ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Optimización de un Proceso de Congelación en Patacón Congelado IQF"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERA DE ALIMENTOS

Presentada por:

Sara María Villacreses Zambrano

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2009

A G R A D E C I M I E N T O

A **DIOS**, a todas las personas que de un modo u otro colaboraron en la realización de esta tesis y especialmente a la Ing Priscila Castillo, Directora de Tesis, por su invaluable ayuda.

D E D I C A T O R I A

Con mucho cariño a mis padres, Alfredo y Rosa, por su apoyo incondicional y sus consejos. A mis hermanos José y Diego. A todas las personas que han formado parte de mi vida, que de un modo u otro hicieron posible la realización de este trabajo, mi familia, mis amigas. Y a una persona muy especial en mi vida, Roberto, por su apoyo incondicional y por creer siempre en mí.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Priscila Castillo S.
DIRECTORA DE TESIS

Ing. Patricio Cáceres C.
VOCAL

Ing. Ana María Costa V.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

_____

Sara Villacreses Zambrano

RESUMEN

El objetivo de ésta tesis es la evaluación de un proceso de elaboración de patacón congelado IQF en una industria y la mejora del mismo. Para esto se realizó un análisis de la situación actual presentada mediante la determinación de causas que producen las fallas en el proceso.

Una vez determinada la etapa donde se presentó el mayor porcentaje de defectos, se analizaron los motivos que llevan a obtener un producto de menor calidad.

Para poder realizar un análisis en el proceso de congelación se tomaron en cuenta tres parámetros importantes en la operación del túnel de congelación, estas variables fueron: velocidad de aire dentro del túnel, temperatura de entrada del producto al mismo y flujo del producto. Se realizó un monitoreo de datos basados en estos parámetros para determinar y caracterizar el comportamiento del túnel IQF. Este análisis permitió conocer los diferentes casos que se presentaban a diario en el mismo y como se relacionaban éstos entre sí.

Una vez estudiados los casos presentados en el túnel IQF, se determinó el tiempo de congelación en minutos necesarios para el proceso, si éste fuese el ideal, para poder comparar con el peor caso y así poder determinar las fallas en el mismo. Se realizó un modelo matemático que permita determinar de forma rápida, económica y segura el tiempo necesario de congelación para un caso específico, ingresando tan sólo los valores de temperatura de entrada del producto, velocidad de aire, y características del producto.

Finalmente se presentan tablas donde constan los tiempos necesarios de congelación para los diferentes casos presentados en la operación del túnel IQF en nuestro proceso y una validación de resultados, presentando en la última parte conclusiones y recomendaciones validadas.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN I

ÍNDICE GENERAL II

ABREVIATURAS VI

SIMBOLOGÍA VII

ÍNDICE DE FIGURAS VIII

ÍNDICE DE TABLAS X

INTRODUCCIÓN 1

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES 3

1.1 Materia Prima 3

1.1.1 Composición 6

1.2 Proceso de Elaboración de patacón congelado IQF..... 8

1.2.1 Diagrama de Flujo..... 8

1.2.2 Descripción del proceso de elaboración de patacón congelado IQF..... 9

1.3 Congelación de Alimentos 12

1.3.1 Velocidad de Congelación 13

1.3.2 Proceso de cristalización de agua en alimentos 14

1.3.3 Etapas de congelación 15

1.3.4 Efectos de la Congelación 18

1.4 Descripción de Congeladores de Lecho Fluidizado 21

1.4.1 Ventajas 22

CAPITULO 2

2. ANÁLISIS DEL CASO 24

2.1 Situación Actual 26

2.2 Identificación de Problemas de Calidad 27

2.3 Diagrama causa efecto en el proceso de elaboración del patacón congelado IQF 29

2.3.1 Operadores 31

2.3.2 Materia Prima 32

2.3.3 Máquina 33

2.3.4 Operación 33

2.4 Descripción de causales de efectos de calidad en la etapa de congelación 34

2.4.1 Producto Pegado 35

2.4.2 Producto Aguado 37

2.5 Acciones Correctivas para disminuir defectos en etapa de congelación 39

CAPITULO 3

3. MATERIALES Y METODOS 41

3.1 Caracterización del Túnel de Congelación IQF 41

3.1.1 Descripción del Túnel de Congelación 41

3.1.2 Determinación de Parámetros 44

3.1.3 Monitoreo de Datos 46

3.2 Determinación de Tiempos de Congelación 52

3.2.1 Determinación de Composición del Producto 52

3.2.2 Cálculo de Propiedades Térmicas 53

3.2.3 Determinación de tiempos reales de congelación 56

CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS 63

4.1 Caracterización del Túnel de Congelación 63

4.1.1 Velocidad de Aire 65

4.1.2 Temperatura de Entrada del producto 69

4.1.3 Temperatura de Salida del producto 70

4.1.4 Coeficiente de Transferencia de Calor 72

4.2 Tiempos Reales de Congelación 77

CAPITULO 5

5. DESARROLLO MANUAL DE OPERACIÓN DEL TÚNEL IQF 87

5.1 Estudio de casos en la operación del túnel IQF 87

5.2 Modelo matemático aplicado al funcionamiento y congelación del túnel IQF para patacones congelados 91

5.3 Determinación de tiempos de residencia de congelación para los diferentes casos presentados en el túnel IQF 93

5.4 Validación de Resultados 98

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

° C	Grados centígrados
cm	Centímetro
F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
IQF	Congelación rápida individual
kg	Kilogramo
kj	Kilojoul
ln	Logaritmo natural
Lcs	Límite crítico superior
Lci	Límite crítico inferior
mg	Miligramos
m	Metro
mm	Milímetro
m^2	Metro cuadrado
m^3	Metro cúbico
MP	Materia prima
TM	Toneladas métricas
UI	Unidades internacionales
W	Watt
%	Porcentaje

SIMBOLOGÍA

A	Área
Bi	Número de Biot
Cp	Calor específico
E	Factor de equivalencia de transferencia de calor dimensional
Fo	Número de Fourier
HR	Humedad relativa
h	Coeficiente de transferencia de calor
k	Conductividad térmica
L	Longitud menor
ma	masa de agua
mb	masa de sólidos
Ma	Peso molecular de agua
Mb	Peso molecular de sólidos
Pk	Plank
R	Constante universal de gases
Ste	Stephan
Tf	Tiempo de congelación
V	Velocidad de aire
v	Volumen
Xa	Fracción mol de agua
λ	Calor latente de fusión
ρ	Densidad
ΔHm	Entalpía del producto congelado

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág

Figura 1.1 Plátano Verde Barraganete..... 4
Figura 1.2 Patacón …….. 6
Figura 1.3 Diagrama de Flujo del Proceso de Patacón Congelado IQF …. 8
Figura 1.4 Curva de congelación de una solución típica ……... 16
Figura 1.5 Congelador de Lecho fluidizado …….. 22
Figura 2.1 Diagrama de la metodología a seguir para la realización de esta tesis …….. 25
Figura 2.2 Diagrama Causa Efecto en el proceso de elaboración de patacón congelado IQF …… 30
Figura 2.3 Diagrama Causa Efecto para producto pegado …… 35
Figura 2.4 Diagrama Causa Efecto para producto aguado …… 37
Figura 3.1 Túnel de Congelación …… 42
Figura 3.2 Foto real del túnel de congelación …….. 43
Figura 3.3 Anemómetro …… 47
Figura 3.4 Termómetro …… 48
Figura 3.5 Dimensiones de un patacón …… 61
Figura 3.6 Simulación de patacones al caer al túnel de congelación IQF ... 62
Figura 4.1 Gráfica de control de velocidad de aire en banda 1 del túnel de congelación ……... 65
Figura 4.2 Gráfica de control de velocidad de aire en banda 2 del túnel de congelación …… 66
Figura 4.3 Velocidad de aire vs tiempo …… 68
Figura 4.4 Gráfica de control de temperatura de entrada del producto al túnel de congelación …… 69
Figura 4.5 Gráfica de control de temperatura de salida del producto del túnel de congelación …… 71
Figura 4.6 Gráfica de control de coeficiente de transferencia de calor en banda 1 del túnel de congelación …… 73
Figura 4.7 Gráfica de control de coeficiente de transferencia de calor en banda 2 del túnel de congelación …… 73
Figura 4.8 Coeficiente de transferencia de calor vs tiempo ……... 74

Figura 4.9 Tiempo vs Flujo ……. 75
Figura 5.1 Tendencia del comportamiento para un flujo de 1000 kg …….. 88
Figura 5.2 Relación de transferencia de calor y flujo a través del tiempo .. 89
Figura 5.3 Modelo para la determinación del tiempo de congelación ……. 92

ÍNDICE DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Composición Química y Valor Nutritivo del Plátano Verde Barraganete …….. 5
Tabla 2. Composición Plátano Verde Crudo …… 6
Tabla 3. Composición Plátano Verde Frito 7
Tabla 4. Producción de Patacón Congelado en el año 2007 26
Tabla 5. Defectos de calidad de patacón congelado IQF ……. 28
Tabla 6. Características del anemómetro EXTECH 45118 47
Tabla 7. Características del termómetro RAYGEN ST …….. 49
Tabla 8. Calor Específico de Componentes del patacón ……... 79
Tabla 9. Densidad de componentes del patacón ……. 80
Tabla 10 Conductividad térmica de los componentes del patacón …….. 81
Tabla 11 Coeficiente de transferencia de calor vs flujo a través del tiempo..... 90
Tabla 12 Tiempos de congelación para un espesor de 7 mm a diferentes velocidades de aire y temperaturas de entrada de producto ….. 94
Tabla 13 Tiempos de congelación para un espesor de 14 mm a diferentes Velocidades de aire y temperaturas de entrada de producto…. 96
Tabla 14 Validación de resultados …… .. 98

INTRODUCCIÓN

El plátano verde es uno de los cultivos de mayor extensión y producción en el Ecuador, su consumo ha sido ancestral principalmente internamente. La presión de la demanda étnica en países como Estados Unidos y otros en Europa, han estimulado la producción de plátano de buena calidad para la exportación, esto ha requerido que se utilicen métodos de conservación del mismo sin alterar las características organolépticas del producto en su estado original.

En la actualidad uno de los métodos de conservación más usados para alimentos sin que estos pierdan sus características propias, es la congelación.

Con el presente trabajo se optimizará un proceso de congelación en la elaboración de patacón congelado IQF, enfocado en el mejoramiento del mismo, con el fin de determinar un modelo matemático que nos permita de manera fácil y rápida determinar los parámetros de operación del equipo en función de las características del proceso.

En el estudio se analizará los diferentes casos que se presentan a diario en una Industria Nacional de producción de patacón congelado IQF, de esta manera se podrá determinar la relación que existe entre los parámetros que forman parte del proceso y cuáles son sus mayores problemas.

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Materia Prima

El plátano macho o barraganete (figura 1.1) pertenece a la misma especie del plátano común, es el plátano verde o para cocer que se cultiva como si fuera una hortaliza en zonas de la selva tropical; su especie es Musa paradisiaca y pertenece a la familia de las Musáceas, su origen es asiático y se cultiva en todas las regiones tropicales y subtropicales de América (www12, 2009)

El Plátano barraganete es bastante más grande que el plátano común, su forma es alargada, algo curvada y se estrecha en su extremo inferior; la piel es gruesa de color verde y al llegar a su estado óptimo de maduración se torna amarillo con manchas y rayas marrones; su pulpa de es color blanco con una consistencia arenosa, su sabor en cru e otros plátanos, ya que no contiene muchos azúcar ando, suave y mantecoso (www12, 2009).

FIGURA 1.1 Plátano Verde Barraganete

Fuente www12, 2009

Es una fruta con un elevado contenido de hidratos de carbono complejos (almidón), por lo que no es apto para su consumo en crudo. Es muy rico en minerales como el potasio, el magnesio, apenas contiene sodio y también aporta cantidades interesantes de vitaminas A y del grupo B, aunque la mayor parte se pierden durante su cocinado (www13, 2009). Sus propiedades nutricionales se muestran en la tabla 1.

La producción de plátano ha sido ancestral en el Ecuador principalmente para el consumo interno. La presión de la demanda étnica en países como Estados Unidos y otros en Europa, han estimulado la producción de plátano de buena

calidad para la exportación (www11, 2009).

TABLA 1. COMPOSICION QUÍMICA Y VALOR NUTRITIVO DEL PLÁTANO VERDE BARRAGANETE

Componentes	En 100 g
Agua	61%
Proteína	1.10%
Grasa	0.20%
Fibra	0.60 g
Calcio	5.00 mg
Vitamina A	540 UI
Fósforo	30.00 mg
Hierro	0.50 mg
Tiamina	0.07 mg
Potasio	373 mg
Riboflavina	0.03 mg
Ceniza	1%

El plátano verde se lo utiliza para muchas comidas, como acompañante, es cocido por que el plátano macho crudo es indigesto; se manipula como una hortaliza, asado, cortado en sentido horizontal, hervidos, horneados, para acompañar platos de carne o en rodajas fritos los más populares "patacones o Tostones". (www12, 2009)

El patacón (figura 1.2) es el verde cortado, pisado y freído con aceite y sal.

Figura 1.2 Patacón

Fuente www12, 2009

1.1.1 Composición

En las tablas 2 y 3 se muestra la composición del plátano verde crudo y el plátano verde frito respectivamente (patacón), esta información fue proporcionada por una industria productora de patacones congelados.

