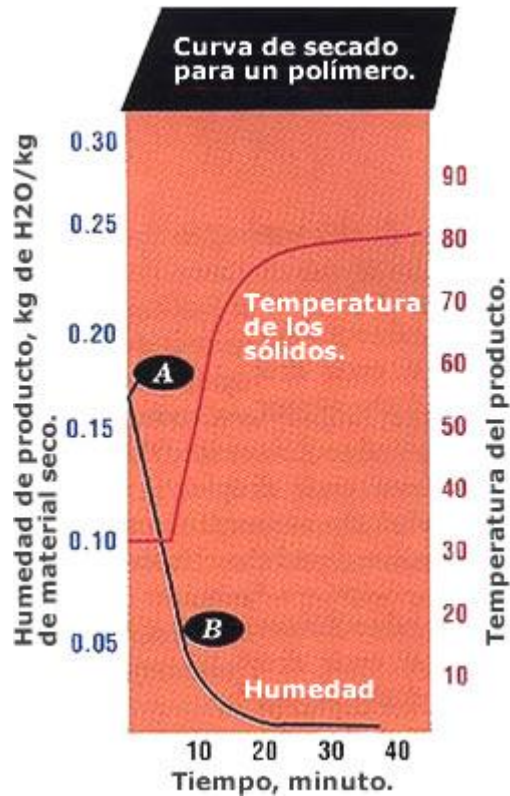
Otro factor importante es la tasa en la cual la humedad abandona un producto mientras que el material pasa a través de un secador. Esta relación dinámica se ilustra en la figura 2. Del punto A al punto B, la evaporación es rápida y a una tasa constante. Esto se refiere como secado de orden cero. Esta forma de secado ocurre cuando la humedad libre, se evapora de la superficie de las partículas sólidas.

Figura 1. **Diagrama isotérmico de equilibrio**



Fuente: Shaw, Fred V. 2009

Figura 2. Curva de secado



Fuente: Shaw, Fred V. 2009

Más allá del punto B, el secado llega a ser más lento y el contenido de agua alcanza a menudo un equilibrio con el gas, incluso a temperaturas superiores al punto de ebullición del líquido que es evaporado. Esto ocurre cuando la humedad residual queda ocluida en micro poros o capilares o es física o químicamente absorbida. Este estado es llamado secado de primer orden.

2.3.5. Secado en lecho fluido en acción

Los fundamentos de la fluidización, pueden ser ejemplificados como una cantidad de partículas esféricas estáticas en un recipiente, si un gas es forzado a pasar a baja velocidad a través de las partículas y al mismo tiempo se distribuye a través de la sección completa del contenedor, se puede detectar cierta caída de presión en el gas, pero no movimiento de las partículas.

Si se incrementa el flujo de gas, la caída de presión se incrementa hasta que esta sobrepasa el peso de las partículas. A este punto las partículas comenzarán a moverse ligeramente en la dirección del flujo de gas, de esta forma, expandiendo el lecho. El lecho puede ser estabilizado con todas las partículas suspendidas en la corriente de gas y separadas una de otra. Si se incrementa la velocidad del gas, aumenta también el movimiento o agitación del lecho, pero la caída de presión a través del lecho fluidizado permanece constante.

Este estado fluidizado se puede mantener sobre un rango bastante amplio de velocidades. En el extremo más alto del rango de velocidades, las burbujas de gas en levantamiento proyectan un número de partículas fuera del lecho, incluso si la velocidad superficial sobre el lecho no es suficiente para transportar realmente las partículas. Esta condición se denomina como emanando.

Partículas más pequeñas o partículas con densidades por debajo del promedio, pueden ser arrastradas por la corriente de gas que sale la cama. Estas partículas se dicen que tienen elutriación.

Si la velocidad a través de la cama se incrementa al punto donde todas las partículas son arrastradas por la corriente de gas la caída de presión comienza a incrementarse y el sistema se encuentra esencialmente en fase de transporte neumático. Se pierde por completo el lecho. En el estado fluidizado los sólidos tienden al comportamiento de un líquido hirviendo. Si los sólidos se agregan al lecho fluido en un punto, se distribuyen a través de todo el lecho, en lugar de llenar la parte superior. Los sólidos fluidificados atraviesan los vertederos, y vierten de cualquier apertura por debajo de la capa superior. Consecuentemente, los lechos fluidificados no requieren ninguna rampa o dispositivo mecánico para mover los sólidos desde la entrada hasta la salida.

Las mayores ventajas de los sistemas de secado de lecho fluido son que permiten un relativamente largo tiempo de residencia y permiten coeficientes de transferencia de calor verdaderamente altos entre las partículas y el gas. En adición es posible un control estrecho de temperatura de producto, permitiendo el procesamiento térmico de productos sólidos sensibles. Además, los secadores del lecho fluidizado funcionan a menudo con temperaturas de gas de escape muy cercanas al punto de condensación del gas, dando la eficacia térmica más alta de cualquier sistema de secado de suspensión gas.

En la parte inferior del secador, los requisitos para alcanzar y mantener los límites de fluidización del rango de materiales que pueden ser manejados en un lecho fluido; las partículas generalmente deben estar en el rango de tamaño de 5 a 50 milímetros y en una distribución de partícula no más amplia de la distribución dimensional de la magnitud, es decir, de 1 a 100 milímetros. Deben ser de una forma razonablemente regular y no particularmente pegajoso.

2.3.6. Diseño de proceso

Antes de realizar el diseño de un sistema de secado de lecho fluido, las características de la alimentación y el producto, deben ser establecidas por medio de pruebas experimentales, para determinar la velocidad de fluidización del polvo a ser secado.

El diseño de un lecho fluido es complicado, debido a que el flujo másico del gas de secado necesario para evaporar la cantidad de humedad deseada, debe pasar a través del lecho a la velocidad de fluidización predeterminada. En casos donde la diferencia de temperaturas de la entrada a la salida es pequeña y el tamaño de partícula de producto y su densidad a granel son bajas, esto requerirá para ambos, flujo másico y velocidad de fluidización pueden conducir a un lecho fluido de grandes dimensiones.

Un método comúnmente empleado para solucionar esta dificultad es sumergir una superficie de transferencia de calor en el seno de fluidización. La superficie de transferencia de calor usualmente toma la forma de un manojo de tubos o paneles de calentamiento, calentados por agua, vapor o fluido de calentamiento. El arreglo, espaciamiento y el método de instalación de tales baterías de calentamiento dentro del lecho fluido varían, pero en todos los casos, deben ser sumergidos en el estrato y no deben impedir el flujo del material a través del lecho.

2.3.7. Control de proceso

El control de un lecho fluido se logra al medir continuamente la temperatura de entrada, la temperatura de salida y las temperaturas de varias zonas dentro del lecho. Normalmente el flujo de aire permanece constante para

proveer una fluidización adecuada y la caída de presión a través del lecho se mantiene al ajustar el flujo de alimentación de aire. El flujo de descarga de producto es función del flujo de la alimentación.

Con los flujos másicos de sólidos y aire permaneciendo constantes, la única manera de ajustar la temperatura de salida es ajustando la temperatura de entrada. Debido a que los lechos fluidos presentan esencialmente un contacto de flujo cruzado entre los sólidos y el gas, también las partículas que salen del secador están en contacto con el gas caliente a las condiciones de entrada. Esto resulta en una respuesta rápida para un tiempo de residencia largo (usualmente en el rango de 5 minutos a una hora) para los sólidos.

2.4. Descripción del equipo

La torre de la máquina de la unidad de lecho fluido se compone de:

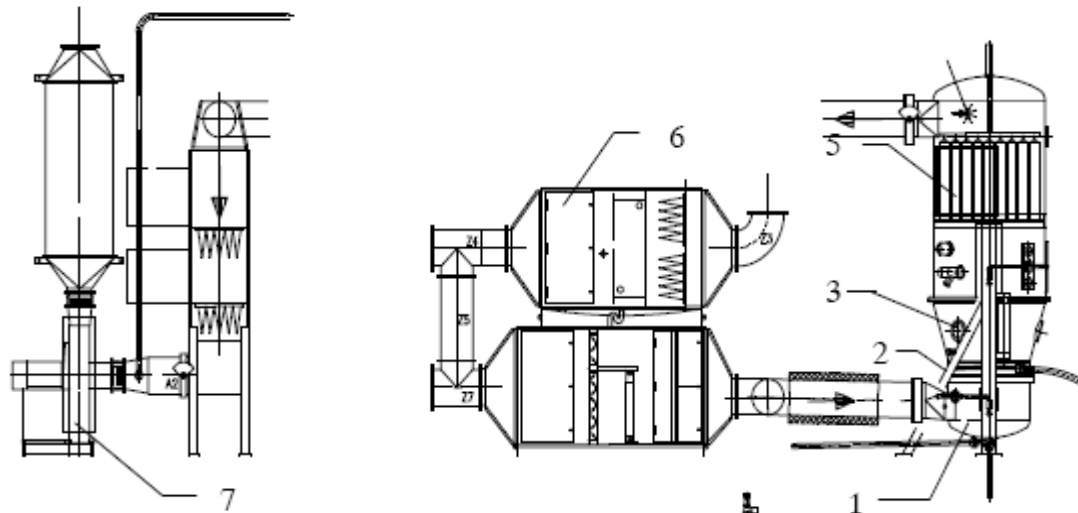
- La sección inferior (1) con un anillo de sellado de silicona inflable.
- El anillo de presión (2) con dos cilindros hidráulicos y una estructura que se proyecta en la sección inferior contra la cual se presiona el sello de silicona inflable durante el proceso.
- El envase del producto (3) con tamiz.
- La caja del filtro (5) con un filtro tipo bolsa separado en la salida.
- Sección de entrada de aire (6). Tipo "A": construido como un eje trasero directamente en la máquina. Tipo "B": construido como una parte manual integrada en el sistema del ducto de la entrada del aire. Cuenta con las siguientes partes principales:
 - Pre-filtro, la entrada de aire es conducido a través de la sección de filtro. Hay filtros estáticos tipo bolsas. El control del filtro se lleva a cabo a través del medidor de presión diferencial. Si aumenta la diferencia de presión sobre el conjunto en un máximo de nivel de las

inserciones del filtro tiene que ser sustituido por la apertura de las puertas de servicio en la sección de tratamiento de aire lateral.

- Sección deshumidificadora, para la refrigeración y/o deshumidificación de la sección de entrada de aire se encuentra un serpentín de enfriamiento en la unidad de manejo de aire de entrada. Las gotas de condensado se depositarán en un colector de humedad. El condensado es drenado por gravedad. Se evita la fuga de aire mediante un sifón.
- Unidad de calefacción – sistema de mezclado, la combinación de ambas unidades está especialmente diseñado para procesos que requieren cambios de temperatura en períodos cortos de tiempo.
- Calentador: calefacción de entrada de aire, atornillado a la pared de separación y sellado con silicona. Está diseñado para evitar que el aire se escape por el calentador o las láminas (placas).
- Filtro fino, todos los puntos de contacto entre el marco receptor del filtro, la pared del recipiente, así como la superficie posterior interna (lado aire puro) se encuentran soldados.
- Las puertas de servicio / aire comprimido, puertas del pre-filtro y filtro fino cuentan con bisagras y cierres de bloqueo abatible, están sellados al vacío parcial. Los marcos de las puertas están selladas con perfiles en U de goma. Las cubiertas de placas laterales también están equipados con perfiles de goma. El método de montaje, así como el diseño estructural están garantizados para prevenir el ingreso de aire no deseado en la sección de entrada de aire.

- Ventilador (7) el ventilador radial se instala en el lado del extractor de aire para aspirar el aire de proceso a través de todo el sistema. La cantidad de aire se cálcula individualmente para cada lugar. La presión total es dependiente del sistema de tuberías y la resistencia del ducto. El ventilador está equipado con compensadores para evitar las vibraciones del conducto para mitigar la vibración del ventilador.