TABLA 2

Composición Plátano Verde Crudo		
Humedad	g%	63,35
Materia Seca	g%	37,65
Grasa	g%	0,3

Fuente: Industria Productora de Patacón Congelado

TABLA 3

Composición Plátano Verde Frito		
Humedad	g%	55,4
Materia Seca	g%	44,6
Grasa	g%	4,87

Fuente: Industria Productora de Patacón Congelado

1.2 Proceso de Elaboración de Patacón Congelado IQF

1.2.1 Diagrama de Flujo

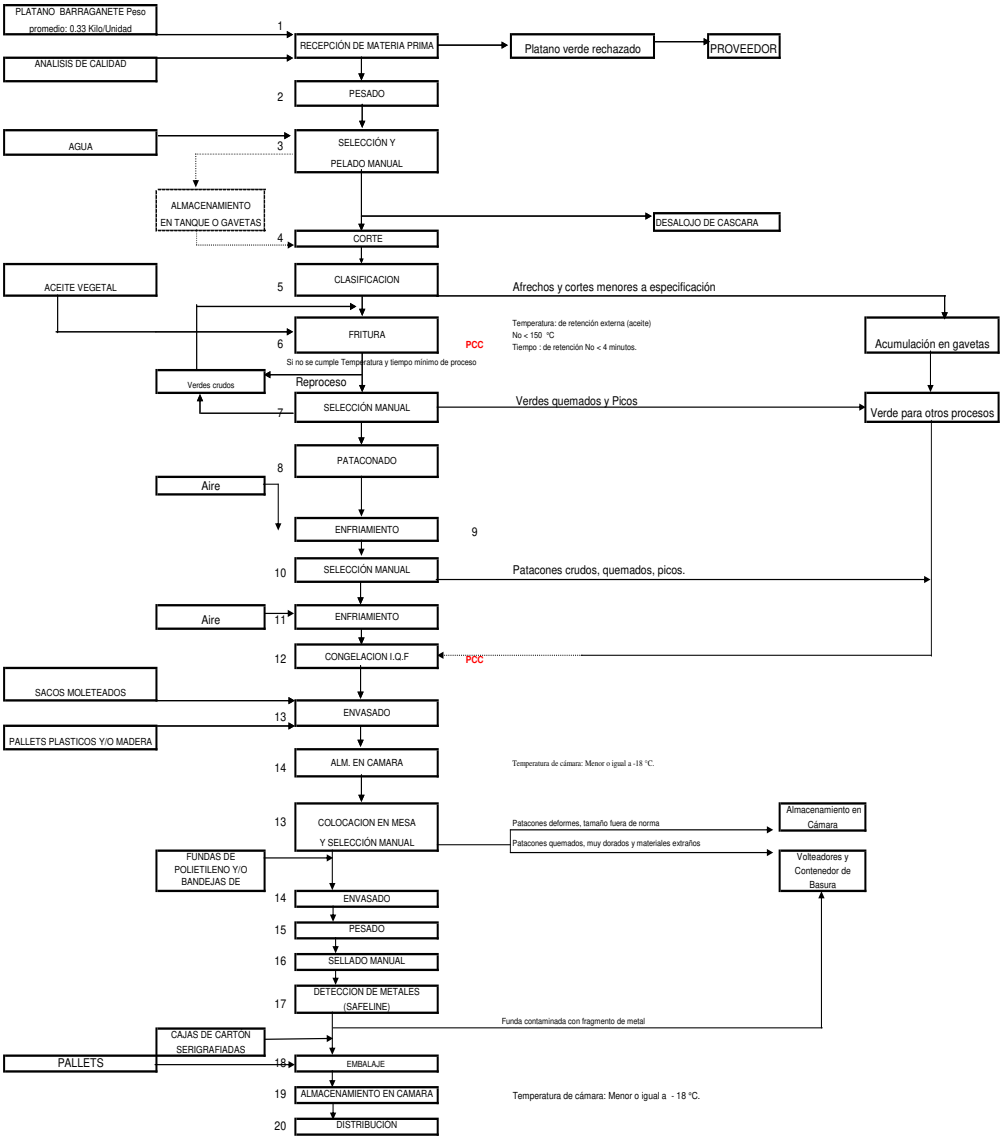


Figura 1.3 Diagrama de Flujo del Proceso de patacón congelado IQF

Fuente: Industria Productora de Patacón Congelado

1.2.2 Detalle del Proceso de elaboración de Patacón Congelado IQF

Recepción y Selección de Materia Prima

A su llegada a la planta, el plátano barraganete es analizado y pesado por control de calidad, este debe tener un peso promedio de 0.33 kilos/ unidad, el plátano que no cumpla con esta especificación es devuelto al proveedor.

Selección y Pelado manual

Una vez pesado el plátano es seleccionado de acuerdo a su estado de madurez, ya que si esta pintón es almacenado para ser usado en otro proceso. El plátano verde es pelado de forma manual con cuchillos de acero inoxidable, y almacenado en tanques o gavetas con agua para evitar su pardeamiento enzimático.

Corte y Clasificación

El corte puede ser realizado de forma manual, teniendo de muestra un plátano ya cortado, o con una máquina cortadora. El tamaño del corte va a variar de acuerdo al producto final que se desee obtener y a las especificaciones del cliente. Una vez realizado el corte se lo clasifica de forma manual para desechar el afrecho y los cortes que no estén de acuerdo a la especificación.

Fritura y Selección Manual

La fritura se realiza con aceite vegetal a una temperatura de retención externa del aceite no menor a 150° C y con un tiempo de retención no menor a 4 minutos. Si no se cumple la temperatura y el tiempo mínimo de proceso, es decir si el verde queda crudo, se lo reprocesa. Luego de realizada la fritura se hace una selección manual donde el verde ligeramente quemado y los picos pasan a ser utilizados en otros procesos. La etapa de fritura es un punto crítico de control.

Pataconado y Enfriamiento

El pataconado se realiza con unas máquinas pataconeras que trabajan a base de aire, aquí se ajusta la máquina de acuerdo al espesor que se desea lograr. Luego se realiza otra selección manual por si algún patacón crudo, quemado o que no cumpla con el tamaño de la especificación se ha quedado, para ser reprocesado o bien utilizado en otros productos. El producto que si cumple con la especificación es enfriado con ventiladores, mientras pasan por una banda transportadora.

Congelación IQF, envasado y almacenamiento en Cámara

Mediante un elevador el producto pasa a un túnel de congelación rápida individual IQF, las temperaturas y tiempo de retención dependen del flujo de producto. Este sale a -18° C y es envasado en sacos moleteados de 15 kg, para luego ser paletizados y almacenados en una cámara que esta a una temperatura de -18° C o menos.

Selección manual

Una vez que se ha realizado un pedido, se colocan los patacones que han estado almacenados en los sacos en la cámara y se les hace una selección manual, donde el patacón deforme o fuera de tamaño pasa a ser almacenado para su utilización en otros productos, en cambio los patacones quemados, muy dorados o algún material extraño es desechado.

Envasado, Pesado y Sellado

Una vez realizada la selección el patacón pasa a ser envasado en fundas de polietileno y/o bandejas de cartulina, esto se lo hace de forma manual, por lo que luego tiene que ser pesado para comprobar que cumpla con el peso de la funda. Una vez pesadas las fundas se sellan de forma manual y son pasadas por un detector de metales por medio de una banda transportadora.

Embalaje, almacenamiento en cámara y distribución

Las fundas son colocadas en cajas de cartón corrugado, previamente rotuladas y paletizadas para su almacenamiento en una cámara a una temperatura menor o igual a -18° C hasta su distribución en contenedores de frío para mantener la cadena de frío.

1.3 Congelación de Alimentos

La congelación de alimentos es una forma de conservación que se basa en la solidificación del agua contenida en estos. Por ello uno de los factores a tener en cuenta en el proceso de congelación es el contenido de agua del producto. En función de la cantidad de agua se tiene el calor latente de congelación. El calor latente del agua es la cantidad de calor necesario para transformar líquido en hielo, sin cambio de temperatura. Otros factores son la temperatura inicial y final del producto pues son determinantes en la cantidad de calor que se debe extraer del alimento, así como las dimensiones y forma del mismo (www1, 2007).

En la industria de alimentos se define la congelación como la aplicación intensa de frío capaz de detener los procesos bacteriológicos y enzimáticos que destruyen los alimentos (www1, 2007).

Este constituye un importante método de tratamiento de alimentos. El cual se debe fundamentalmente al hecho de que muchos alimentos congelados cuando se preparan y almacenan correctamente, conservan la mayor parte de las propiedades "frescas" del alimento original durante largo tiempo (www2, 2007).

1.3.1 Velocidad de Congelación

Es el cociente de la diferencia entre temperatura inicial y temperatura final por la duración de la congelación. (www2, 2007)

La calidad de un producto congelado depende de la velocidad a la que éste es congelado.

- Lenta: < 1cm/h, por ejemplo un congelador doméstico con el aire inmóvil a -18 ºC
- Media: 1-5 cm/h, en un túnel de aire frío a 20 km./h y -40 ºC
- Rápida: > 5cm/h, en la inmersión en nitrógeno líquido

(www1, 2007)

1.3.2 Proceso de Cristalización de Agua en Alimentos

Precongelación: lapso de tiempo entre el momento en que el producto, a su temperatura original, es sometido a un proceso de congelación y el instante en que comienza la cristalización del agua (temperatura crioscópica)

Congelación: período durante el cual la temperatura es casi constante en un punto dado; el calor extraído se emplea en transformar la mayor parte del agua en hielo.

Reducción a la temperatura de almacenamiento: período durante el cual la temperatura se reduce, desde la temperatura a la que la mayor parte del agua congelable se ha transformado en hielo, a la temperatura final deseada. La temperatura final puede ser la temperatura de almacenamiento alcanzada por todo el producto, incluso el centro térmico, o bien la temperatura de equilibrio (Fernández Sevilla José, 2005)

1.3.3 Etapas de Congelación

El proceso de congelación de los alimentos es más complejo que el del agua pura. Los alimentos al contener otros solutos disueltos además del agua, presentan un comportamiento ante la congelación similar al de las soluciones (www3, 2007)

La evolución de la temperatura con el tiempo durante el proceso de congelación es denominada curva de congelación. La curva de congelación típica de una solución de muestra en la figura 1.4.

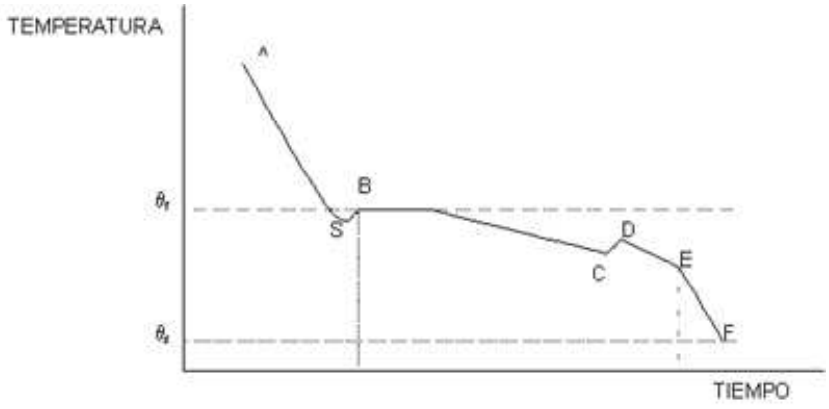


Figura 1.4. Curva de Congelación de una solución típica

Fuente: www3, 2007

Esta curva posee las siguientes secciones:

AS: el alimento se enfría por debajo de su punto de congelación inferior a 0° C. En el punto S, al que corresponde una temperatura inferior el alimento permanece en estado líquido. Este subenfriamiento puede llegar a ser de hasta 10° C por debajo del punto de congelación.

SB: la temperatura aumenta rápidamente hasta alcanzar el punto de congelación, pues al formarse los cristales de hielo se libera el calor latente de congelación a una velocidad superior a la que este se extrae del alimento.

BC: el calor se elimina a la misma velocidad que en las fases anteriores, eliminándose el calor latente, con la formación de hielo, permaneciendo la temperatura prácticamente constante. El

incremento de la concentración de solutos en la fracción de agua no congelada, provoca el descenso del punto de congelación, por lo que la temperatura disminuye lentamente. En esta fase es en la que se forma la mayor parte del hielo.

CD: uno de los solutos alcanza la sobresaturación y cristaliza. La liberación del calor latente correspondiente provoca el aumento de la temperatura eutéctica del soluto.

DE: la cristalización del agua y los solutos continúa

EF: la temperatura de la mezcla de hielo y agua desciende (www3, 2007)

1.3.4 Efectos de la Congelación

Nucleación

Al congelar un alimento a presión atmosférica normal, su temperatura desciende a 0ºC, en ese momento el agua comienza a convertirse en hielo. Permanece un cierto tiempo a esta temperatura y cuando la cristalización es completa, la temperatura sigue descendiendo hasta que se equilibra con la temperatura ambiental.

Este periodo durante el cual no ha habido disminución de temperatura es el tiempo necesario para extraer el calor latente de congelación. Durante este periodo el efecto

del frío se equilibra con el calor liberado por el agua al estar ésta sometida a un cambio de estado. La temperatura se mantiene constante, y da en una gráfica un tramo horizontal cuya longitud depende de la velocidad a la que se disipa el calor. En este periodo hay un equilibrio entre la formación de cristales y su fusión.

Al inicio de este tramo horizontal se observa una ligera depresión que indica el sobreenfriamiento que sufre el agua antes del inicio de la cristalización. Esto ocurre cuando hay una gran velocidad de eliminación de calor y asegura que, cuando se inicie la formación de cristales, será rápida.