Figura 3. Diagrama de flujo



Fuente: Instruction manual. 2009

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

- Presión de trabajo: a lo largo de todo el proceso de carbonatación se debe controlar de que esta sea por lo menos 90 libra por pulgada cuadrada.
- Presión estática de succión: a lo largo de todo el proceso de carbonatación se debe controlar de que esta no exceda de 10 pulgadas de agua.
- Temperatura del producto: en la etapa de carbonatación verificar en intervalos de 10 ± 2 minutos se encuentre entre 98 – 106 grados celsius.
- Temperatura del aire de entrada: en la etapa de carbonatación verificar en intervalos de 10 ± 2 minutos se encuentre entre 100 - 120 grados celsius.
- Temperatura del aire de salida: en la etapa de carbonatación verificar en intervalos de 10 ± 2 minutos se encuentre entre 80 - 105 grados celsius.

Tabla I. Descripción de variables

Variables	Dimensionales	Constantes	Independientes	Dependientes
Caudal aire entrada	m ³ /s	x		
Temperatura aire de entrada	K	x		
Humedad absoluta entrada	g/kg		x	
Temperatura del producto	K			x
Temperatura aire de salida	K			x
Humedad absoluta aire salida	g/kg		x	
Tiempo de agitado	s	x		
Pausa de agitado	s	x		
Presión de filtro de salida 1	Pa			x
Presión de filtro de entrada 2	Pa			x
Presión de filtro de entrada 1	Pa			x
Presión de atomizado	Pa			x
Presión de filtro de producto	Pa			x
Presión de producto	Pa			x

Fuente: Instruction manual. 2009

Tabla II. **Parámetros métrológicos**

Tipo de instrumento	Parámetro de medición	Rango de trabajo
Temperatura entrada de aire	0 - 150 °C	100 °C - 140 °C
Temperatura del producto	0 - 150 °C	98 °C - 106 °C
Temperatura salida de aire	0 - 150 °C	120 °C - 145 °C
Presión de atomizado	0 - 6 bar	4,5 bar - 6 bar
Diferencial de presión de aire de entrada del filtro 1	0 – 2 500 Pa	500 – 2 300 Pa
Diferencial de presión de aire de entrada del filtro 2	0 – 2 500 Pa	500 – 2 300 Pa
Diferencial de presión del producto	0 – 7 500 Pa	1 000 – 7 000 Pa
Diferencial de presión del filtro del producto	0 – 7 500 Pa	1 000 – 7 000 Pa
Diferencial de presión del filtro de aire de salida	0 – 2 500 Pa	500 – 2 300 Pa
Humedad absoluta entrada	0 – 25 g/kg	10 - 80 % HR
Humedad absoluta aire salida	0 – 25 g/kg	10 - 80 % HR
Caudal aire entrada	0 – 6 000 m ³ /h	3 000 – 6 000 m ³ /h

Fuente: Instruction manual. 2009

3.2. Delimitación de campo de estudio

Secador de cama fluida marca Glatt Modelo WSG CD 200 PV, localizado en una industria farmacéutica de la ciudad de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Director de la escuela de Ingeniería Química: Ing. Williams Álvarez Mejía
- Coordinadora de trabajos de graduación: Ing. Lisely de León
- Asesora: Ing. Mónica Melissa Mazariegos Soto
- Investigador: Roswald Idabel Reyes Serrano
- Operarios de producción, área de formulación
- Técnico de materias primas, área de control de calidad.

3.4. Recursos materiales disponibles

- Muestras de bicarbonato de sodio
- Contenedor de acero inoxidable con capacidad de 1600 litros
- Balanzas con capacidad 1600 y 2000 kilogramos
- Estación de dosificado
- Columna elevadora
- Secador de cama fluida Glatt Modelo WSG CD 200 PV
- Mezclador de contenedores
- Montacargas marca Yale
- Balanza analítica
- Medidor de humedad
- Termómetros
- Cristalería y reactivos de laboratorio

- Titulador potenciométrico

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

Se analizaron los lotes de bicarbonato de sodio por titulación potenciométrica para determinar el porcentaje de carbonatación y el porcentaje de humedad relativa.

Ecuaciones a utilizar:

Para la cuantificación de:

- Bicarbonato de sodio

$$\%_{\text{NaHCO}_3} = (V_3 - V_2) \text{ mL} \times \frac{250 \text{ mL}}{W(\text{g})_{\text{Mta}}} \times \frac{N_{\text{HCl}}}{50 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ mmol}_{\text{NaHCO}_3}}{1 \text{ meq}} \times \frac{0.0840059 \text{ g}_{\text{NaHCO}_3}}{1 \text{ mmol}_{\text{NaHCO}_3}} \times 100$$

- Carbonato de sodio

$$\%_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{(V_1 + V_2 - V_3) \text{ mL}}{2} \times \frac{250 \text{ mL}}{W(\text{g})_{\text{Mta}}} \times \frac{N_{\text{HCl}}}{50 \text{ mL}} \times \frac{1 \text{ mmol}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{1 \text{ meq}} \times \frac{0.105988 \text{ g}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{1 \text{ mmol}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}} \times 100$$

- Agua

$$\%_{\text{H}_2\text{O}} = 100 - \%_{\text{Na}_2\text{CO}_3} - \%_{\text{NaHCO}_3}$$

Donde:

- V_1 Volumen en mililitros utilizado en la titulación de alcalinidad total
- V_2 Volumen en mililitros utilizado en la retrotitulación

V_3	Volumen en mililitros utilizado en la titulación del blanco
$W(g)_{Mta}$	Peso de la muestra en gramos.
N_{HCl}	Normalidad exacta del ácido clorhídrico
$\%NaHCO_3$	Porcentaje de bicarbonato de sodio
$\%Na_2CO_3$	Porcentaje de carbonato de sodio
$\%H_2O$	Porcentaje de agua

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la recolección de datos se tomaron quince lotes de bicarbonato de sodio y para cada uno se programó el equipo para que automáticamente hiciera las mediciones de los parámetros evaluados.

La recolección de información se llevó a cabo a partir de la obtención de datos experimentales y por medio de un refinamiento progresivo se llegó hasta las condiciones en donde se cumplió con las especificaciones. Otros medios de consulta fueron: procedimientos existentes, consulta bibliográfica e Internet.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Se ordenaron los datos y se presentaron tabulados en tablas con sus respectivas fuentes y números correlativos.

3.8. Análisis estadístico

Para el monitoreo y el control estadístico de los datos, se utilizaron herramientas básicas estadísticas para obtener resultados confiables en los métodos que se están utilizando; estas son:

- Media o promedio:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

(Ecuación No.1)

Donde:

\bar{X}	Media o promedio
a_i	Dato enésimo
n	Número de datos

- Desviación estándar:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

(Ecuación No.2)

Donde:

S_x^2	Desviación estándar
\bar{X}	Media o promedio
X_i	Dato enésimo
n	Número de datos

- Coeficiente de variación:

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\%$$

(Ecuación No.3)

Donde:

Cv	Coeficiente de variación
σ	Desviación estándar
\bar{X}	Media o promedio

- Porcentaje de rendimiento

$$\text{Rendimiento} = \frac{|W_f - W_i|}{W_i} \times 100\%$$

(Ecuación No.4)

Donde:

W_f Peso final (kg)

W_i Peso inicial (kg)

- Capacidad del proceso:

$$C_p = \left| \frac{LES - LEI}{6 \sigma} \right|$$

(Ecuación No.5)

Donde:

C_p Capacidad del proceso

LES Límite de la especificación superior

LEI Límite de la especificación inferior

σ Desviación estándar

- Constante de capacidad del proceso:

$$C_{PS} = \left| \frac{LES - \bar{X}}{3 \sigma} \right|$$

$$C_{PI} = \left| \frac{LEI - \bar{X}}{3 \sigma} \right|$$

$$C_{pk} = \min(C_{PS}, C_{PI})$$

(Ecuación No.6)

Donde:

Cpk	Constante de capacidad del proceso
CPS	Capacidad superior del proceso
LES	Límite de la especificación superior
\bar{x}	Media o promedio
σ	Desviación estándar
CPI	Capacidad inferior del proceso
LIS	Límite de la especificación inferior

4. RESULTADOS

Tabla III. Resumen de resultados de carbonatación

Lote	Carbonatación (%)	Rendimiento (kg)	Humedad relativa (%)	Temperatura (K)	Tiempo (s)	Condiciones de proceso
L01	88,5	641,4	3,8	305,25	2 402	Ajuste
L02	87,4	647,0	3,9	313,35	3 481	
L03	88,5	659,2	4,1	307,35	3 481	
L04	87,4	657,6	0,0	273,15	3 481	
L05	87,8	643,4	4,4	309,25	3 722	
L06	87,4	660,0	2,2	309,75	3 841	Estables
L07	85,8	645,8	3,6	311,35	3 961	
L08	86,0	651,4	1,0	312,35	3 961	
L09	86,4	645,2	2,2	310,35	3 961	
L10	86,0	652,4	4,2	312,55	3 961	
L11	85,2	644,0	2,7	295,55	3 961	
L12	86,0	644,0	3,3	295,75	3 961	
L13	86,9	646,8	3,5	295,95	3 960	
L14	86,0	650,6	4,8	296,05	3 961	
L15	85,8	654,2	5,0	296,85	3 782	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Resumen estadístico

Lote	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L06	3 841	12,50	414,20	2 604	366,21	371,10	2 807	3 605	2,2	55	294	187
L07	3 961	13,00	414,71	2 786	366,17	371,16	2 916	3 341	2,0	62	283	171
L08	3 961	12,40	414,39	2 712	365,97	370,86	2 928	3 987	2,2	60	349	191
L09	3 961	11,50	414,48	2 797	366,14	371,24	3 044	3 985	2,0	60	330	177
L10	3 961	12,50	413,87	2 783	365,78	370,92	2 967	3 888	2,2	55	289	158
L11	3 961	13,30	411,67	2 849	366,95	370,92	3 153	2 281	2,0	56	263	188
L12	3 961	10,80	411,89	2 808	365,86	370,25	3 099	2 980	2,2	56	236	201
L13	3 960	10,60	412,70	2 887	365,97	370,44	2 958	2 950	2,0	70	303	168
L14	3 961	12,90	412,26	2 816	365,56	370,16	2 818	3 580	2,2	62	270	161
L15	3 782	11,10	410,85	2 686	365,65	370,49	2 819	3 350	2,0	57	234	152
Promedio (\bar{X})	3 973,0	12,1	413,1	2 772,8	366,0	370,8	2 950,9	3 394,7	2,1	59,3	285,1	175,4
Desviación estándar (S)	156,8	1,0	1,4	83,4	0,4	0,4	119,8	541,2	0,1	4,6	36,9	16,1
Coefficiente de variación	3,95	8,10	0,34	3,01	0,11	0,10	4,06	15,94	5,02	7,70	12,94	9,17
Límite superior de control (promedio + 3 S)	4 444	15	417	3 023	367	372	3 310	5 018	2,4	73	396	224
Límite inferior de control (promedio - 3 S)	3 502	9	409	2 523	365	370	2 591	1 771	1,8	46	174	127

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Límites establecidos

Lote	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
Promedio (\bar{X})	366,0	370,8	2 950,9	3 394,7	2,1	59,3	285,1	175,4
Límite superior de control (promedio + 3S)	367	372	3 310	5 018	2,4	73	396	224
Límite inferior de control (promedio - 3S)	365	370	2 591	1 771	1,8	46	174	127

Fuente: elaboración propia.

Nota: La temperatura de producto es el parámetro de mayor relevancia.