Dado que el agua en los alimentos no es pura sino que está formada por una solución de sales, azúcares y proteínas solubles, además de un complejo de moléculas proteicas que están en suspensión coloidal, su punto de congelación es más bajo. Este descenso es proporcional al nivel de concentración de los elementos disueltos

Los alimentos más comunes se congelan entre 0 y - 4 ºC. A esta zona se la conoce como zona de máxima formación de cristales. Al convertirse el agua en hielo, se

incrementa de manera gradual la concentración de elementos disueltos en el agua restante lo que origina un mayor descenso del punto de congelación

Cristalización

Para que la cristalización se produzca más fácilmente se necesita la existencia de alguna partícula o sal insoluble que actúe como núcleo de cristalización. Cuanto menor es la temperatura, más fácilmente ocurre el fenómeno, formándose un mayor número de agregados cristalinos y, consecuentemente, el tamaño de los cristales es menor. Por el contrario a una temperatura próxima al punto de fusión, la nucleación es lenta, los núcleos cristalinos son pocos y, por tanto, resultan cristales relativamente grandes.

Al estudiar al microscopio las formas de los cristales de hielo se observa que la congelación rápida produce cristales pequeños más o menos redondeados mientras que la congelación lenta da lugar a cristales mayores, alargados o en agujas. Esta congelación lenta tiene como consecuencia la rotura de las fibras y paredes celulares perdiendo el alimento parte de sus propiedades.

En alimentos sólidos o de viscosidad elevada el tamaño de los cristales varía en una zona u otra del alimento. En las zonas periféricas los cristales se forman rápidamente y son de pequeño tamaño, mientras que en el interior la transferencia de calor es más difícil y los cristales crecen más lentamente alcanzando un mayor tamaño.

Al ir reduciendo la temperatura se alcanza un punto en el que el agua restante conjuntamente con los solutos que han ido concentrándose se solidifican juntos en un punto de saturación llamado punto eutéctico. Este punto es muchas veces inferior al que son capaces de alcanzar muchos congeladores comerciales, lo que permite que queden pequeñas cantidades de agua no congelada que permite sobrevivir a algunos microorganismos, aunque no es posible su crecimiento y reproducción (www1, 2007)

1.4 Descripción de Congeladores de Lecho Fluidizado

La fluidización tiene lugar cuando determinadas partículas de dimensiones bastante uniformes y pequeñas se someten a una corriente de aire ascendente. Para una velocidad de aire apropiada, que depende de las características del producto, las partículas flotan en la corriente como un fluido (2).

Si el producto se introduce de manera continua en la extremidad superior de una artesa inclinada, la masa pasa continuamente hacia la extremidad inferior. El producto al mismo tiempo se congela y transporta sin ayuda mecánica, así como se puede observar en la figura 1.5.

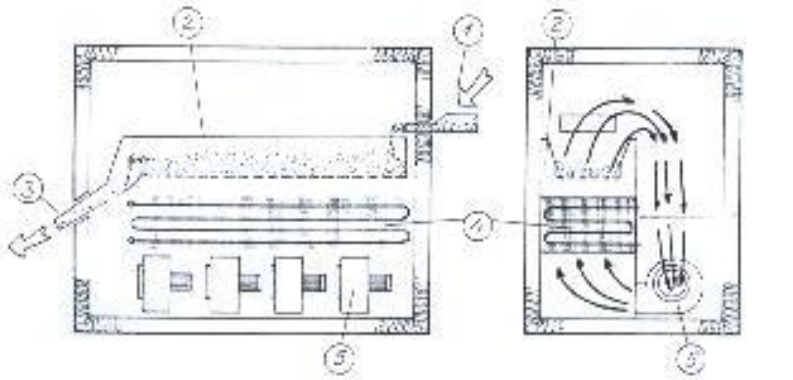


Figura 1.5. Congelador de Lecho Fluidizado

Fuente: 2

1.4.1 Ventajas

Este método presenta algunas ventajas sobre la congelación en banda transportadora; el producto es verdaderamente congelado en forma individual, incluso cuando tiene una tendencia natural para aglomerarse, si la carga se reduce no afecta la distribución del aire, un aparato de lecho fluidizable profundo puede tratar productos muy húmedos.

Con el fin de congelar productos de muy grandes dimensiones utilizando este procedimiento, se puede combinar la artesa de fluidificación con una banda transportadora; el aparato se divide en dos secciones para asegurar la congelación individualizada: en la primera, la banda corre en el fondo perforado de la artesa, realizándose una congelación superficial de los productos por verdadera fluidificación; luego pasan en capa bastante gruesa, a la segunda banda donde termina la congelación.

El presente trabajo tiene la finalidad de analizar la producción de patacón congelado en una industria nacional. Este producto se elabora por congelación individual rápida en lecho fluidizado.

Actualmente la empresa presenta un problema en la elaboración del mismo, ya que no se obtiene una calidad uniforme, por lo que el objetivo de esta tesis es la determinación de tiempos de residencia de congelación para los diferentes casos que se presentan en el túnel IQF, mediante su caracterización en función de parámetros como velocidad de aire, temperatura, coeficiente de transferencia de calor y tiempo, para así bajar el porcentaje de defectos ocasionados en esta etapa.

CAPITULO 2

2. Análisis del Caso

La metodología a seguir para el desarrollo de este trabajo se esquematiza en la figura 2.1, la cual a lo largo del mismo está detallada con los respectivos pasos a seguir para cada uno de los puntos que la conforman; con la finalidad de tener una mejor comprensión de los estudios realizados para llevar a cabo esta tesis.

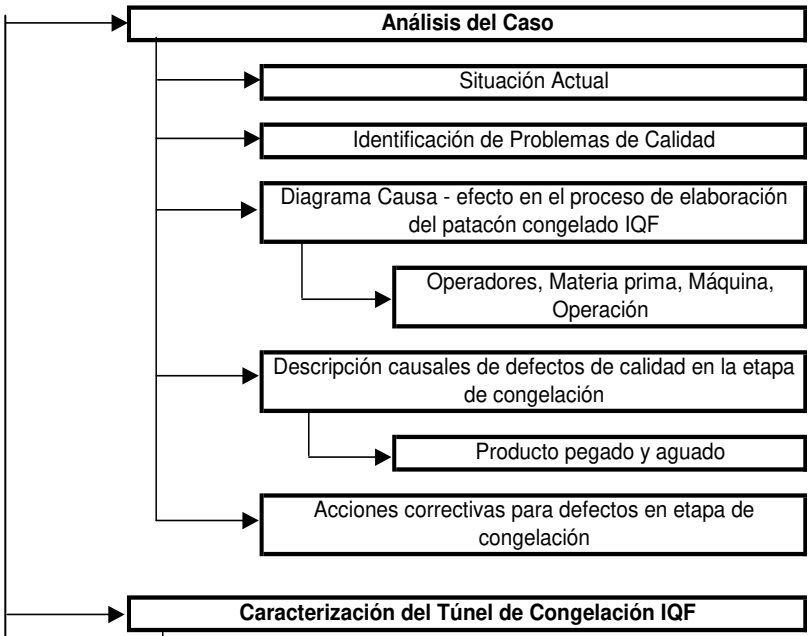


Figura 2.1 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA A SEGUIR PARA LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS

Para poder analizar cualquier mejora de calidad en un proceso se hace indispensable recurrir a registros o información documentada que nos permita conocer la situación actual del proceso, y así conocer los posibles problemas o causas que disminuyan la productividad o la calidad de un producto. Este capítulo contará con el análisis de la situación actual con el fin de identificar los posibles causales del decrecimiento de productividad y calidad.

2.1 Situación Actual

Con el fin de conocer la situación actual de la industria productora de patacón congelado es necesario analizar el primer semestre del año 2007.

TABLA 4. PRODUCCIÓN DE PATACÓN CONGELADO IQF EN EL AÑO 2007

AÑO 2007	Produccion (TM)	MP (TM)	CASCARA (TM)	MERMA (TM)	RENDIMIENTO %
Enero	455,00	1.110,50	555,25	100,25	40,97%
Febrero	522,00	1.254,00	627,00	105,00	41,63%
Marzo	435,00	1.050,00	525,00	90,00	41,43%
Abril	328,00	788,00	394,00	66,00	41,62%
Mayo	389,00	930,00	465,00	76,00	41,83%
Total	**2.129,00**	**5.132,50**	**2.566,25**	**437,25**	**41,48%**

Fuente: INDUSTRIA PRODCUTORA DE PATACON CONGELADO

La tabla 4, muestra que la producción ha disminuido debido al decrecimiento de pedidos de producto, sin embargo el rendimiento del mismo se mantiene cercano al 41 %.

Por lo que el objetivo de este sector industrial es incrementar el rendimiento, mediante la disminución de la merma, y mejorar la calidad final del producto.

2.2 Identificación de Problemas de Calidad

Con respecto a las pérdidas de calidad que intervienen en el aumento de la merma, es necesario analizar el proceso de elaboración del producto, para conocer en que etapa surgen los mayores problemas de calidad. Los defectos de calidad registrados en el producto final se presentan en la tabla 5, los cuales son producto aguado, pegado, crudo y no uniforme.

Producto aguado

Es el producto que se deriva cuando existe una mala operación del túnel de congelación de lecho fluidizado, es decir que el mismo aún no se encuentra totalmente congelado.

Producto pegado

El producto pegado es ocasionado por un mal funcionamiento en la etapa de congelación, debido a la acción de la humedad.

Producto no uniforme

El producto poco uniforme es producido por mala elección de materia prima y por un mal proceso de cortado.

Producto crudo

El producto crudo se ocasiona cuando hay un mal funcionamiento en la etapa de fritura.

Tabla 5

DEFECTOS DE CALIDAD DE PATACON CONGELADO IQF

Porcentaje de Defectos				
Merma	**Producto Aguado**	**Producto poco uniforme**	**Producto Crudo**	**Producto Pegado**
8.40%	5.20%	1%	0.30%	1.90%
100%	61.90%	11.90%	3.57%	22.62%

Elaborado por Sara Villacreses Zambrano

Fuente: Basado en Registros de Producción de patacón

En el análisis realizado a la merma obtenida en la elaboración de patacón congelado IQF, como se observa en la tabla 5, se pudo obtener que el mayor porcentaje de merma corresponde al producto aguado, y le sigue el defecto de producto pegado. Ambos defectos corresponden al 7.1 % de la merma total o el 85 % de defectos totales.

Es importante reconocer que los dos defectos principales mencionados ocurren durante la etapa de congelación. Es decir el análisis de esta etapa, llevará a la detección de causales en la operación del túnel de congelación de lecho fluidizado.

2.3 Diagrama causa efecto en el proceso de elaboración de patacón congelado IQF

Para establecer los causales es necesario recurrir a herramientas como los conocidos diagramas de causa efecto o espina de pescado, los cuales identifican las causas y subcausas que en nuestro caso conllevan a la reducción de productividad y aumento de merma en la producción de patacón congelado IQF.

Las posibles causas que ocasionan el comportamiento decreciente en la producción de patacones congelados IQF, se pueden apreciar en la figura 2.2.

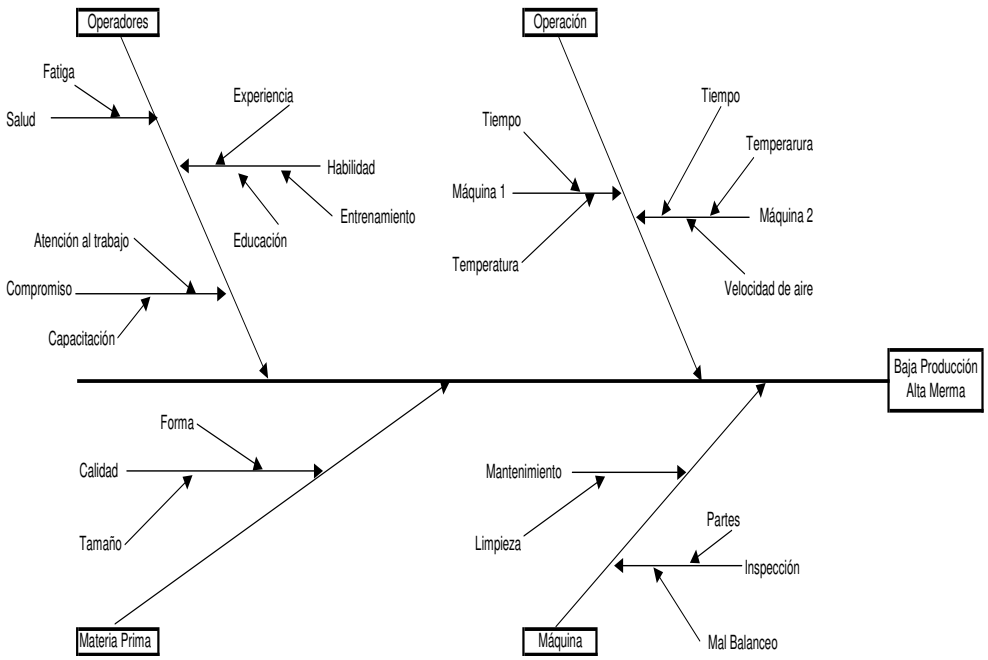


Figura 2.2. Diagrama Causa Efecto en el Proceso de Elaboración de patacón congelado IQF

Elaborado por: Sara Villacreses Zambrano

El aumento de la productividad y la disminución de merma queda claro se deben principalmente a factores como lo son materia prima, maquinaria y equipo, operadores y los procedimientos de operación.

2.3.1 Operadores

En el sector industrial, esta causa es muy común, debido a la salud, compromiso y habilidades de los empleados, sin embargo este no es el caso nuestro, ya que la industria dedicada a la elaboración de patacones congelados IQF cuenta con un programa de atención para los empleados que incluye servicio médico, capacitación de desarrollo profesional y de desarrollo personal, además existe un programa de conferencias en el cual se les inculca un compromiso con la empresa, también posee una cantidad aceptable de beneficios, los mismos que ayudan a mantener a los operadores satisfechos y dispuestos a realizar su trabajo con ánimo y responsabilidad.

De acuerdo a un estudio de tiempos realizado en las distintas etapas del proceso de elaboración de patacón congelado IQF, se pudo determinar que en un día de producción la hora en donde existía una disminución de la misma, era antes, durante y después de almuerzo, con relación a las otras horas del día en que se trabajaba, este estudio se lo realizó al observar y comparar el tiempo que se tomaban para producir una tonelada de patacón congelado IQF a distintas horas del día. Ver Apéndice A.

Los motivos de esta disminución se deben principalmente a que antes del almuerzo, los operadores realizan su trabajo de forma acelerada, con el propósito de ir a comer más rápido, durante el almuerzo, ya a que la mayoría del personal se encontraba en su hora de almuerzo, y después de almuerzo, porque los operadores se sentían con sueño y sin ganas de trabajar.

2.3.2 Materia Prima

La calidad de la materia prima es un factor sumamente importante a la hora de elaborar un producto, por lo que esta causa se la considera como una posible deficiencia de la calidad final del mismo, sin embargo, esta causa no representa un problema en la producción de patacones congelados, ya que existe un sistema de calidad, el cual contempla certificaciones y auditorias de calificación a proveedores, además se realizan inspecciones a la materia prima que llega por parte del departamento de control de calidad, para determinar si es apta para el proceso.

Debido a la exigencia de los consumidores, se tiene un estándar en el tamaño del verde, para así obtener un tamaño promedio de patacón, en cuanto a diámetro y espesor del mismo. Por esto en la etapa de cortado, se

realiza el corte de los extremos del verde, los mismos que son desechados y corresponden al 1 % del 8.4% de la merma promedio, que como se dijo anteriormente es producto poco uniforme.

2.3.3 Máquina y Equipo

En el proceso de elaboración de patacón congelado IQF, existe el uso de algunas máquinas como: cortadora, freidor, túnel de congelación, balanzas, clasificadora, etc., por esto se debe tener en cuenta cada máquina como una posible causa de las deficiencias, bien sea por un mal mantenimiento o mala inspección de las mismas, cabe recalcar, que dichas máquinas se encuentran en perfecto estado, sin embargo después de una rutina de mantenimiento se logró determinar que el túnel de congelación tenía ciertos desperfectos.

2.3.4 Operación

Según el análisis de puntos críticos de control de la industria dedicada a la elaboración de patacones congelados IQF, como observamos en la figura 1.3, se define como punto crítico de control al freidor y al túnel de congelación de lecho fluidizado, los mismos que su procedimiento de operación se considera como una causa de los problemas en la calidad final del producto. Dentro de este procedimiento los parámetros que influyen en el producto terminado son el tiempo, temperatura y velocidad de operación.

En el caso del freidor, no se considera una causa potencial ya que existe un procedimiento específico de operación para cada cantidad de producto que pasa por el mismo, sin embargo esto no sucede con el túnel de congelación de lecho fluidizado.

2.4 Descripción de causales de defectos de Calidad en la etapa de congelación

En conclusión, después del análisis de las posibles causas que provocan que el comportamiento de la merma en la producción de patacones congelados IQF, sea constante, se pudo determinar que la principal causa que afecta a la misma, se da en la etapa de congelación, siendo sus defectos el producto pegado y el producto aguado.

2.4.1 Producto Pegado

En el defecto de producto pegado como se muestra en la figura 2.3, los causales del mismo son dos factores que son máquina y equipo y procedimiento de operación.

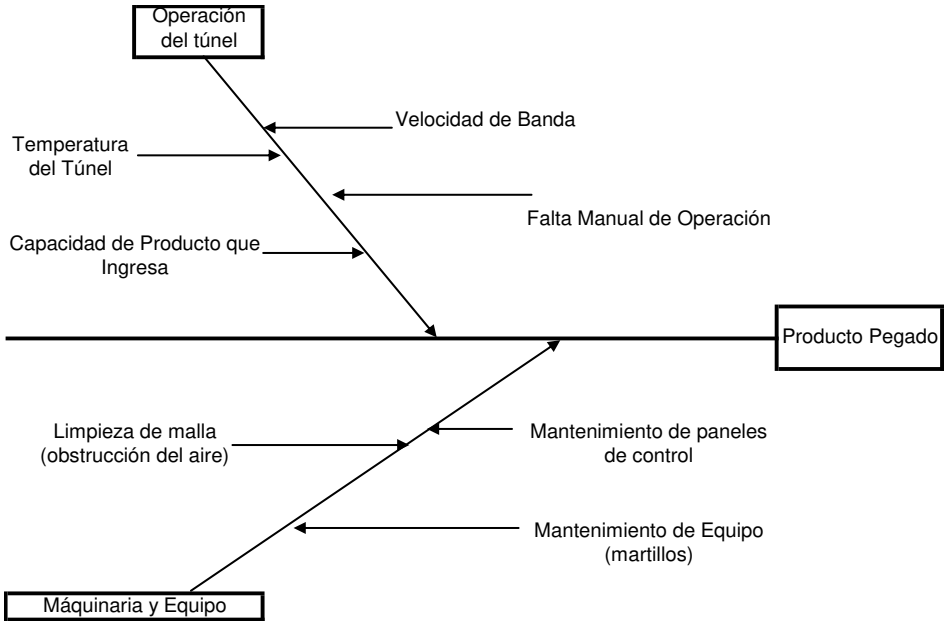


Figura 2.3. Diagrama Causa Efecto para producto pegado

Elaborado por: Sara Villacreses Zambrano

Maquinaria y Equipo

En el proceso de elaboración de patacón congelado IQF, una de las etapas más importantes es la de congelación, que se realiza por medio de un túnel de congelación de lecho fluidizado, en este causal es importante considerar la inspección que se realiza a la máquina, ya que no se lleva a cabo con mucha frecuencia.

Mediante una inspección realizada a las partes del túnel de congelación de lecho fluidizado, se pudo determinar que una de las mismas se encontraba en mal estado, esta pieza es el martillo, que es el que ayuda que el patacón se comporte como un fluido.

Operación

Este causal es importante debido a que no esta determinado el tiempo que debe pasar el producto por el túnel de congelación de lecho fluidizado, de acuerdo al flujo de patacón, es decir no existe un manual de operación, debido a esto, cuando pasa mucho producto, para que este no se acumule, el tiempo de retención en las bandas es mínimo, por lo tanto en la primera banda no se logra congelar la superficie del producto, que es lo que ocasiona que el mismo se pegue.

2.4.2 Producto Aguado

Como apreciamos en la figura 2.4, las causales principales para que se produzca un producto aguado son la capacidad, la temperatura de ingreso del producto al túnel de congelación IQF y el procedimiento de operación.

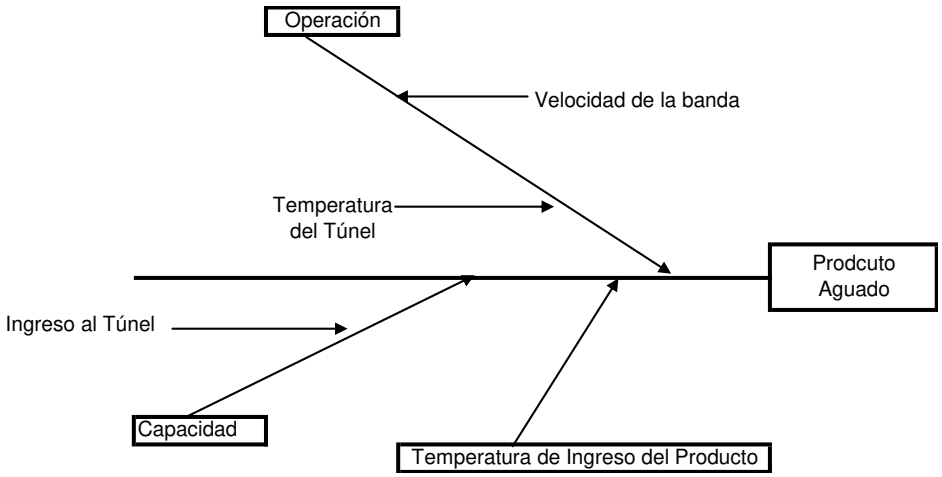


Figura 2.4. Diagrama Causa Efecto para producto aguado

Elaborado por: Sara Villacreses Zambrano

Operación

La falta del manual de procedimiento de operación del túnel de congelación de lecho fluidizado ocasiona que los operadores manejen el túnel por simple experiencia, sin tener una guía de parámetros de operación para cada cantidad de producto que ingresa en el mismo, provocando consumos injustificados de energía o un producto no totalmente congelado.

Temperatura de Ingreso del Producto al Túnel de congelación IQF

Este factor es de suma importancia, ya que de la temperatura con que ingresa el producto al túnel de congelación, depende su temperatura de salida, y si esta es demasiado elevada para congelar bien el producto se necesitaría un mayor tiempo de residencia en el túnel IQF y por lo tanto un consumo mayor de energía, este aumento del tiempo de retención en las bandas del túnel, ocasiona acumulación de producto y disminución de la eficiencia de operación, por lo que la solución tomada en la industria es operar el túnel siempre con los mismos parámetros sin considerar estos factores y dejar el producto no totalmente congelado, para que se termine de congelar en la cámara de almacenamiento. En el apéndice B, podemos observar un registro de temperaturas de entrada y salida del producto al túnel de congelación IQF.

2.5 Acciones Correctivas para disminuir defectos en etapa de congelación

Producto Pegado

Maquinaria y Equipo

Ya que en el proceso de elaboración de patacón congelado IQF, existe el uso de algunas máquinas, se debe realizar inspecciones periódicas a las mismas, y no

esperar a que alguna maquina comience a operar de manera incorrecta, como sucede con el túnel de congelación IQF, que solo al tener un mal funcionamiento se le hizo una revisión resultando que una pieza estaba en mal estado, en ese momento se tuvo que parar la producción para poder arreglarlo, resultando al final del día una menor producción de patacones congelados IQF que otros días. Así mismo sucede con otras maquinarias, ya que no realizan una inspección y balanceo de las mismas cada semana.

Producto Aguado

Operación

En la operación es donde existe el mayor problema, ya que no hay un procedimiento que establezca los parámetros de funcionamiento del túnel de congelación de lecho fluidizado, basándose en cantidad de materia prima y temperatura de entrada del producto, resultando muchas veces en desperdicio de energía o en otros casos la obtención de producto aguado, es decir producto no congelado totalmente, el cual representa el 62% del total de la merma promedio, es decir más de la mitad de la misma.

Estableciendo los parámetros de operación del túnel de congelación IQF, se puede disminuir este problema de consumos injustificados de energía y de producto final de mala calidad, como producto no totalmente congelado o aguado, para esto se llego a la conclusión de que se debe realizar un estudio de los tiempos, velocidad del aire del túnel, temperatura de entrada y salida del túnel del producto, para así determinar los parámetros reales del proceso y poder caracterizar el mismo.

De esta manera se puede desarrollar un modelo matemático que nos permita obtener los tiempos de congelación reales para los diferentes casos que se puedan presentar en el proceso de elaboración de patacón congelado IQF.

CAPITULO 3

3. Materiales y Métodos

3.1 Caracterización del Túnel de Congelación IQF

Para caracterizar el túnel de congelación, es necesario entender su funcionamiento, y conocer los parámetros que influyen en su operación.

3.1.1 Descripción del Túnel de Congelación IQF

El congelador utilizado en este estudio, es de marca FRIGOSCANDIA™, con este congelador de acuerdo a su descripción del catálogo, se consigue resultados de IQF más consistentes y perfectos. Incluso los productos más difíciles y delicados son tratados suavemente y congelados sin destruir su apariencia. (www6, 2008)

Lo esencial en un sistema IQF es su habilidad de mantener las partículas sólidas suspendidas en el aire mientras se congelan, sin pegarse unos a otros. Esto se logra con la ayuda de un diseño especial en la banda de IQF

que se encuentra perforada y que permite el paso del aire bien distribuido y directamente hacia el producto. (www6, 2008)

El flujo del aire en la zona inicial de congelamiento se mueve directamente hacia el aire frío de la zona final, creando una turbulencia que aumenta la velocidad de la transferencia del calor y asegura rápido y ligero enfriamiento de la corteza cuando el producto es más frágil al principio del proceso del congelamiento.

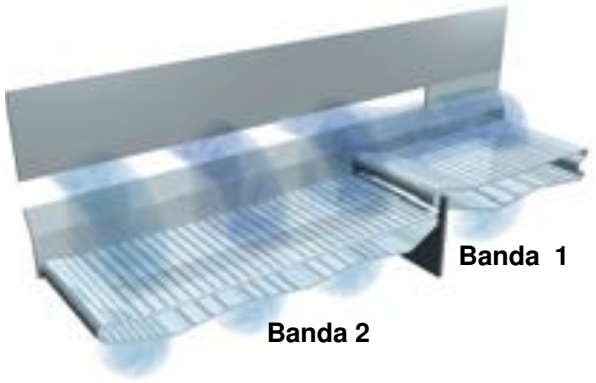


Figura 3.1. Túnel de Congelación

El congelamiento de la corteza proveído por este controlado y eficiente flujo de aire encierra la humedad del producto antes del congelamiento final, de este modo preserva el peso del producto, apariencia y calidad IQF.