Tabla VI. **Capacidad del proceso**

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa
L06	660	87,4	2,2
L07	646	85,8	3,6
L08	651	86,0	1,0
L09	645	86,4	2,2
L10	652	86,0	4,2
L11	644	85,2	2,7
L12	644	86,0	3,3
L13	647	86,9	3,5
L14	651	86,0	4,8
L15	654	85,8	5,0
Promedio (\bar{x})	649,4	86,2	3,3
Desviación estándar (S)	5,2	0,6	1,3
Coefficiente de variación	0,80	0,72	38,55
Promedio + 3 S	665	88,0	7,0
Promedio - 3 S	634	84,3	-0,5
Capacidad del proceso	1,43	1,00	1,00
Objetivo	660	86,0	7,0
Límite superior del proceso	693	88,0	7,0
Límite inferior del proceso	627	84,0	

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El proceso de carbonatación se divide en varias etapas: precalentamiento, carga, calentamiento 1 y 2, enfriamiento y descarga 1, 2 y 3; el análisis se enfoca en la etapa de calentamiento 2, ya que en ésta se lleva a cabo la carbonatación. Para la optimización de la carbonatación es necesario que se tenga un precalentamiento a 60 grados celsius en el equipo para agilizar el proceso, y en la etapa de calentamiento 1 subir la temperatura al producto gradual y homogéneamente a 90 grados celsius, para que en la etapa de calentamiento 2 se dé la carbonatación del producto entre el rango de 90grados celsius y 100 grados celsius, y en la etapa de enfriamiento el producto llegue a una temperatura menor a 60 grados celsius.

Durante cada etapa se midieron los siguientes parámetros: tiempo, humedad de entrada del producto, caudal de aire, temperatura del aire y producto; presión del producto, atomizado, filtro del producto, filtro de entrada y filtro de salida.

Para la evaluación de la determinación de los parámetros óptimos de control, se hicieron pruebas con 15 lotes a los cuales se les varió el porcentaje de apertura de la válvulas, quedando como establecido 85 por ciento de apertura de válvula ingreso de aire y de 15 por ciento de apertura de válvula salida de aire para la etapa de carga; y de 40 por ciento de apertura de válvula ingreso de aire de y 20 por ciento de apertura de válvula salida de aire para la etapa de descarga. También se varió el caudal del aire de entrada y se estableció en 3500 metro cúbico por hora.

Otro parámetro que se varió durante la evaluación fue la temperatura de aire de entrada, quedando establecida de la siguiente manera según su función: precalentamiento 60 grados celsius, carga 70 grados celsius, calentamiento 1 y 2 150 grados celsius, enfriamiento 10 grados celsius, descarga 1, 2 y 3 45 grados celsius.

De los 15 lotes evaluados se descartaron los primeros 5 lotes, ya que al medir el porcentaje de carbonatación, rendimiento, humedad relativa del producto y temperatura del producto, no cumplía o tendía a estar muy cerca del límite superior de las especificaciones establecidas para el bicarbonato de sodio por la empresa.

Por medio de los 10 lotes cuyo porcentaje de carbonatación se encuentra entre los límites de aceptación, se realizaron los cálculos de promedio y desviación estándar, para así poder calcular los límites del proceso, siendo el límite superior el promedio mas tres desviaciones estándar, el límite inferior el promedio menos tres desviaciones estándar y el valor promedio como el objetivo (Tabla V).

La capacidad del proceso se determinó en base a los resultados obtenidos en el control de calidad del producto de acuerdo a las especificaciones establecidas por la empresa para el bicarbonato de sodio carbonatado, de modo que, con los parámetros determinados en la evaluación del proceso, éste se encuentra controlado, ya que el coeficiente de capacidad de proceso es mayor a 1,0.

En los gráficos de control de cada variable dependiente (ver anexos), se observa el comportamiento de los lotes y su tendencia con respecto a los límites de capacidad del proceso, el objetivo y los límites de medición del

equipo, los cuales muestran que a partir de lote número once se estabiliza dentro del rango de la capacidad del proceso, ubicándose éstos alrededor del objetivo.

En los gráficos de control, se establecieron diferentes límites. El límite superior e inferior indican los límites de medición del equipo, mientras que el promedio $\pm 3 s$ (3 desviaciones estándar) son los nuevos límites establecidos.

CONCLUSIONES

1. Los parámetros de control en el proceso de carbonatación de bicarbonato de sodio en un secador de cama fluida quedaron determinados de la siguiente manera:
 - Temperatura del producto: 371 ± 1 K
 - Temperatura de aire de salida: 366 ± 1 K
 - Presión de producto: $2\,951 \pm 359$ Pa
 - Presión de filtro de producto: $3\,395 \pm 1\,623$ Pa
 - Presión de atomizado: $2,1 \pm 0,3$ Pa
 - Presión de filtro de entrada 1: $59,3 \pm 13,7$ Pa
 - Presión de filtro de entrada 2: 285 ± 111 Pa
 - Presión de filtro de salida 1: 175 ± 49 Pa
2. Con los nuevos parámetros establecidos, el proceso de carbonatación se encuentra controlado, ya que el coeficiente de la capacidad del proceso es de 1,00 para el porcentaje de carbonatación y de 1,43 para el porcentaje de rendimiento.

RECOMENDACIONES

1. Instalar un serpentín de mayor capacidad de manera que la temperatura del aire de entrada y por ende la temperatura del producto aumenten y así reducir el tiempo de carbonatación.
2. Colocar una bomba de vacío en la salida, para que disminuya el tiempo en la etapa de descarga del proceso y así ser más eficiente el tiempo en dicha etapa.

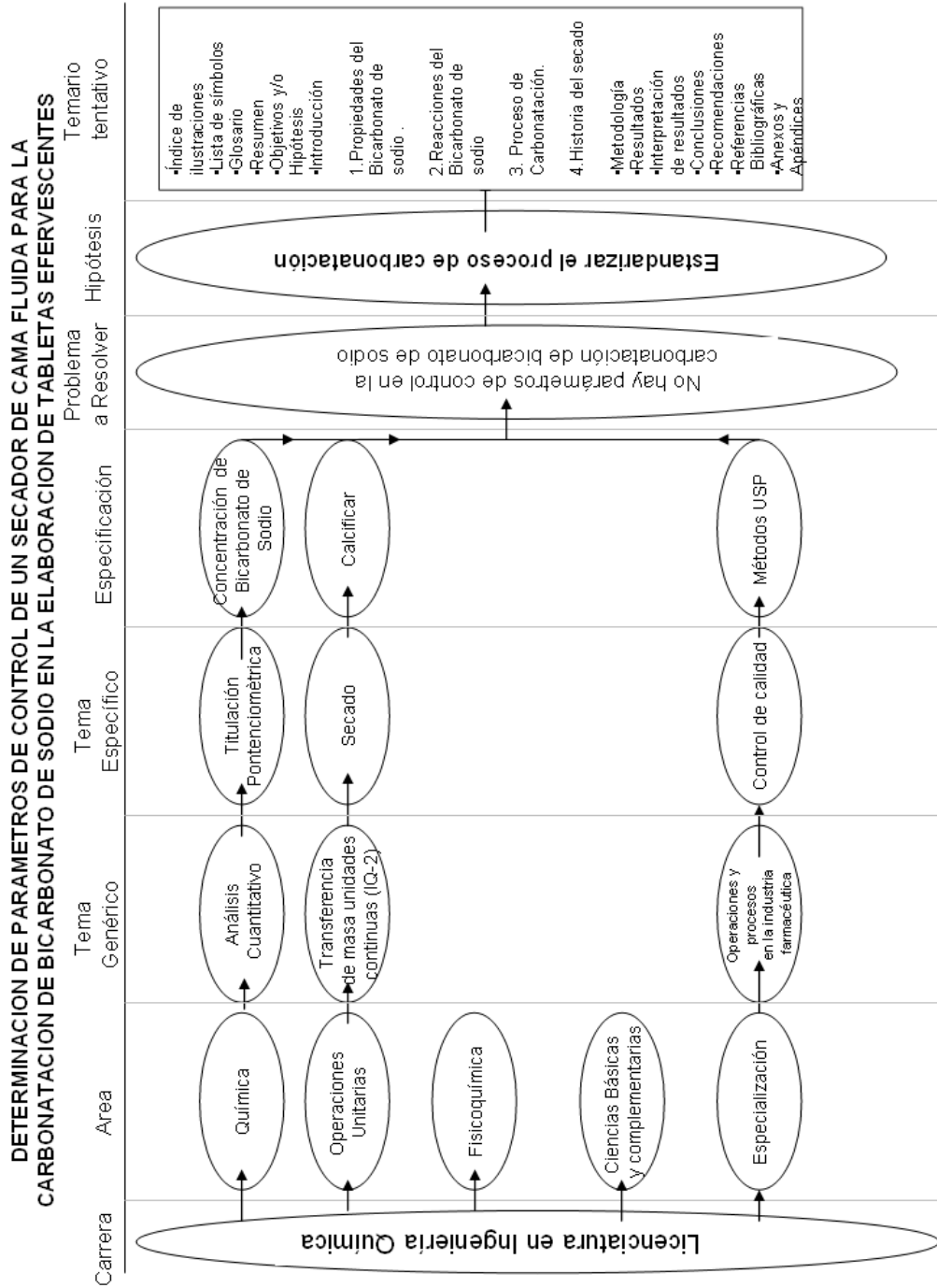
BIBLIOGRAFÍA

1. DAY, R. A.; UNDERWOOD, A. L. *Química analítica cuantitativa*. 5ª ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1989. p 226 – 229.
2. BAYER. *Glatt fluid bed granulator WSG CD 200 PV*. Instruction manual version 2.0. Brasil: Bayer Brasilien, 2009. p 15 – 17.
3. HIRANO, H., et al. *Sodium hydrogencarbonate crystal particles having low caking property and process for producing them* [en línea]. *European patent application*, 2007. Disponible en web: <http://www.patentstorm.us/patents/7485369/description.html>. [Fecha de consulta: 29 mayo 2010].
4. GENARO. *Remington: The Science and practice of Pharmacy*. 19th ed., Volume II. Estados Unidos: Mack Publishing Company, 1995. p 889, 1414.
5. SHAW, Fred V. *Secadores* [en línea]. GEA Process engineering S.A de C.V. GEA. Estados Unidos, 2009. Disponible en web: www.gea-niro.com.mx. [Fecha de consulta: 25 agosto 2010].
6. The Merck Index. *An encyclopedia of chemicals, drugs and biologicals*. 12ª ed. Estados Unidos: MERCK& CO., Whitehouse Station, NJ, 1996. p 1471 – 1473