Se puede ejecutar el congelador con agitación en la banda para productos mojados y pegajosos. También se puede transportar y congelar productos pesados.

Se puede fluidizar también productos difíciles como maduros fritos. Y con el pulsador opcional se puede congelar productos aún más difíciles que todos estos. (www6,2008)

Figura 3.2 Foto del Túnel de congelación

En la figura 3.2 podemos apreciar el túnel de congelación usado para este estudio.

3.1.2 Determinación de Parámetros

Para caracterizar y analizar el funcionamiento del túnel de congelación de lecho fluidizado, se tomaron en cuenta tres parámetros, que son: velocidad del aire en el túnel en las dos bandas, temperatura tanto de entrada como de salida del producto al túnel IQF, y capacidad del mismo.

Velocidad del aire

Para determinar la velocidad del aire dentro del túnel se lo dividió en dos secciones, primera banda, y segunda banda, como se observa en la figura 3.1 es decir se registraron las velocidades de aire en dos puntos distintos del túnel que fueron en el centro de cada banda, esto se hizo para tomar dicha velocidad siempre en el mismo

punto del túnel y no tener variaciones en el registro, el cual se llevó a cabo cada hora.

Temperatura

En cuanto a temperatura, se tomaron tres distintas temperaturas, temperatura del producto a la entrada del túnel, temperatura del producto a la salida del túnel y temperatura del aire dentro del túnel.

Para la medición de las tres temperaturas, se utilizó el termómetro láser descrito a continuación, todas se las registro cada hora, para analizar el comportamiento del túnel a las distintas horas del día.

Capacidad

Para determinar la capacidad ideal en el túnel de congelación de lecho fluidizado, se realizó un estudio de tiempos, este estudio consiste en determinar el tiempo que se demora un operador en realizar cada tarea en el proceso de patacón congelado y a las distintas horas del día. Para llevar a cabo un registro completo se tomaron los datos de capacidad por cada hora de proceso. De esta manera conocemos mejor a que hora del día existe mayor o menor producción de patacón congelado.

3.1.3 Monitoreo de Datos

Velocidad del Aire

Es necesario conocer la velocidad de aire, para así poder determinar mediante la ecuación (3.7) el coeficiente de transferencia de calor, para tomar los datos como se dijo anteriormente se dividió la banda en dos zonas, banda 1 y banda 2, los registros de la velocidad del aire se realizaron cada hora, a partir de las 8 de la mañana hasta las 4 de la tarde, para tomar siempre las mediciones a la misma hora en los diferentes días y así conocer el comportamiento del túnel en las distintas horas del día, y de acuerdo con las capacidades registradas, este dato fue tomado en m/s.

Para tomar estos datos se utilizó un formato previamente elaborado. Ver apéndice C.

Anemómetro

El anemómetro es un instrumento utilizado para medir la velocidad del aire, para este estudio se utilizó un mini Termo- Anemómetro EXTECH modelo 45118, que es un indicador doble de velocidad del aire y temperatura.

Figura 3.3 Anemómetro

Es digital, trabaja a velocidades desde 1.1 a 62.5 m/h, y temperaturas desde -30° C a 50° C y su humedad de operación es menos de 80% HR.

En la tabla número 6 podemos observar la precisión del equipo en cuanto a la medición realizada.

Tabla 6

Características del Anemómetro EXTECH 45118

Medición	Precisión
MPH (Millas por hora)	± (3%rdg + 0.4MPH)
km/h (kilómetros por hora)	± (3%rdg + 1.7km/hr)
m/s (metros por segundo)	± (3%rdg + 0.2m/s)
ft/min (pies por minuto)	± (3%rdg + 40ft/min)
Temperatura	±1°C

Fuente: MANUAL DEL EQUIPO

Temperatura

Las temperaturas registradas fueron: temperatura de entrada de producto al túnel, temperatura de salida del producto del túnel y temperatura del aire dentro del túnel, estos registros se realizaron cada hora, llevando el mismo de las tres distintas temperaturas tomadas en consideración. Ver apéndice D.

Equipo de Medición

Termómetro

El termómetro es un instrumento que se utiliza para medir temperaturas, para este estudio se utilizó uno láser digital marca Raytek, modelo RAYNGER ST.

Figura 3.4. Termómetro Láser

Los termómetros de rayos infrarrojos miden la temperatura de la superficie de un objeto. El sistema óptico de la unidad detecta la energía emitida, reflejada y transmitida, las cuales son captadas y enfocadas hacia un detector. El sistema electrónico de la unidad convierte la información en una lectura de temperatura, la cual se muestra en la unidad. El láser es exclusivamente para apuntar (tipo mira).

Su rango de medición de temperaturas es de -35 ° C a 400° C.

Tabla 7

Características del Termómetro RAYNGER ST

Medición	Precisión
mayor a 23° C	±1°C
23 ° C a -18° C	±2°C
-18° C a -26 ° C	±2.5°C
-26° C a -35 ° C	±3°C

Fuente: MANUAL DEL EQUIPO

En la tabla 7, podemos apreciar la precisión del termómetro láser utilizado en este estudio.

Tiempo

Para realizar el estudio de tiempo, se dividió el proceso en diferentes etapas, y se registro el tiempo que demora cada etapa a las distintas horas del día. Ver apéndice E.

Capacidad

Para la determinación de la capacidad ideal, también se registró el flujo que se obtenía a cada hora en todo el día, así también se pudo conocer en que momento del día existe menos producción de patacón congelado. Ver apéndice C. Para registrar este flujo cada hora, el túnel de congelación cuenta con un sistema de pesaje, calibrado para que cada 15 kilos deje de caer patacón para llenar un saco, de esta manera se puede multiplicar el número de sacos por la cantidad calibrada y así obtener el flujo total.

Estos estudios se los realizó con el fin de conocer el comportamiento del túnel y así poder determinar los parámetros ideales del proceso.

Una vez obtenida la cantidad suficiente de datos, se procedió a realizar gráficas de control para cada parámetro a estudiar. Una gráfica de control es una herramienta estadística que detecta la variabilidad, consistencia, control y mejora de un proceso.

La gráfica de control se usa como una forma de observar, detectar y prevenir el comportamiento del proceso a través de sus pasos vitales.

Así mismo nos muestra datos en una forma estática, tienen por supuesto sus aplicaciones, y es necesario saber sobre los cambios de producción, la naturaleza de estos cambios en determinado periodo de tiempo y en forma dinámica, es por esto que las gráficas de control son ampliamente probadas en la práctica.

La metodología para la elaboración de una gráfica de control se puede observar en detalle en el apéndice F.

También se realizaron gráficos de Tiempo vs Flujo, Tiempo vs Velocidad de aire y Tiempo vs Coeficiente de transferencia de calor, para poder conocer el comportamiento del túnel de congelación a través del tiempo, relacionar los diferentes parámetros y determinar las horas criticas en el proceso.

3.2 Determinación de Tiempos de Congelación

El tiempo de congelación de un producto depende de su naturaleza y del procedimiento empleado. El cálculo del tiempo empleado en congelar un producto es muy complejo.

Para un producto determinado, de forma y tamaño definidos, el tiempo de congelación depende solamente de las características del proceso, por lo que se hace necesario conocer en detalle la composición del producto.

3.2.1 Determinación de Composición del Producto

Para determinar la temperatura a la cual comienza a cambiar de estado el alimento es presentada como temperatura de depresión de una solución ideal

$$\ln Xa = \frac{\lambda}{R} 0{,}018 \left(\frac{1}{Tao} - \frac{1}{Ta} \right) \qquad \textbf{ec (3.1)}$$

La ecuación (3.1) demuestra la relación entre la fracción mol de agua (Xa) dentro del producto y la temperatura absoluta (Ta) a la cual la formación de cristales ocurre como una función del calor latente de fusión (λ) y la constante universal de los gases (R).

Para determinar la fracción masa de agua no congelada en el alimento (Xa) se utiliza la ecuación (3.2) que indica una relación masa/ peso molecular del agua y los sólidos del producto.

$$Xa = \frac{ma/Ma}{ma/Ma + mb/Mb} \qquad \textbf{ec (3.2)}$$

3.2.2 Cálculo de Propiedades Térmicas

Para el cálculo de las propiedades térmicas del patacón se utilizó la composición facilitada por una industria productora de patacones congelados IQF, ver tabla 3; los coeficientes para calcular las propiedades de los alimentos de las fórmulas de Choi and Okos (1986), ver apéndice G; además de las siguientes fórmulas para cada propiedad descritas a continuación:

Calor Específico

El calor específico es una magnitud física que indica la capacidad de un material para almacenar energía interna en forma de calor. Es la energía necesaria para incrementar en una unidad de temperatura una cantidad de sustancia (www9, 2008).

En congelación existe un deceso rápido del calor específico de un alimento, mientras se alcanza la temperatura inicial de congelación, ya que grandes porciones de calor latente de fusión son removidas del alimento en la región cerca del punto inicial de congelación.

Conociendo el calor específico de cada componente de un alimento es suficiente para predecir el calor específico del mismo.

Para determinar el calor específico de cada componente se utilizó las fórmulas de Choi y Okos que están en función de la temperatura de congelación del alimento. Ver anexo G.

El calor específico de un alimento esta dado por la siguiente ecuación (3.3)

$$Cp = cp_{nocong}m_{nocong} + cp_{hielo}m_{hielo} + cp_{carb}m_{carb} + cp_{gra}m_{gra} \quad \textbf{ec (3.3)}$$

Densidad

La densidad es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. (www10, 2008).

La densidad de un alimento congelado y no congelado es casi constante, sin embargo durante la congelación existe un deceso en la densidad justo en el punto de congelación inicial del alimento mientras la fracción de hielo en el mismo se incrementa.

Para determinar la densidad en un alimento se debe conocer la densidad de cada componente del mismo, mediante Choi y Okos, cuyas ecuaciones se encuentran en función de la temperatura de congelación. Ver anexo G.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{m_{nocong}}{\rho_{nocong}} + \frac{m_{hielo}}{\rho_{hielo}} + \frac{m_{gra}}{\rho_{gra}} + \frac{m_{car}}{\rho_{car}} \quad \textbf{ec (3.4)}$$

Conductividad Térmica

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. (www11,2008).

La conductividad térmica en un alimento depende de su composición química, la estructura física de cada componente y la temperatura del producto. En congelación la conductividad térmica de un alimento aumenta, mientras la temperatura disminuye.

La presencia de hielo en alimentos congelados tiene una gran influencia en su conductividad térmica, ya que la conductividad térmica del hielo es casi 4 veces más que la del agua, debido a esto la precisión de la conductividad térmica en un material depende de la precisión para determinar el contenido de hielo.

Para determinar la conductividad térmica en un alimento es necesario conocer la de cada componente, mediante Choi y Okos, cuyas ecuaciones se encuentran en función de la temperatura de congelación del mismo.

$$k = k_{nocong}m_{nocong} + k_{hielo}m_{hielo} + k_{car}m_{car} + k_{gra}m_{gra}$$

ec (3.5)

3.2.3 Determinación de Tiempos de Congelación

La determinación o predicción de métodos de congelación recae principalmente en fórmulas analíticas y semiempíricas que son basadas en principios básicos como lo son la ley de newton y resultados experimentales.

Estas fórmulas ya sean analíticas o empíricas han sido propuestas por algunos autores. Así tenemos: Plank, 1941; Fleming, 1967; Clealand and Earle, 1984; Mascheroni and Clavelo, 1982; Hung y Thompson, 1983; Surcar y Hayakawa, 1984; Pham, 1984,1986. Para este estudio se empleo la fórmula de Clealand and Earle.

La ecuación de Clealand and Earle, es una modificación de la fórmula de Plank, esta propone que la variación de entalpía incluya los calores sensibles.

Este método utiliza los siguientes números adimensionales:

Numero de Biot

El número de biot es el ratio entre resistencias conductivas y convectivas en los alimentos.

$$Bi = \frac{hL}{K}$$ **ec (3.6)**

h = 6.8 + 0.85 v **ec (3.7)**

Donde:

h: Coeficiente de transferencia de calor

v: Velocidad del Aire

L: Longitud menor

K: Conductividad Térmica

Stephan

$$\Delta H^{m} = m_{hielo} * \lambda$$ **ec (3.8)**

$$Ste = \frac{cp_{hielo}}{\Delta H^{m}} (Ta - T\infty)$$ **ec (3.9)**

Donde:

∆Hm: Entalpía del producto congelado

T∞: Temperatura Ambiente

Plank

$$Pk = \frac{cp_{nocong}}{\Delta H^{m}} (i - Ta) \qquad \textbf{ec (3.10)}$$

Una vez obtenidos los valores de Stephan y Plank, se determina P y R mediante las siguientes ecuaciones:

$$P = 0.5072 + 0.2018\,Pk + Ste\left(0.3224\,Pk + \frac{0.0105}{Bi} + 0.0681\right)$$

ec (3.11)

$$R = 0.1684 + Ste(.2740\,Pk - 0.0135) \qquad \textbf{ec (3.12)}$$

Número de Fourier

El número de Fourier es el ratio del tiempo actual al tiempo para alcanzar el estado estacionario.

$$Fo = \frac{\alpha t_f}{a^2} = P\frac{1}{BiSte} + \frac{R}{Ste} \qquad \textbf{ec (3.13)}$$

$$\alpha = \frac{k}{cp\rho} \qquad \textbf{ec (3.14)}$$

Donde:

Fo: Número de Fourier

Tf: Tiempo de Congelación

Para calcular el tiempo de congelación en cualquier geometría se emplea la siguiente ecuación:

$$tf = \frac{tf_{placaplana}}{E} \qquad \textbf{ec (3.14)}$$

Donde E es el factor de equivalencia de transferencia de calor dimensional, definido como el ratio de tiempo de congelación de una placa plana de mitad de espesor D al tiempo requerido para congelar el sólido que tiene el mismo D, E para placa plana es 1; 3 para esfera y para cubos y cilindros se encuentra entre 1 y 3.