7. United States pharmacopeia. *National formulary* [CD-ROM], USP 34 ed. NF 29 ed. Estados Unidos, 2010.

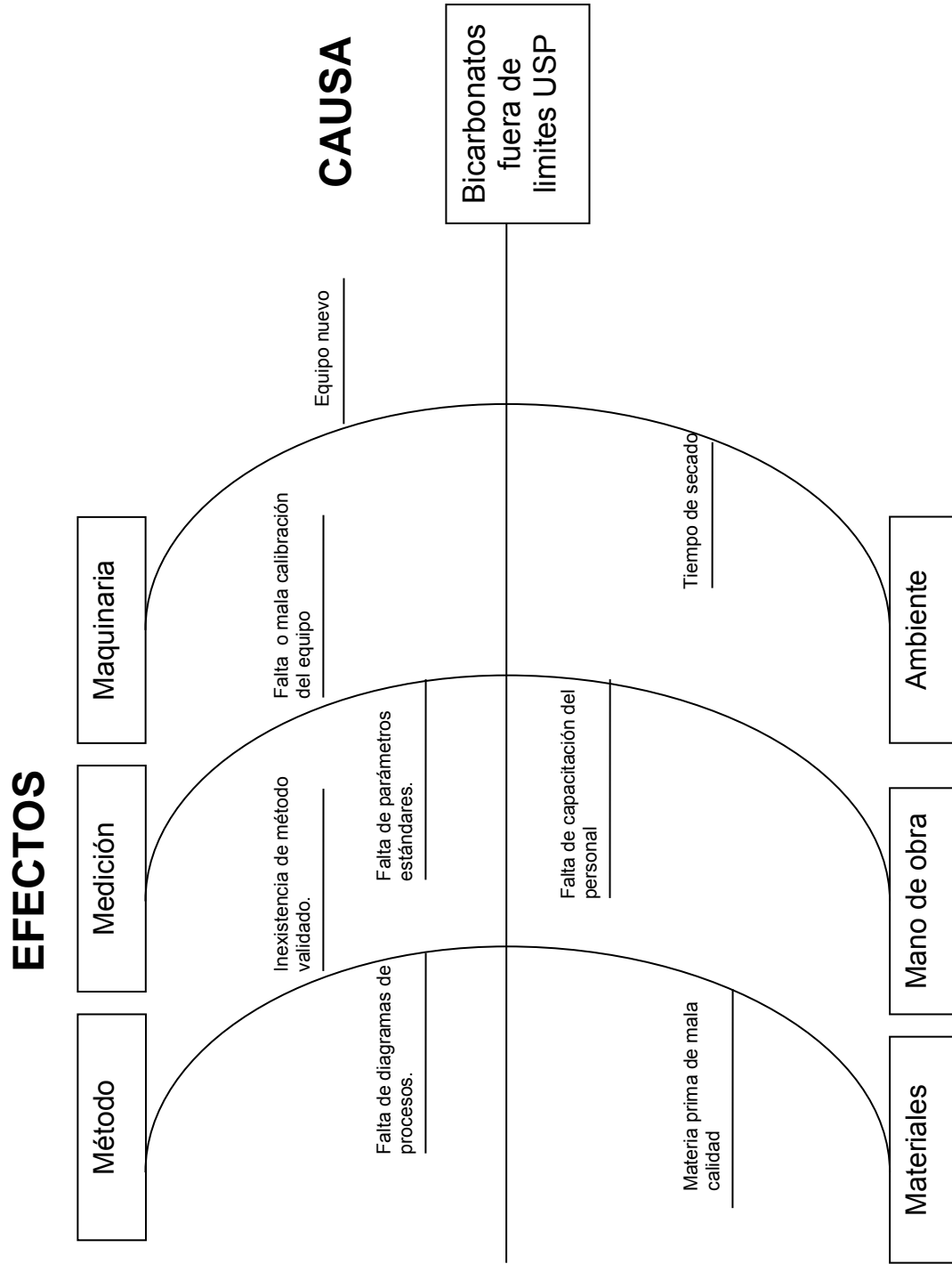
APÉNDICES

APENDICE 1. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

APENDICE 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Tabla I. Datos crudos lote 01

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)	
L01					Precalentamiento	1 074	8,75	357,55	2 245	349,53	341,98	76	401	2	42	205	139	
					Carga	3 722	8,38	373,42	358	319,54	323,38	1 788	231	2	39	14	172	
					Calentamiento 1	1 872	7,71	408,35	2 844	347,97	354,19	344	2 652	2	56	306	168	
	641,4	88,5	3,8	32,1	Calentamiento 2	2 402	8,11	415,66	2 922	367,85	372,24	3 330	3 005	2	59	321	172	
					Enfriamiento	1 228	8,66	332,48	2 953	353,69	352,52	3 315	2 990	2	66	264	228	
					Descarga 1	2 933	8,69	313,29	2 163	321,87	320,63	3 102	3 093	2	48	184	150	
					Descarga 2	604	8,73	313,20	1 951	313,35	313,53	25	955	2	44	209	304	
					Descarga 3													

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla II. Datos crudos lote 02

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)	
L02	647,0	87,4	3,9	40,2	Pre calentamiento	1 178	12,8	324,33	2 878	321,99	322,25	122	0	1,78	51,1	256	152	
					Carga	2 712	12,5	342,30	701	305,80	308,87	2 018	129	2,2	44,5	11,4	166	
					Calentamiento 1	1 358	13,4	395,90	2 843	334,26	340,17	3 407	2 085	2,2	58	297	156	
					Calentamiento 2	3 481	13,4	414,37	2 969	367,00	371,13	3 202	2 720	2,2	47,7	302	180	
					Enfriamiento	1 236	13,2	332,08	3 014	352,54	351,33	2 978	2 544	2,2	51,4	217	183	
					Descarga 1	3 279	14,4	318,14	2 521	322,66	321,97	2 639	2 986	2,2	53,8	229	165	
					Descarga 2	720	14,8	318,19	1 834	323,13	317,55	74,9	574	2,2	48,4	176	372	
					Descarga 3													

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla III. Datos crudos lote 03

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)			
L03	659,2	88,5	4,1	34,2	Precalentamiento	1 151	11,4	305,24	1 249	303,83	302,19	114	109	1	45	83	152			
					Carga	3 328	11,8	342,20	767	306,53	311,27	2 303	393	5	171	2	50	5	171	
					Calentamiento 1	1 617	11,9	396,05	2 751	335,81	341,53	3 382	2 610	2	147	2	48	269	147	
					Calentamiento 2	3 481	11,6	414,31	2 860	366,03	370,54	2 999	2 839	2	175	2	51	260	260	175
					Enfriamiento		11,8	334,86	2 738	352,63	351,92	3 010	2 765	2	187	2	60	184	184	187
					Descarga 1	4 157	11,5	318,25	2 564	321,72	321,33	2 720	4 533	2	166	2	53	196	196	166
					Descarga 2	362	11,7	317,94	1 868	316,98	317,28	128	1 430	2	165	2	51	155	155	165
					Descarga 3	544	11,7	318,13	1 678	316,46	317,13	10	63	2	260	2	50	103	103	260

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla IV. Datos crudos lote 04

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L04					Pre calentamiento	4 115	12	320,50	1 669	318,57	316,07	240	240	1,87	48,6	137	158
					Carga	2 574	12,1	340,99	621	305,17	307,81	221	221	2,2	46	0	147
					Calentamiento 1	1 455	12,7	397,69	2 947	335,36	341,00	3 339	2 563	2,2	51,5	282	202
	657,6	87,4	4,3	35,7	Calentamiento 2	3 482	12,6	413,85	3 032	365,23	370,06	3 251	3 251	2,2	56,8	255	204
					Enfriamiento	1 249	12,2	332,69	3 117	353,08	352,28	3 156	3 260	2,2	70,3	190	189
					Descarga 1	2 782	12	318,08	2 251	323,54	322,72	2 737	4 572	2,2	54	176	172
					Descarga 2	181	11,9	318,23	1 614	317,49	317,91	168	1 685	2,2	50,8	135	488
					Descarga 3	552	12,1	318,23	1 796	316,94	317,67	0	0	2,2	48,3	130	237

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla V. Datos crudos lote 05

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L05					Pre calentamiento	688	13,4	327,07	3 089	322,72	316,77	821	435	2	60	327	159
					Carga	4 045	13,2	342,15	682	305,54	309,71	2 245	443	2	51	18	166
					Calentamiento 1	1 367	13,2	397,07	2 967	334,84	341,42	3 149	3 620	2	59	255	156
	643,4	87,8	4,4	36,1	Calentamiento 2	3 722	13	413,76	2 810	366,26	371,01	2 984	3 864	2	60	248	150
					Enfriamiento	1 166	12,9	331,75	2 712	353,73	352,56	2 596	4 019	2	54	218	181
					Descarga 1	2 195	12,8	318,05	1 863	325,57	324,60	3 247	2 417	2	57	131	159
					Descarga 2	422	12,8	318,29	1 383	318,28	318,69	988	814	2	54	109	164
					Descarga 3	1644	12,7	318,22	1 451	318,86	317,86	0	0	2	53	105	219

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla VI. Datos crudos lote 06

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L06					Pre calentamiento	624	12,2	325,36	2 948	319,34	313,90	1 345	820	2,1	54,6	272	168
					Carga	3 046	12,3	342,25	95,4	304,78	308,62	2 437	465	2,2	48,4	6,92	172
					Calentamiento 1	1 368	12,7	395,83	2 811	334,34	340,77	3 159	3 418	2,2	50,7	298	190
	660,0	87,4	2,2	36,6	Calentamiento 2	3 841	12,5	414,20	2 604	366,21	371,10	2 807	3 605	2,2	55,2	294	187
					Enfriamiento	1 222	12,1	332,54	2 638	353,29	352,29	2 682	3 880	2,2	75,4	259	212
					Descarga 1	2 684	10,8	318,12	2 371	323,38	322,30	2 449	5 884	2,2	61,7	269	180
					Descarga 2	362	10,4	318,16	1 562	317,37	317,79	555	1711	2,2	56,4	194	176
					Descarga 3	562	10,6	318,21	1 547	316,55	317,45	101	104	2,2	55,8	188	182

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla VII. Datos crudos lote 07

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L07					Precaalentamiento	1 022	13,4	312,83	1 484	310,75	310,84	1 240	463	2	55	171	161
					Carga	3 269	13,2	342,55	110	306,04	310,51	2 356	500	2	51	46	167
					Calentamiento 1	1 353	13,3	397,01	2 682	334,3	341,26	3 155	3 374	2	65	319	168
	645,8	85,8	3,6	38,2	Calentamiento 2	3 961	13	414,71	2 786	366,17	371,16	2 916	3 341	2	62	283	171
					Enfriamiento	1 193	12,7	332,81	2 823	352,9	351,88	2 931	4 212	2	67	232	155
					Descarga 1	2 052	12,9	318,13	2 205	324,75	323,6	2 792	4 938	2	54	193	183
					Descarga 2	362	12,9	318,24	1 510	318,02	318,34	480	1 691	2	54	150	167
					Descarga 3	1 088	13	318,16	1 569	317,03	317,83	278	176	2	54	150	152

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla VIII. Datos crudos lote 08

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L08					Pre calentamiento	1 083	12,7	328,78	2 366	323,94	324,12	6 731	643	2,14	54,7	230	160
					Carga	2 809	12,4	342,15	50,3	305,72	310,81	3 194	343	2,2	50,5	42,3	195
					Calentamiento 1	1 368	12	396,36	2 727	334,60	341,19	3 113	3 327	2,2	74,2	387	200
	651,4	86,0	1,0	39,2	Calentamiento 2	3 961	12,4	414,39	2 712	365,97	370,86	2 928	3 987	2,2	60	349	191
					Enfriamiento	1 223	12,6	332,63	2 829	353,12	352,09	2 843	4 391	2,2	64,6	279	209
					Descarga 1	3 228	12,8	318,17	1 993	323,62	322,70	2 949	3 874	2,2	61,6	239	172
					Descarga 2	361	12,9	318,24	2 081	317,44	317,78	194	1 320	2,2	57,9	241	159
					Descarga 3	832	12,8	318,17	1 565	316,92	317,82	145	152	2,2	53,8	181	158

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla IX. Datos crudos lote 09

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L09	645,2	86,4	2,2	37,2	Pre calentamiento	645	12,5	325,78	2 840	321,32	321,23	6 250	818	2	52	259	137
					Carga	4 921	12,3	342,58	75,9	308,99	314,58	2 514	788	2	47	5	129
					Calentamiento 1	1 327	12,1	396,88	2 794	336,79	343,45	3 116	4 175	2	56	318	168
					Calentamiento 2	3 961	11,5	414,48	2 797	366,14	371,24	3 044	3 985	2	60	330	177
					Enfriamiento	1 197	11,1	333,23	2 930	354,18	353,1	3 041	4 669	2	54	259	212
					Descarga 1	3 002	11,1	318,13	2 060	323,6	322,64	2 896	4 429	2	55	249	175
					Descarga 2	361	11,3	318,24	145	317,73	318,05	748	1 483	2	57	206	176
					Descarga 3	1 491	11,9	318,25	1 415	317,11	317,86	0	0	2	54	188	207

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla X. Datos crudos lote 10

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatacion	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L10					Pre calentamiento	1 056	12,3	306,12	1 002	303,31	301,94	2 416	283	1,54	45,7	79,5	143
					Carga	3 713	12,4	342,33	191	304,74	311,95	4 939	487	2,2	44,7	2,82	144
					Calentamiento 1	1 672	12,4	390,72	2 251	329,57	336,52	3 756	2 485	2,2	49,7	219	168
	652,4	86,0	4,2	39,4	Calentamiento 2	3 961	12,5	413,87	2 783	365,78	370,92	2 967	3 888	2,2	55,1	289	158
					Enfriamiento	1 153	12,7	333,10	2 613	353,48	352,54	2 340	3 592	2,2	67,9	202	172
					Descarga 1	2 336	12,5	318,11	1 705	325,51	324,04	3 055	4 206	2,2	52,1	151	164
					Descarga 2	362	12,4	318,29	1 282	318,43	318,72	1 357	1 404	2,2	56,2	134	162
					Descarga 3	3 725	11,8	318,22	1 460	316,69	317,69	230	175	2,2	53,1	152	188

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla XI. Datos crudos lote 11

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L11					Pre calentamiento	3 301	12,4	296,22	252	296,32	295,86	10	0	0	46	22	156
					Carga	2 372	11,8	327,24	372	304,63	304,04	1 032	52	2	46	35	161
					Calentamiento 1	1 447	12,5	391,37	2 845	332,36	338,42	2 999	2 029	2	58	274	182
	644,0	85,2	2,7	22,4	Calentamiento 2	3 961	13,3	411,67	2 849	366,95	370,92	3 153	2 281	2	56	263	188
					Enfriamiento	1 161	13,3	330,33	2 973	353,35	351,98	3 412	2 573	2	55	176	171
					Descarga 1	2 579	13,3	318,02	2 610	324,21	323,3	2 558	3 438	2	57	200	153
					Descarga 2	481	13,1	318,19	1 807	318,52	318,86	131	612	2	50	120	150
					Descarga 3	1 045	13,1	318,03	1 784	317,67	318,32	45	82	2	51	137	199

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla XII. Datos crudos lote 12

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L12					Pre calentamiento	560	10,6	325,92	3 075	322,39	315,89	267	470	2,2	50,1	224	142
					Carga	3 055	10,7	342,49	709	307,10	312,84	2 259	199	2,2	44,6	9,67	157
					Calentamiento 1	1 475	10,7	394,82	2 855	335,35	341,67	3 131	2 522	2,2	50,4	253	152
	644,0	86,0	3,3	22,6	Calentamiento 2	3 961	10,8	411,89	2 808	365,86	370,25	3 099	2 980	2,2	56,3	236	201
					Enfriamiento	1 243	10,8	330,02	2 957	352,44	351,36	2 890	2 532	2,2	69,4	235	190
					Descarga 1	1 781	10,8	317,99	2 594	325,58	324,44	3 304	3 567	2,2	52,8	203	149
					Descarga 2	481	10,8	318,20	1 533	318,69	318,75	1 129	1 137	2,2	50,3	123	162
					Descarga 3	1 305	11	318,27	1 234	317,17	317,94	6,57	16	2,2	51	100	277

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla XIII. Datos crudos lote 13

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)	
L13					Pre calentamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
					Carga	3 059	10.9	340.96	38.4	308.46	313.91	2 098	222	2	49	10	181	
					Calentamiento 1	1 430	10.8	395.15	2 815	335.72	341.85	3 125	2 363	2	60	288	167	
	646.8	86.9	3.5	22.8	Calentamiento 2	3 960	10.6	412.7	2 887	365.97	370.44	2 958	2 950	2	70	303	168	
					Enfriamiento	1 274	10.6	331.23	2 919	352.75	351.78	2 971	2 642	2	74	213	199	
					Descarga 1	1 906	11.9	318.03	2 606	324.96	323.84	3 089	3 728	2	58	221	156	
					Descarga 2	362	13.4	318.14	1 620	318.14	318.21	580	1 325	2	54	144	168	
					Descarga 3	1 131	13	318.25	1 392	316.95	317.69	0	0	0	2	54	104	187

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

Tabla XIV. Datos crudos lote 14

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L14					Pre calentamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
					Carga	3 056	12,8	341,86	115	306,84	311,77	2 841	306	2,2	49,8	14,8	158
					Calentamiento 1	1 373	12,7	395,13	2 836	335,57	341,81	3 090	2 839	2,2	57	305	132
	650,6	86,0	4,8	22,9	Calentamiento 2	3 961	12,9	412,26	2 816	365,56	370,16	2 818	3 580	2,2	61,6	270	161
					Enfriamiento	1 128	13,3	333,01	2 729	353,05	351,71	2 458	4 049	2,2	61,4	208	176
					Descarga 1	1 831	13,6	318,19	2 437	326,00	324,47	2 741	4 074	2,2	57,4	206	169
					Descarga 2	361	13,4	318,16	1 564	318,56	318,61	538	1 619	2,2	54,2	133	217
					Descarga 3	726	13,4	318,26	1 098	317,58	318,13	0	0	2,2	52,7	93,9	360

Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

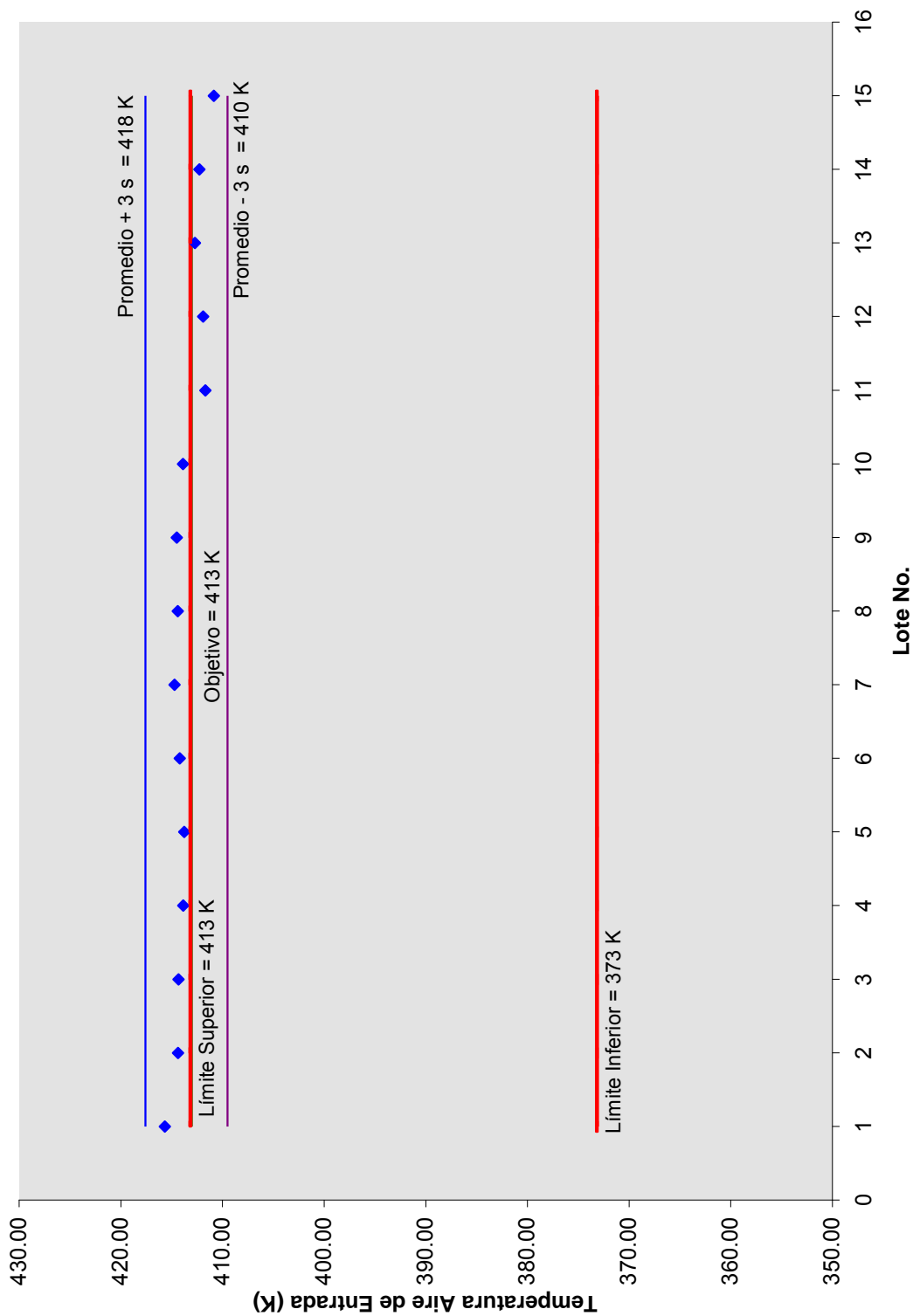
Tabla XV. Datos crudos lote 15

Lote	Rendimiento (kg)	% Carbonatación	% Humedad relativa	Temperatura (K)	Etapas	Tiempo (s)	Humedad absoluta de entrada (g/kg)	Temperatura de aire de entrada (K)	Caudal aire entrada (m³/s)	Temperatura de aire de salida (K)	Temperatura de producto (K)	Presión de producto (Pa)	Presión de filtro de producto (Pa)	Presión de atomizado (Pa)	Presión de filtro de entrada 1 (Pa)	Presión de filtro de entrada 2 (Pa)	Presión de filtro de salida 1 (Pa)
L15					Pre calentamiento	6 018	11,6	326,11	3 114	321,2	318,69	4057	1 331	2	51	210	141
					Carga	2 437	11,6	342,44	831	306,19	311,48	3 131	465	2	43	8	156
					Calentamiento 1	1 524	11,1	395,28	2 738	335,21	341,68	3 246	2 530	2	52	203	173
	654,2	85,8	5,0	23,7	Calentamiento 2	3 782	11,1	410,85	2 686	365,65	370,49	2 819	3 350	2	57	234	152
					Enfriamiento	1 232	11,6	329,22	2 784	352,75	351,85	2 909	2 922	2	77	198	207
					Descarga 1	1 882	11,9	317,94	2 439	325,4	324,36	3 094	4 172	2	60	174	159
					Descarga 2	361	12,3	318,23	1 603	318,75	318,93	560	1 540	2	53	132	167
					Descarga 3	845	12,4	318,3	1 134	317,64	318,41	13	31	2	52	84	312