Debido a que el patacón no tiene una forma exacta, para calcular el factor de equivalencia E y obtener un valor más exacto se empleó el método modificado de Pham.

Este método sirve para calcular el tiempo de congelación para objetos de tamaño definido de cualquier forma, mediante su aproximación a un elipsoide.

Se debe determinar β1 y β2, para esto se estableció el área y volumen del patacón mediante las siguientes ecuaciones:

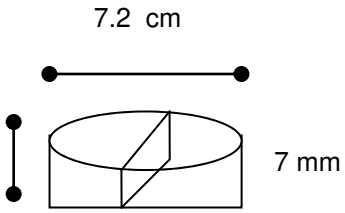


Figura 3.5 Dimensiones de un patacón

$$A = bxh \qquad \textbf{ec (3.15)}$$

$$V = \pi r 2h \qquad \textbf{ec (3.16)}$$

$$A = \pi\beta 1 r 2 \qquad \textbf{ec (3.17)}$$

$$V = \pi\beta 1\beta 2 r 3 \qquad \textbf{ec (3.18)}$$

Por último para calcular el factor E y poder obtener el tiempo real de congelación del patacón se utilizó la siguiente ecuación:

$$E = 1 + \left(\frac{1 + \frac{2}{Bi}}{\beta_1^{\,2} + \frac{2\beta_1}{Bi}} \right) + \left(\frac{1 + \frac{2}{Bi}}{\beta_2^{\,2} + \frac{2\beta_2}{Bi}} \right) \qquad \textbf{ec (3.19)}$$

Como podemos observar en la figura 3.5 el espesor promedio de un patacón es de 7 mm, pero al momento en que el producto entra al túnel de congelación IQF, este no lo hace sólo, pues existe un flujo determinado. Para conocer el verdadero comportamiento de los patacones al entrar al túnel se simuló su caída utilizando un pyrex y midiendo la altura que se formó al juntarse los patacones unos sobre otros.

Como podemos observar en la figura 3.6, en el peor de los casos se juntan 4 patacones, obteniéndose una altura de 28 mm, esto se realizó con el fin de establecer modelos matemáticos para todos los casos que se pueden presentar en el túnel de congelación IQF.

Figura 3.6 Simulación de patacones al caer al túnel de congelación IQF

CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Caracterización del Túnel de Congelación

Para realizar una caracterización del túnel y conocer su comportamiento y así poder establecer modelos matemáticos que nos permitan determinar tiempos de residencia de congelación para los diferentes casos, se establecieron las horas picos en el proceso de elaboración del producto, mediante el estudio de tiempos realizado previamente, además se elaboró el análisis de los resultados obtenidos en la toma de datos, mediante el desarrollo de gráficas de control de los

diferentes parámetros establecidos en el capítulo 2.

Luego se determinó el tiempo real de congelación, en función de las características del patacón y de los datos reales tomados de temperatura de entrada y salida del producto en el túnel y velocidad de aire en el mismo.

Para poder determinar el comportamiento del túnel de congelación a través del tiempo, se realizaron tres gráficas de relación: flujo vs tiempo, velocidad de aire en el túnel vs tiempo y coeficiente de transferencia de calor vs tiempo, una vez elaboradas estas gráficas se pudo determinar cual es la relación de estos parámetros entre sí y si estos tienen la misma tendencia de comportamiento a través del tiempo.

Estudio de Tiempo

Mediante el estudio de tiempo realizado en el capítulo 2 de esta tesis, se establecieron las horas donde existe la mayor cantidad de producto al ingreso del túnel IQF, se determinó que esta hora, llamada “hora pico” es entre 11 y 12 del día, esto se debe a que en esta hora previa a la hora del almuerzo, los operadores trabajan con mayor

rapidez para poder cubrir la producción del día, existiendo una baja considerable durante y después de la hora del almuerzo.

El apéndice A, muestra un ejemplo de los datos recolectados en un día normal de trabajo.

4.1.1 Velocidad de Aire en el Túnel de Congelación

Para determinar el valor de velocidad de aire promedio en el túnel de congelación se realizó una gráfica de control para la banda 1 y 2 respectivamente. Como se puede observar en las figuras 4.1 y 4.2, correspondientes a la velocidad de aire en la banda 1 y la velocidad de aire en la banda 2 respectivamente, los datos encontrados fuera de los límites corresponden al 20% del total de datos tomados.

Mediante estos gráficos se pudo encontrar que la media de velocidad de aire en la banda 1 fue de 8.83 m/s y la velocidad de aire media en la banda 2 fue de 9.86 m/s.

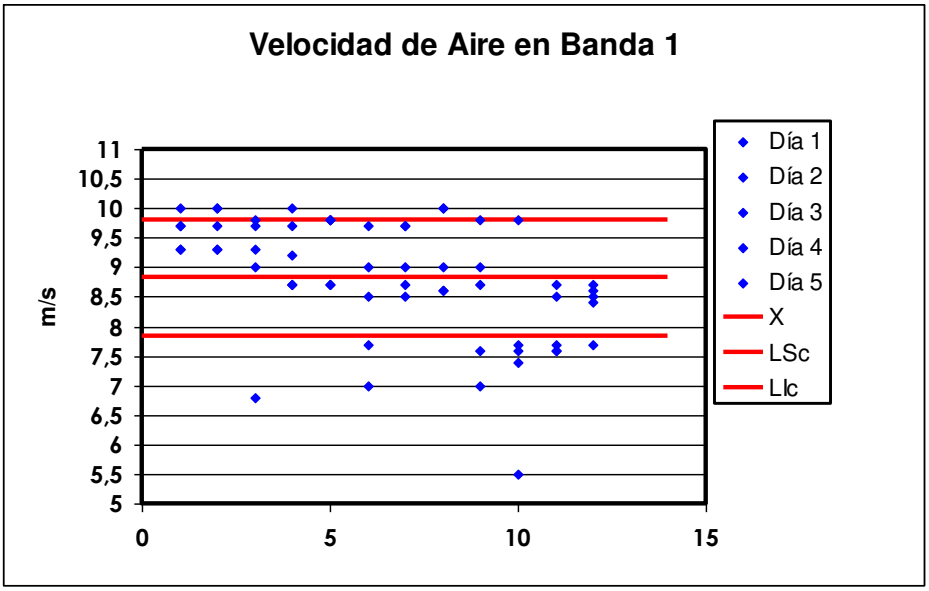


Figura 4.1 Gráfica de Control de VELOCIDAD DE AIRE en banda 1 del túnel de congelación

El límite superior crítico encontrado en la banda 1 fue de 9.81 m/s, mientras que el límite inferior crítico encontrado fue de 7.84 m/s.

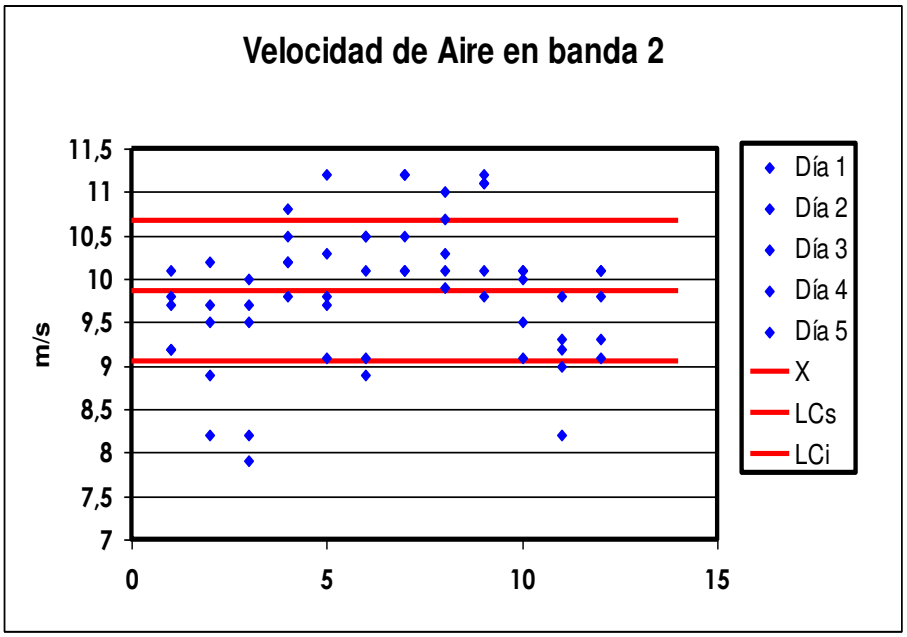


Figura 4.2 Gráfica de Control de VELOCIDAD DE AIRE en banda 2 del túnel de congelación

El límite superior crítico de la banda 2 determinado mediante la figura 4.2 fue de 10.67 m/s, mientras que el límite inferior crítico determinado fue de 9.04 m/s.

Como se observa claramente existe una diferencia de velocidad de aire en ambas bandas de 1.03 m/s, siendo la velocidad de aire en la banda 2 mayor a la velocidad de aire en la banda 1, esto se debe a que la velocidad de la banda 1 es menor a la velocidad de la banda 2, por lo tanto mayor cantidad de producto se acumula en la banda 1, esto conlleva a la disminución de la eficiencia del túnel de congelación, afectando directamente al valor de velocidad de aire.

Velocidad de Aire vs Tiempo

La velocidad del aire dentro del túnel es uno de los parámetros más importantes a considerar, ya que de este depende el coeficiente de transferencia de calor en el mismo.

La figura 4.3 muestra el comportamiento de la velocidad de aire dentro del túnel a través del tiempo, esta velocidad de aire está dada en m/s.

Como se puede observar en la curva la velocidad de aire, esta se mantiene casi constante a través del tiempo, con excepción de la hora 4, determinada anteriormente como hora pico.

Esto se explica porque en esta hora existe mayor cantidad de producto, ocasionando que el mismo se apile, y disminuyendo la eficiencia del túnel de congelación. Por esta razón el producto no sale del túnel de congelación totalmente congelado, si no que sale a la temperatura media de –14° C, ya que al estar apilado su espesor ya no es de 7 mm, si no en los peores casos donde se apilan hasta cuatro patacones es de 28 mm.

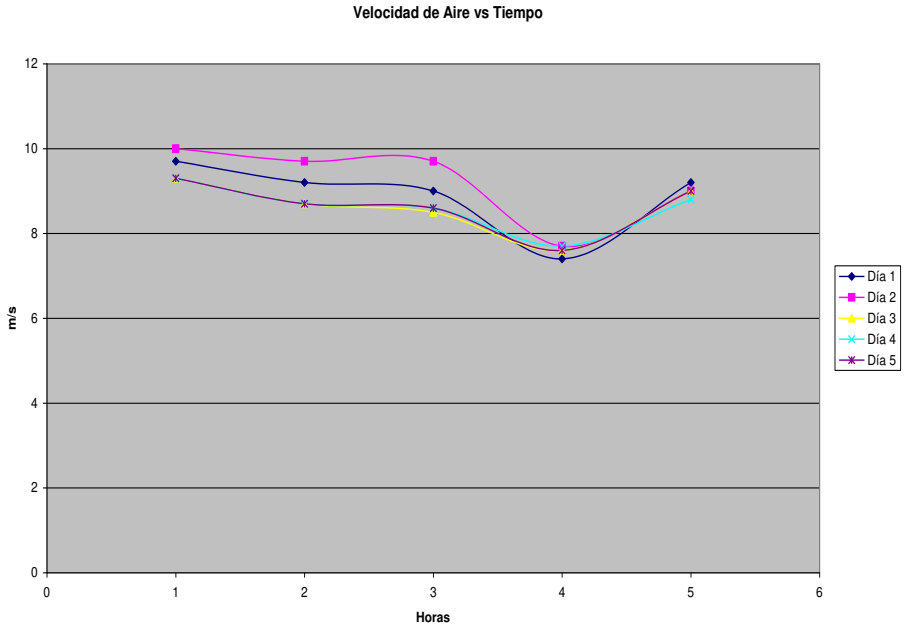


Figura 4.3 Velocidad de Aire vs Tiempo

Esto sucede ya que no existe un procedimiento de cómo operar el túnel IQF en los diferentes casos que se presentan, siendo este operado siempre de la misma manera.