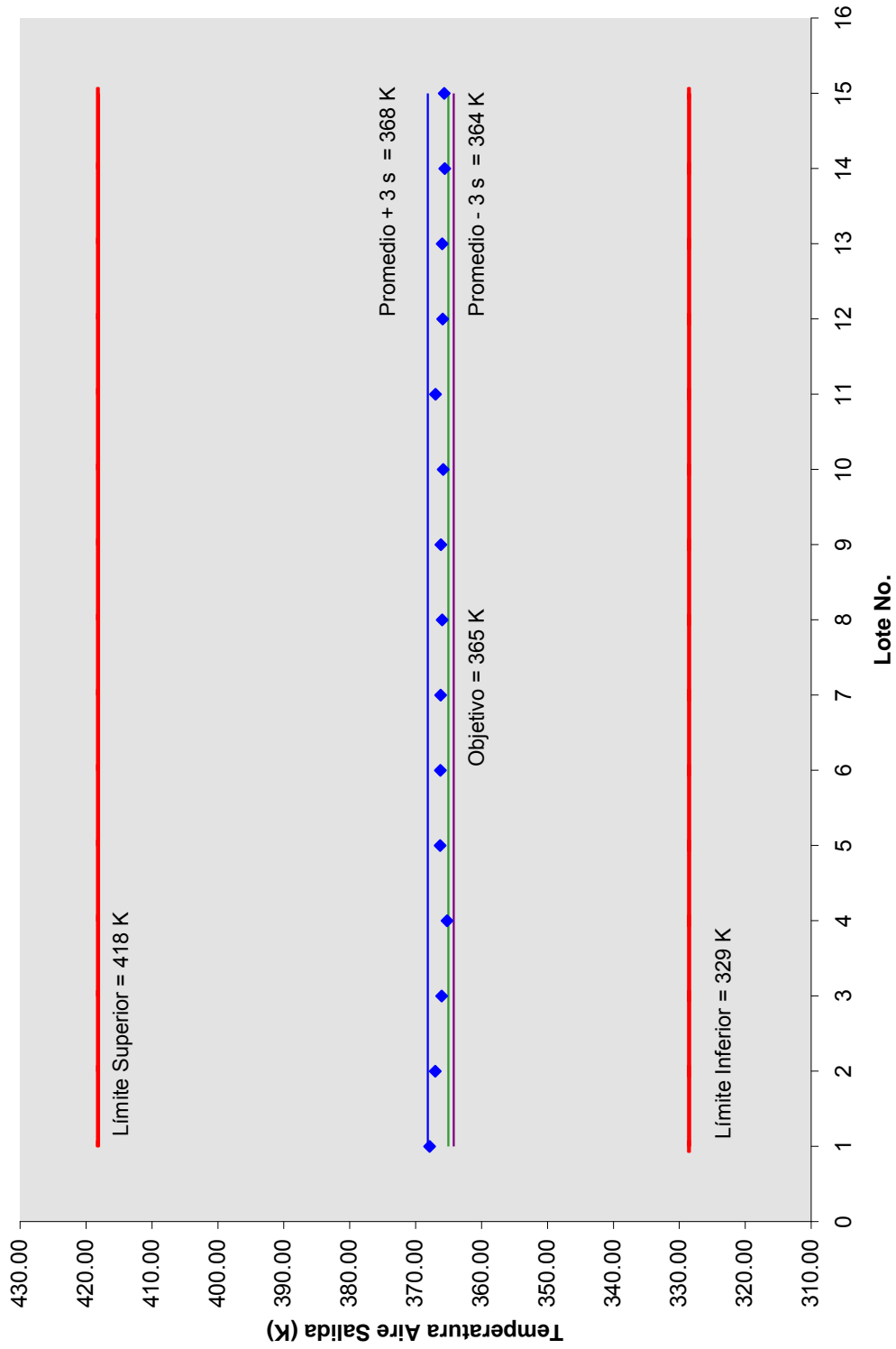
Fuente: datos experimentales.

Nota: la masa inicial es de 700 kg.

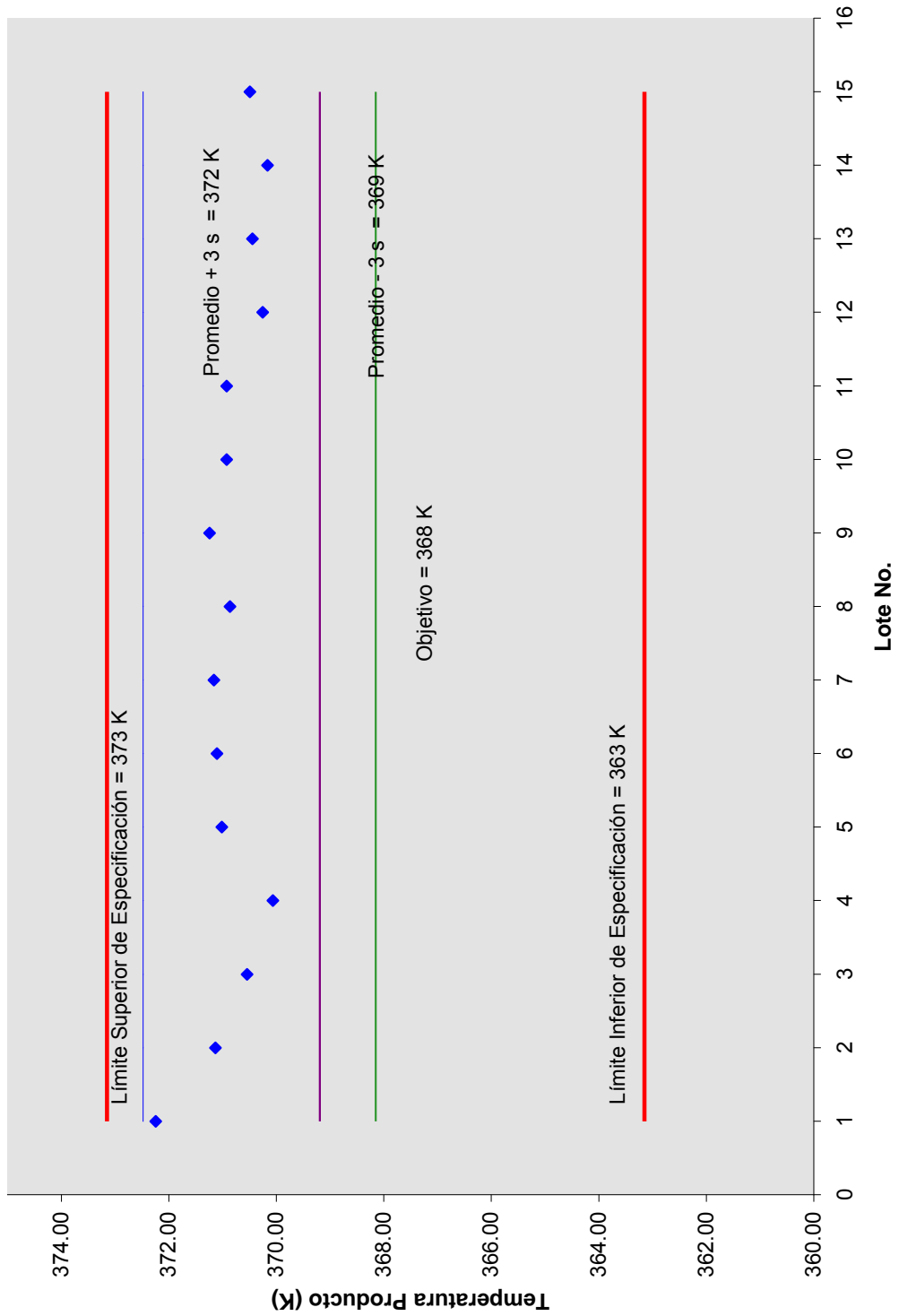
Gráfica 1. Temperatura del aire de entrada



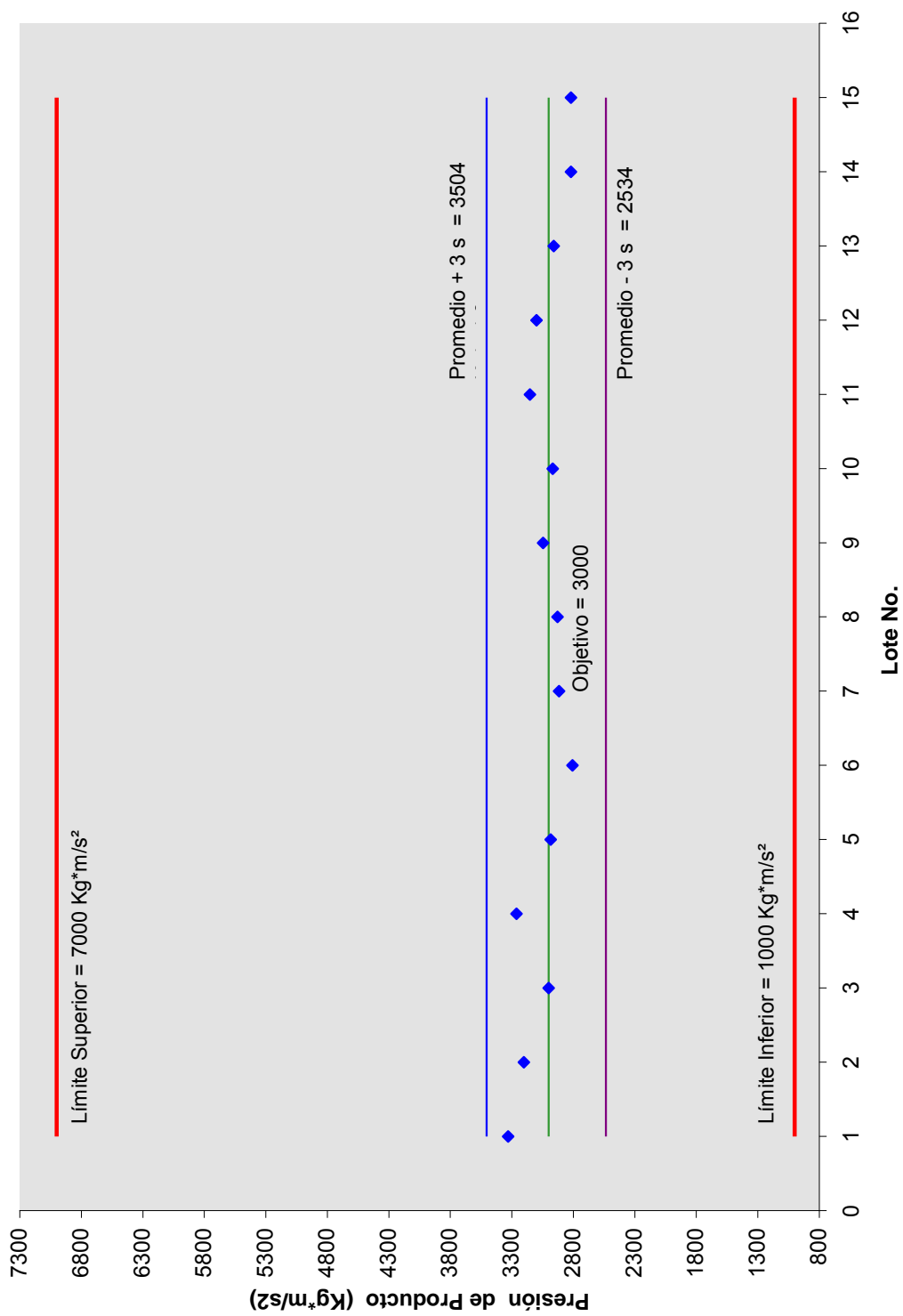
Gráfica 2. Temperatura del aire de salida