4.1.2Temperatura de Entrada del Producto al Túnel de Congelación

La media de temperatura de entrada del producto al túnel de congelación fue determinada mediante la figura 4.4, esta dio como resultado un valor de 54° C. Adicionalmente se pudo determinar el límite superior y el límite inferior crítico, dando como resultado los valores de 59 °C y 48 ° C respectivamente

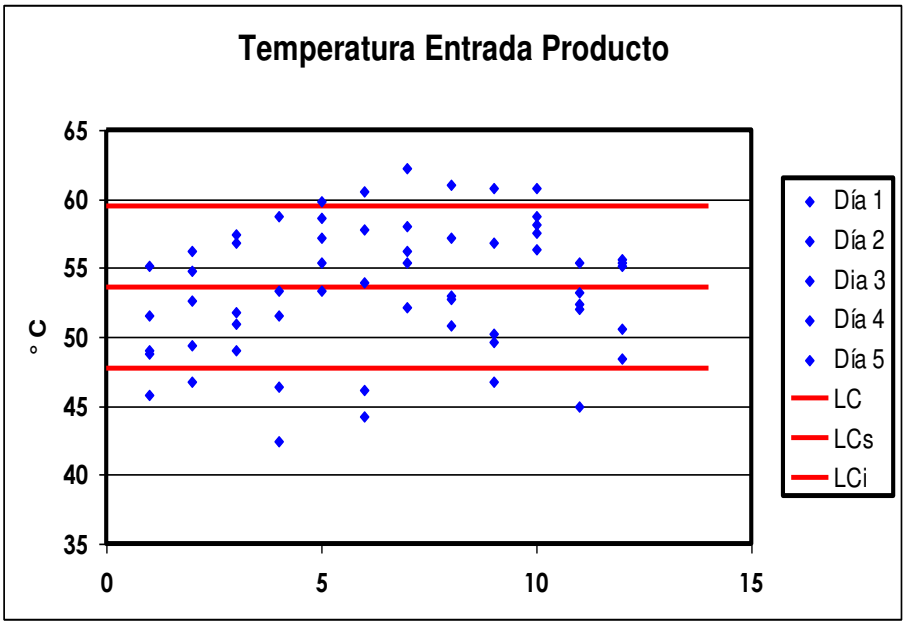


Figura 4.4 Gráfica de Control de TEMPERATURA DE ENTRADA DEL PRODUCTO al túnel de congelación

Como se puede observar en la figura 4.3 los datos fuera de rango obtenidos fueron el 22% del total de datos tomados.

Las temperaturas encontradas fueron altas para el ingreso a un túnel de congelación, esto se debe a la falta de un sistema de enfriamiento previo al ingreso al túnel. Se colocó un ventilador en la banda transportadora a la salida del freidor, donde se comprobó que existe una disminución significativa de temperatura, existiendo por esto una diferencia de 11° C en los datos tomados durante el estudio.

4.1.3 Temperatura de Salida del Producto al Túnel de Congelación

La media de temperatura de salida del producto al túnel de congelación fue determinada mediante la figura 4.5, esta dio como resultado un valor de -14° C. Adicionalmente se pudo determinar el límite superior y el límite inferior crítico, dando como resultado los valores de -20 °C y -8 ° C respectivamente.

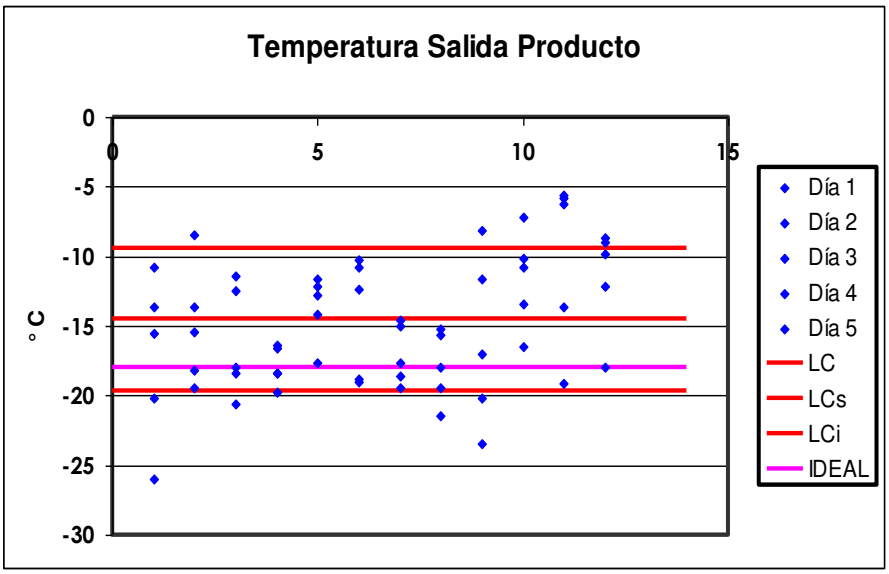


Figura 4.5 Gráfica de Control de TEMPERATURA DE SALIDA DEL PRODUCTO del túnel de congelación

Como se puede observar en la figura 4.5 los datos fuera de rango obtenidos fueron el 23% del total de datos tomados.

Es importante reconocer que la temperatura ideal de salida del producto del túnel de congelación es de –18° C, mientras que el dato de media determinado mediante la figura 4.5 fue de –14° C, lo cual quiere decir que el producto no está saliendo del túnel totalmente congelado.

4.1.4 Coeficiente de Transferencia de Calor

El coeficiente de transferencia de calor está en función de la velocidad de aire, para realizar la gráfica de control de este parámetro primero se tuvo que obtener el coeficiente de transferencia de calor teórico, mediante la ecuación (3.7), los resultados se pueden observar en la figura 4.6 y 4.7, que corresponden a coeficiente de transferencia de calor en banda 1 y coeficiente de transferencia de calor en banda 2 respectivamente.

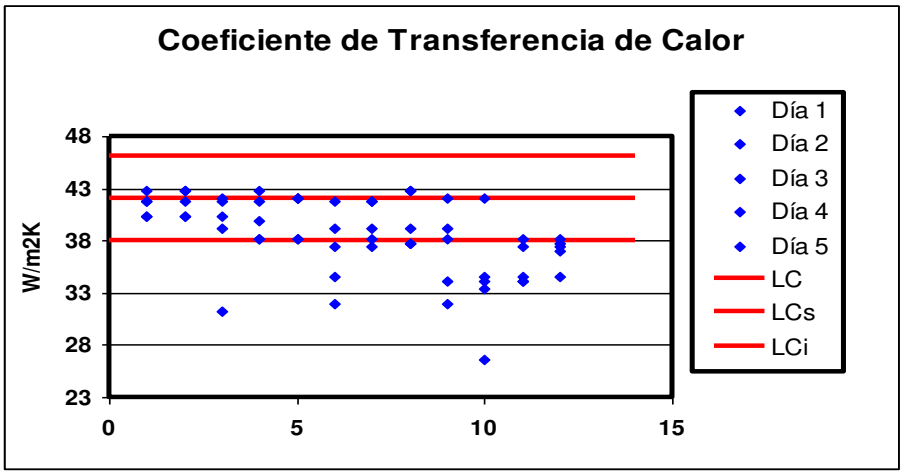


Figura 4.6 Gráfica de Control de COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR en banda 1 del túnel de congelación

La media obtenida del coeficiente de transferencia de calor en la banda 1 fue de 42.10 W/m²K, mientras que el límite superior crítico y el límite inferior crítico fue de 46.12 W/m²K y 38.07 W/m²K respectivamente.

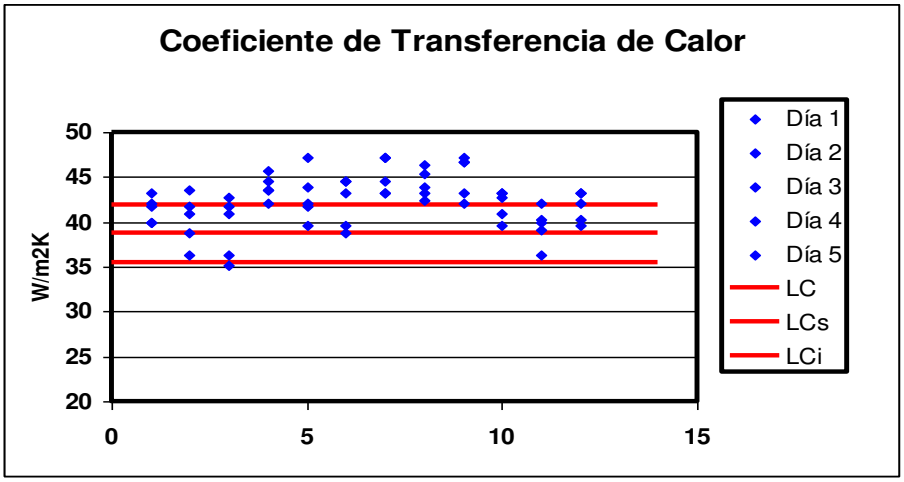


Figura 4.7 Gráfica de Control de COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR en banda 2 del túnel de congelación

La media obtenida del coeficiente de transferencia de calor en la banda 2 fue de 46.14 W/m²K, mientras que el límite superior crítico y el límite inferior crítico fue de 49.33 W/m²K y 42.95 W/m²K respectivamente.

Coeficiente de Transferencia de Calor vs Tiempo

Este parámetro esta en función de la velocidad de aire, por lo que podemos observar en la figura 4.8 que su comportamiento a través del tiempo es el mismo, este parámetro esta dado en W/m²K, siendo menor en la hora 4, tal como sucede en la figura 4.4.

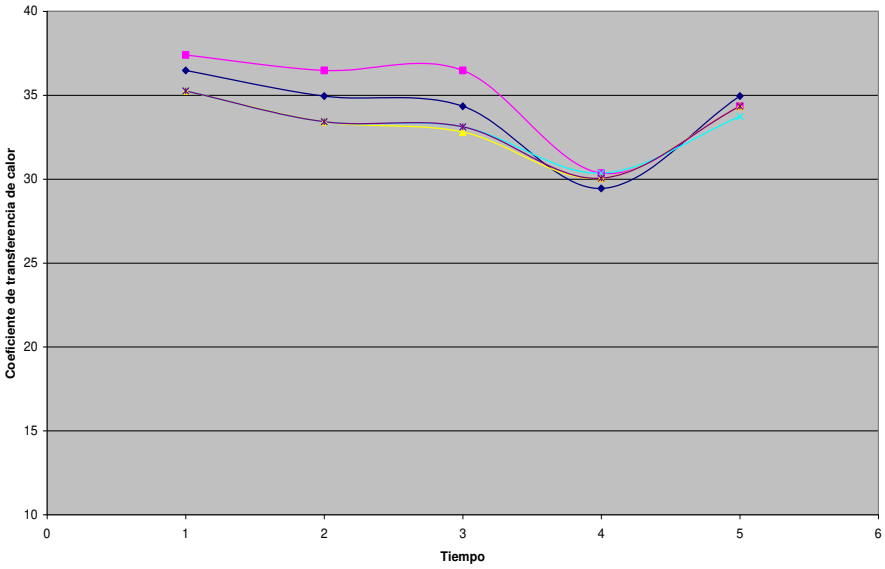


Figura 4.8 Coeficiente de Transferencia de Calor vs Tiempo

Flujo vs Tiempo

Es importante conocer como influye el flujo de producto en un proceso de congelación IQF, la figura 4.9 muestra la relación entre el flujo y el tiempo de operación del túnel, el eje x, indica las horas de operación del mismo, siendo 1 la primera hora de funcionamiento y así sucesivamente, el eje y indica el flujo de patacón dado por kg/h.

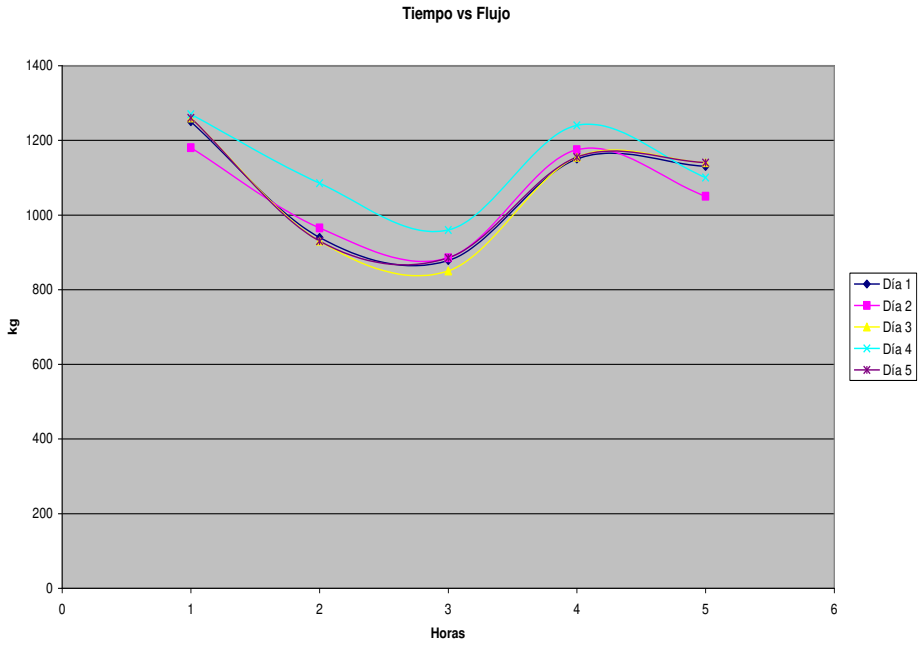


Figura 4.9 Tiempo vs Flujo

Como podemos observar en la hora 1 es donde ingresa la mayor cantidad de producto, esto se debe a que el túnel comienza a operar cuando existe una cantidad mínima de 1000 kg de patacón, más una vez que comienza a funcionar no se detiene hasta que haya pasado por el todo el producto proveniente del freidor, independiente de la cantidad que salga del mismo.

A partir de la hora 1 se ve un claro descenso en el flujo de producto, lo cual se puede explicar porque ya no existe una acumulación de producto antes de ingresar el túnel como sucedía en la hora 1.

En la hora 4, que corresponde a las 11 de la mañana se ve un ascenso de ingreso de producto al túnel por lo que podríamos decir que esta es nuestra hora pico, según el estudio de tiempos

realizado con anterioridad, en esta hora los operadores trabajan con mayor rapidez, para adelantar todo el trabajo posible, e irse a su hora de almuerzo sin bajar la producción esperada del día.