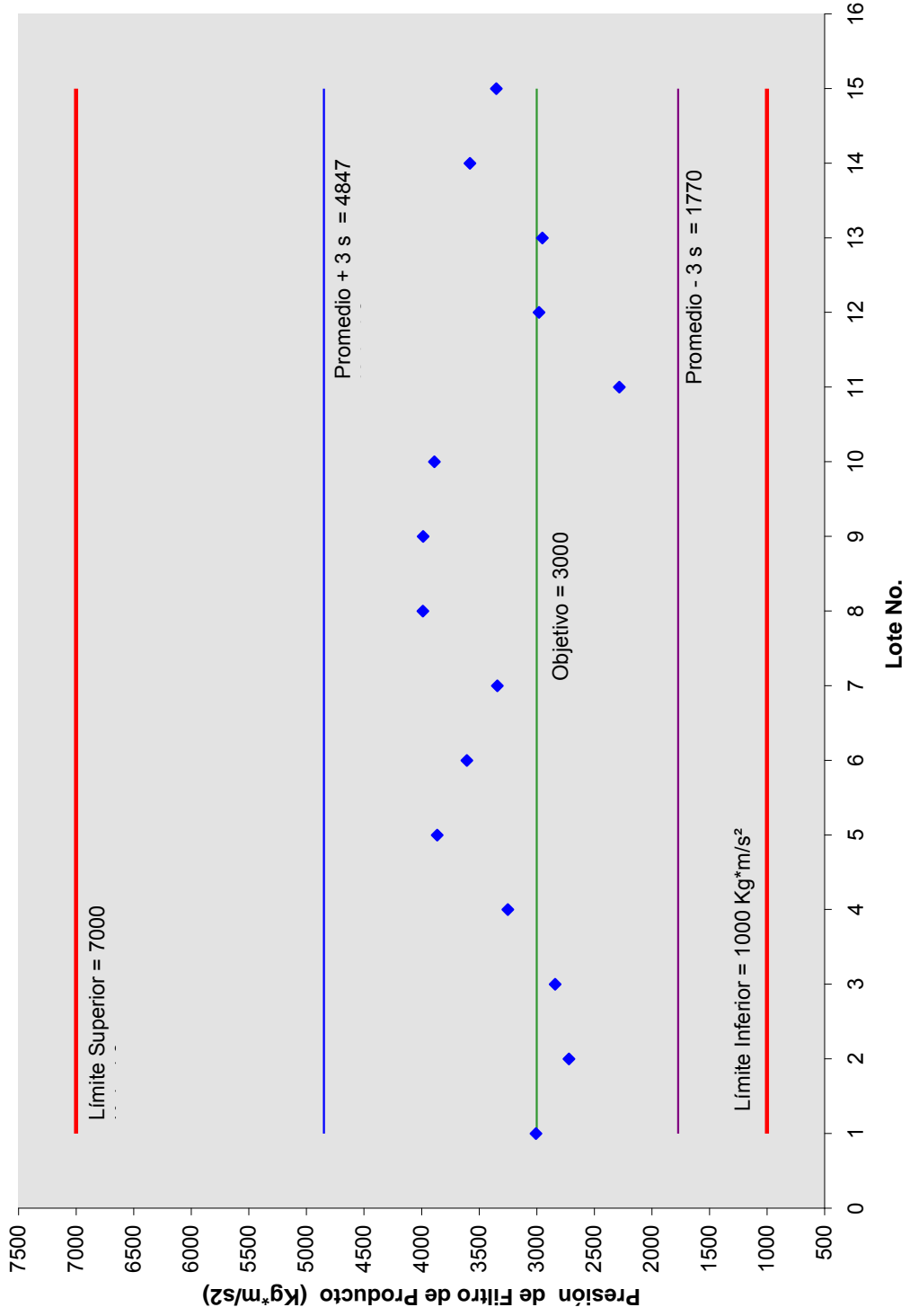
Gráfica 3. Temperatura del producto



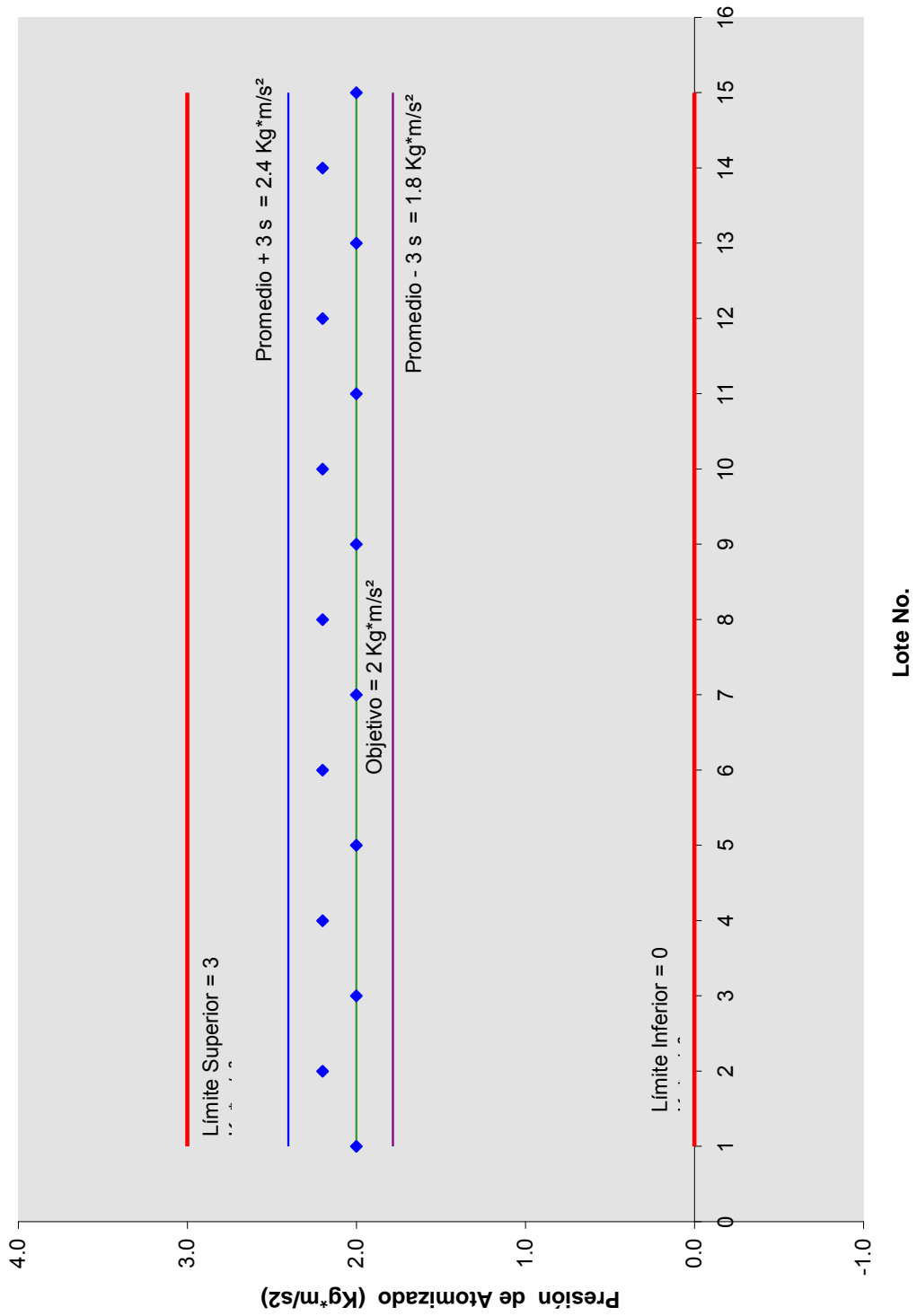
Gráfica 4. Presión del producto



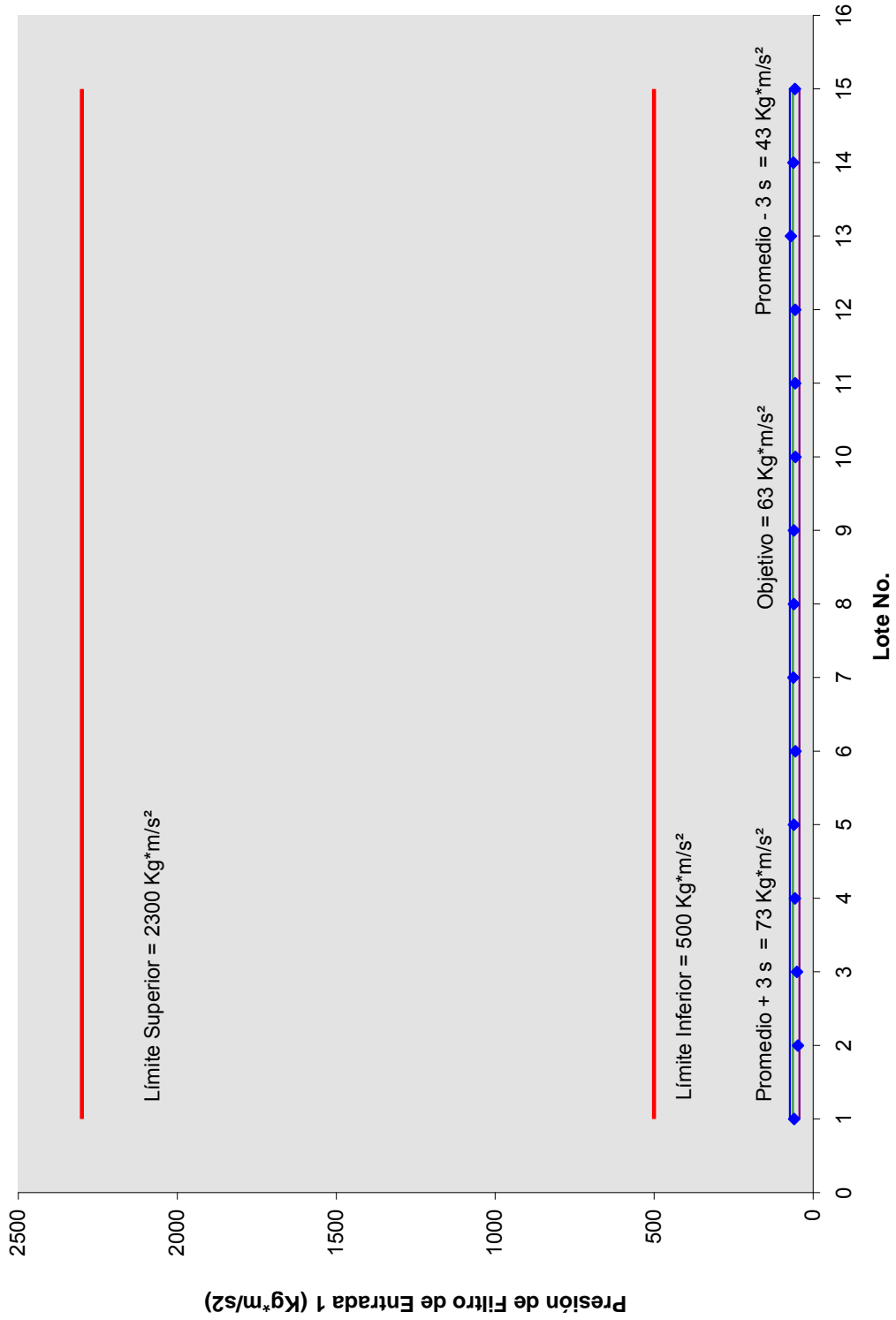
Gráfica 5. Presión de filtro del producto



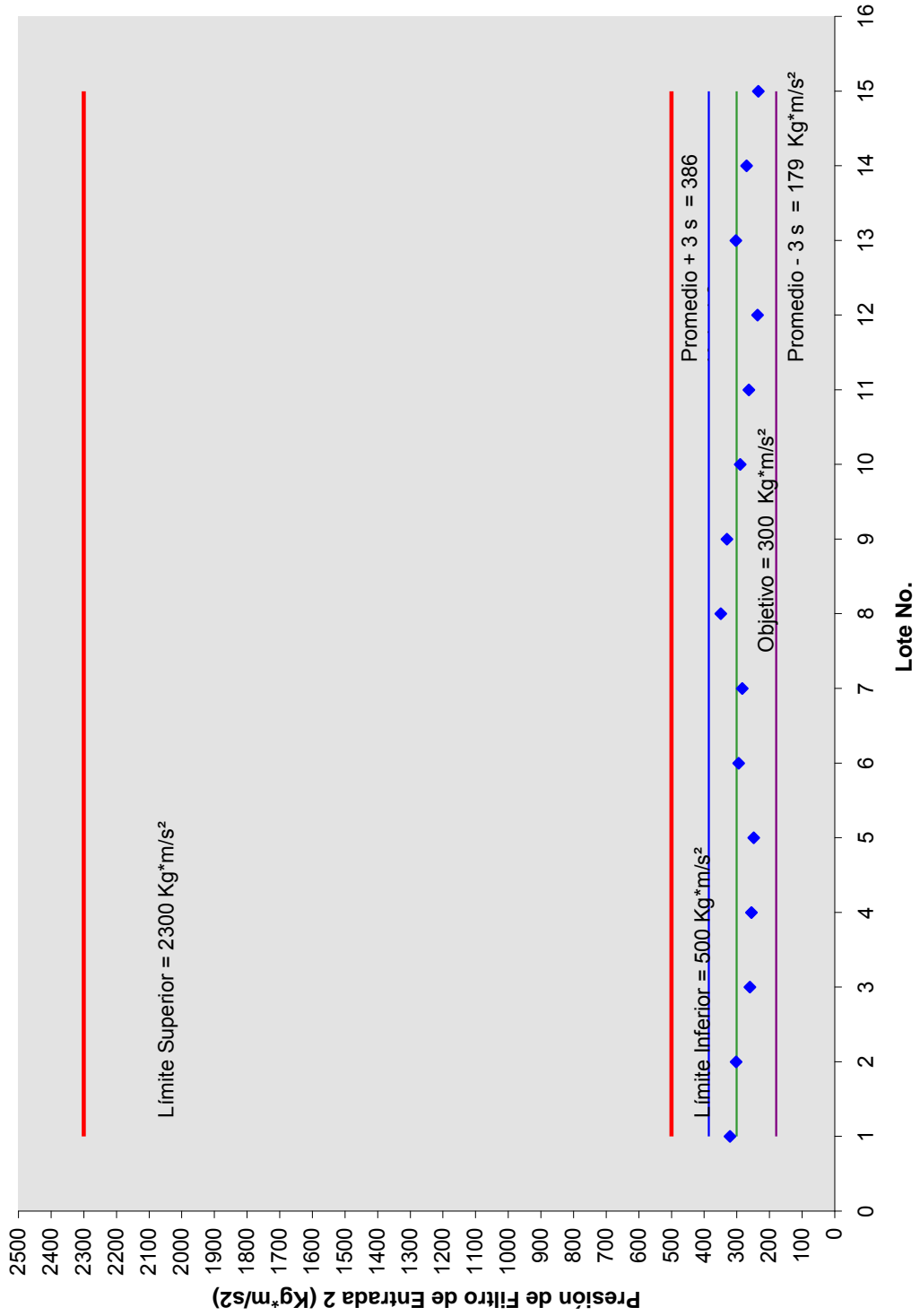
Gráfica 6. Presión de atomizado



Gráfica 7. Presión de filtro de entrada 1



Gráfica 8. Presión de filtro de entrada 2



Gráfica 9. Presión de filtro de salida 1

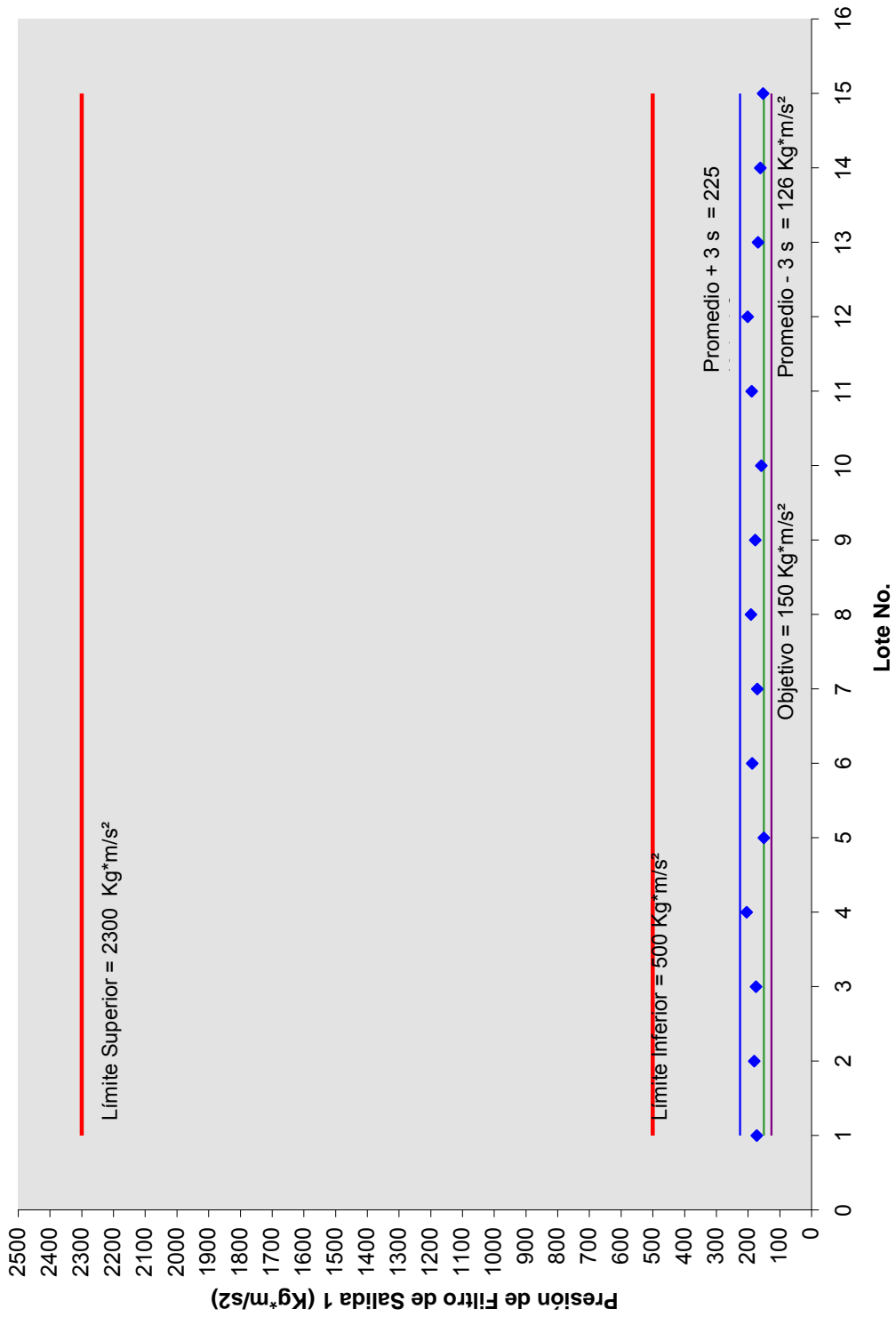
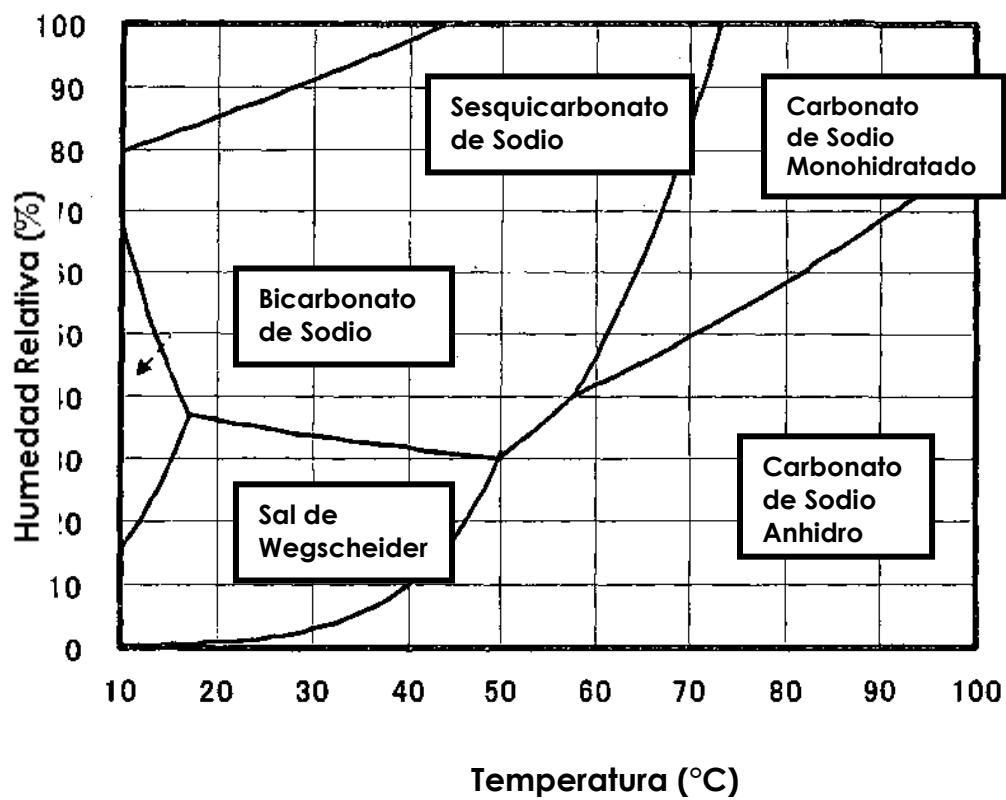


Figura 4. Diagrama de fases del bicarbonato de sodio



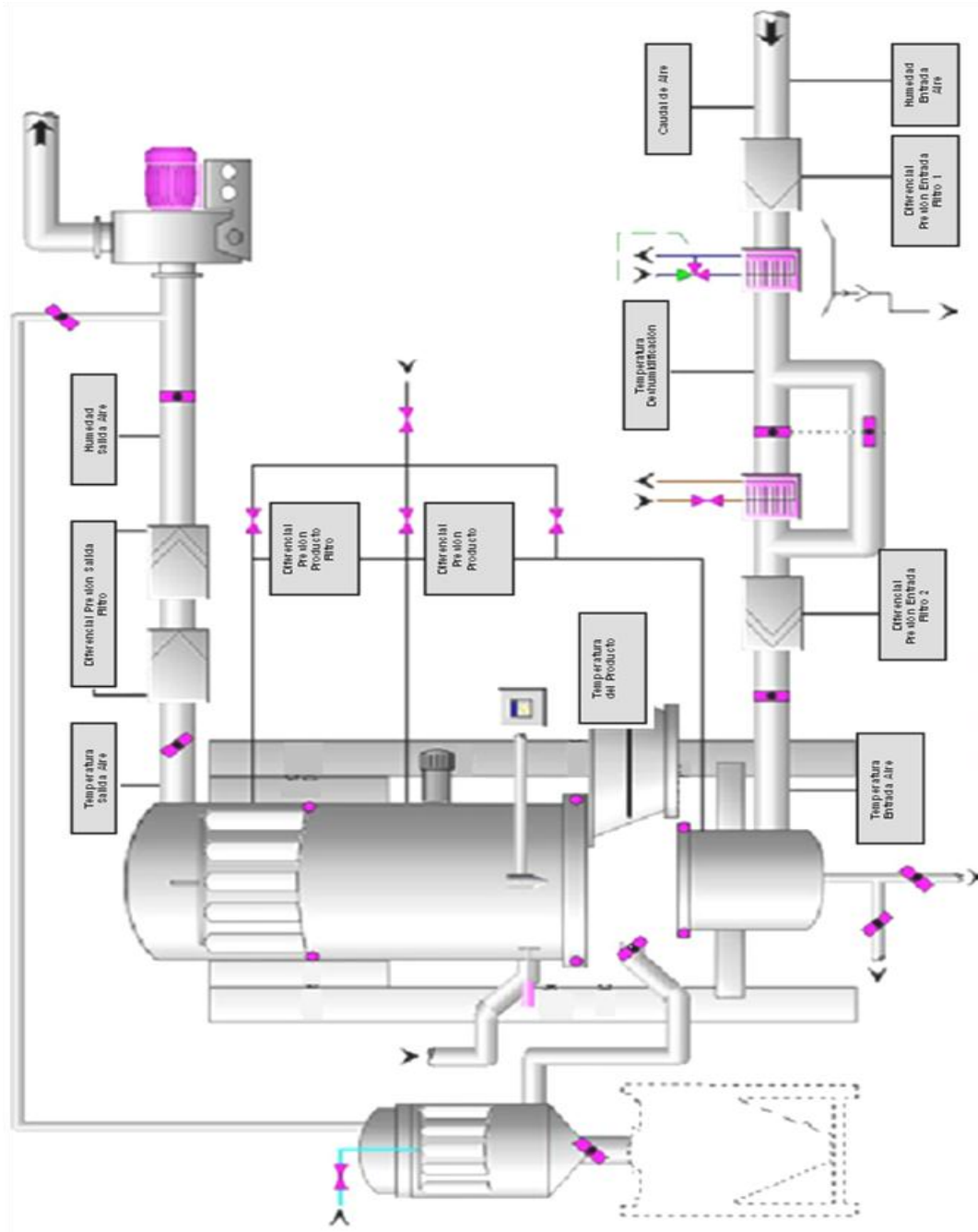
Fuente: HIRANO, H. 2007.

Figura 5: **Diagrama de Flujo del Proceso**



Fuente: Instruction manual. 2009.

Figura 6. Diagrama del equipo



Fuente: Instruction manual. 2009.