Se puede observar que existe una estrecha relación entre el flujo del producto y la velocidad de aire en el túnel de congelación, siendo en la hora pico, donde hay mayor ingreso de producto y por lo tanto la eficiencia del túnel disminuye, lo que trae como consecuencia la disminución de la velocidad de aire dentro del mismo. Al disminuir la velocidad de aire, disminuye la transferencia de calor en el mismo.

Otro parámetro importante a considerar es la temperatura de entrada del producto al túnel ya que de esta depende también la cantidad necesaria de calor que debe ser removida del producto.

Estos análisis nos van a permitir realizar un modelo matemático aplicado al funcionamiento del túnel de congelación para la determinación de tiempos de residencia de congelación para los diferentes casos.

4.2 Tiempos Reales de Congelación

Determinación de Propiedades Térmicas

Para conocer la fracción de agua no congelada, se empleo la ecuación (3.1), a una temperatura de -18°C, que es la temperatura final de congelación del patacón, dando como resultado 0.8297.

$$\ln Xa = \frac{333.5 Kj/Kg}{8.314 x10^{-3} Kj/KgmolK} 0{,}018\,mol\left(\frac{1}{273\,K} - \frac{1}{255\,K}\right)$$

Para determinar la masa de agua no congelada en el patacón se encontró primero la fracción de agua no congelada cuando el alimento empieza a congelarse, es decir a -0.8°C, mediante la ecuación (3.1), dando como resultado 0.9923.

$$\ln Xa = \frac{333.5 kj/kg}{8.314 x10^{-3} kj/kgmolK} 0{,}018 mol\left(\frac{1}{273 K} - \frac{1}{272.2 K}\right)$$

Luego mediante la ecuación (3.2) se determinó la masa de agua no congelada, dando como resultado 2.935.

$$0.9923 = \frac{52.83/18}{52.83/18 + 47.17/Mb}$$

Mb= 2059.54

$$0.8297 = \frac{mA/18}{mA/18 + 47.17/2071.24}$$

Por lo tanto el porcentaje de hielo encontrado es de 50.41%

Calor Específico

Como se dijo en el capítulo 3 mediante Choi y Okos se determinó del calor específico para cada componente del patacón, los resultados se pueden observar en la tabla 8.

Tabla 8

CALOR ESPECÍFICO DE COMPONENTES DEL PATACON

Cp (kj/kg°C)	
Carbohidrato	1.512
Grasa	1.956
Agua	4.499
Hielo	1.953

Elaborado por: Sara Villacreses

Una vez obtenidos estos datos, se los reemplaza en la ecuación (3.3), dando como resultado 1.816 kj/kg°C.

cp = (1.956*0.0464) + (1.512*0.4253) + (4.499*0.019972) + (1.953*0.5083)

Densidad

Mediante las ecuaciones de Choi y Okos, se determinó la densidad para cada uno de los componentes que forman el patacón. Los resultados se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9

DENSIDAD DE COMPONENTES DEL PATACON

Densidad (kg/m³)	
Carbohidrato	1.604.688
Grasa	933.106
Agua	995.903
Hielo	919.243

Elaborado por: Sara Villacreses

Una vez obtenidos estos datos, se los reemplaza en la ecuación (3.4), dando como resultado 1126.416 kg/m³.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{0.019972}{995.903} + \frac{0.5083}{919.243} + \frac{0.0464}{933.106} + \frac{0.4253}{1604.688}$$

Conductividad Térmica

Mediante las ecuaciones de Choi y Okos, se determinó la conductividad térmica para cada uno de los componentes del patacón. Los resultados se encuentran en la tabla 10.

Tabla 10

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS COMPONENTES DEL PATACON

K (W/m°C)	
Carbohidrato	0.175
Grasa	0.230
Agua	0.537
Hielo	2.365

Elaborado por: Sara Villacreses

Una vez obtenidos estos datos, se los reemplaza en la ecuación (3.5), dando como resultado 1.298 W/mk.

K = (0.537*0.019972) + (2.365 *0.5083) + (0.175*0.4253) + (0.230*0.0464)

Número de Biot

Para determinar el número de biot es necesario conocer el coeficiente de transferencia de calor, el cual se lo obtuvo de la ecuación (3.7), se sacaron dos

coeficientes de calor, de la banda 1 y la de banda 2 respectivamente, la media de estos dos coeficientes dio como resultado un coeficiente de 41.18 W/m²K.

h = 6.8 + 0.85 (33.66km/h)

Luego reemplazando en la ecuación (3.8) se obtuvo un número de biot de 0.222.

$$Bi = \frac{41.18 W/m^2 K * 0.007 m}{1.298}$$

Stephan

Para obtener stephan se necesita conocer el valor de entalpía, esto se logra mediante la ecuación (3.8), donde se obtuvo un valor de entalpía de 168.115.

$$\Delta H^m = 0.5041 * 333.5$$

Una vez obtenido el valor de entalpía se reemplaza en la ecuación (3.9), obteniéndose un valor de stephan de 0.316.

$$Ste = \frac{1.818 Kj/kg°C}{169.115} \left(0.8°C + 30°C \right)$$

Plank

Con la ecuación (3.10) se obtuvo plank, dando un valor de 1.467.

$$Pk = \frac{4.499 kj/kg°C}{169.115} \left(4°C + 0.8°C \right)$$

Una vez obtenidos los valores de Stephan y Plank, se determino P y R mediante las ecuaciones (3.11) y (3.12) respectivamente, dando como resultado los siguientes valores:

P = 0.989

R = 0.291

$$P = 0.5041 + (0.2018 * 1.481) + 0.336\left((0.3224 * 1.481) + \frac{0.0105}{0.215} + 0.0681\right)$$

$$R = 0.1684 + 0.336(0.2740 * 1.481) + 0.0135$$

Reemplazando la ecuación (3.13) obtenemos Fourier, cuyo valor es 15.022.

$$Fo = 0.989\ \frac{1}{(0.222 * 0.316)} + \frac{0.291}{0.316}$$

Mediante la ecuación (3.14) se obtuvo el valor de α, dando un resultado de 6.35x10-7 m²/s.

$$\alpha = \left(\frac{1.298 W/mK}{(0.817 Kj/Kg°C * 1126.416 Kg/m^3)}\right)/1000$$

Reemplazando la ecuación (3.13) obtenemos el tiempo de congelación para placa plana, cuyo valor dio como resultado 19.354 minutos.

$$15.022 = \frac{6.35x10^{-7} tf}{(0.007)^2}$$

Se debe determinar β1 y β2, para esto se encontró el área y volumen del patacón mediante las ecuaciones (3.15), y (3.16), dando como resultado los siguientes valores:

Area del patacón = 5.04x10-4 m².

Volumen del patacón = 2.85x10-5 m^3.

A = 0.072 m * 0.007 m

V = $(0.036\ m)^2 * \pi * 0.007\ m$

Una vez obtenidas el área y volumen del patacón se las reemplaza en las ecuaciones (3.17) y (3.18), donde se obtuvo β1 y β2, cuyos valores son los siguientes:

β1 = 13.096

β2 = 16.156

$$5.04x10\text{-}4 = 3.1416 * \beta 1 * 0.001296$$

$$2.85x10\text{-}5 = 3.1416 * 13.096 * \beta 2 * 4.285x10 - 18$$

Una vez obtenidos estos valores se debe determinar el factor E para cualquier geometría, mediante la ecuación (3.19), donde se obtuvo un valor de 1.115.

$$E = 1 + \left(\frac{1 + \frac{2}{0.222}}{171.51 + \frac{2 * 13.096}{0.222}} \right) + \left(\frac{1 + \frac{2}{0.222}}{261.042 + \frac{2 * 16.157}{0.222}} \right)$$

Por último para calcular el tiempo real de congelación en el patacón se empleó la ecuación (3.14), dando un resultado de 17.357 minutos.

$$tf = \frac{19.354}{1.115} \quad = 17.357 \text{ minutos}$$

Este tiempo es el tiempo teórico de congelación necesario para congelar un patacón hasta –18° C, con las características de nuestro proceso.

Ya que el proceso no es ideal y se presentan diferentes casos en el mismo, es indispensable contar con un modelo matemático que se pueda aplicar a dichos casos, para así poder determinar que tiempo de congelación es necesario para cada uno de ellos.

CAPITULO 5

5. DESARROLLO MANUAL DE OPERACIÓN DEL TÚNEL IQF

5.1 Estudio de Casos en la Operación del Túnel IQF

Mediante las tres gráficas de relación elaboradas en el capitulo 4 de este trabajo, se pudo determinar el comportamiento del túnel de congelación a través del tiempo, mediante la caracterización de la relación de estos parámetros entre si y si estos tienen la misma tendencia de comportamiento a través del tiempo.

Para esto se realizaron tres gráficas, tomando en consideración los cuatro flujos más repetidos, estos son: 900 kg, 1000 kg, 1100 kg y 1200 kg. Se relacionó el flujo a través del tiempo para obtener una media del comportamiento de cada uno de los mismos.

En la gráfica 5.1 podemos observar la tendencia del comportamiento para un flujo de 1000 kg.

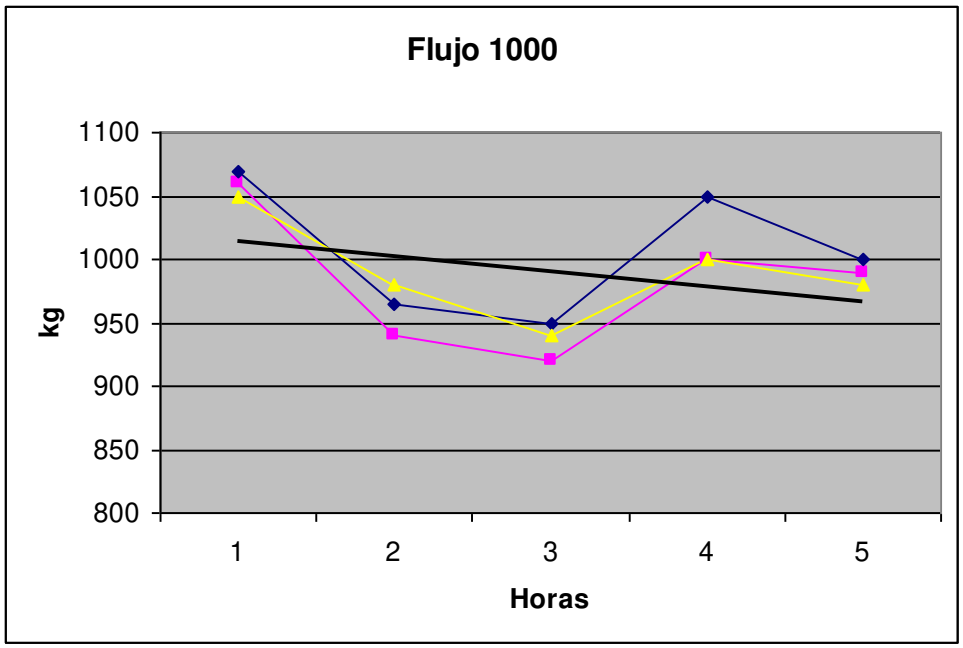


Figura 5.1 Tendencia comportamiento para un flujo de 1000 kg.

En el apéndice H podemos observar las líneas de tendencia para los flujos de 900 kg, 1100 kg y 1200 kg.

Una vez realizadas estas gráficas, se elaboró una agrupando estas cuatro tendencias, obteniendo un diagrama de relación entre el coeficiente de transferencia de calor y flujo a través del tiempo. Esta relación la observamos en la gráfica 5.2

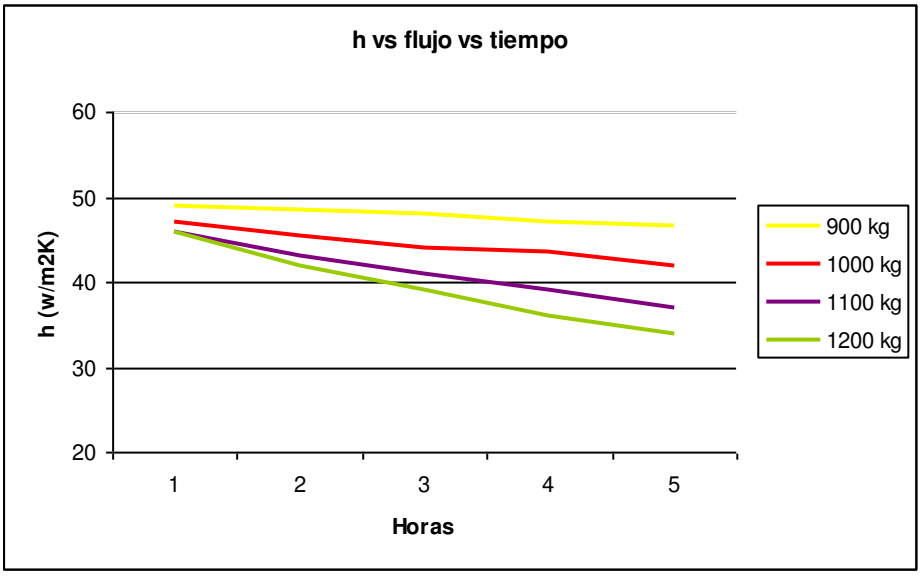


Figura 5.2 Relación de transferencia de calor y flujo a través del tiempo.

En la tabla 11, podemos apreciar una aproximación de la relación que existe entre las diferentes horas del día, el flujo y el coeficiente de transferencia de calor.

Tabla 11

Coeficiente de transferencia de calor vs flujo a través del tiempo

Hora	Flujo	h (W/m2k)
1	900	49
2		48,5
3		48
4		47
5		46,7
1	1000	47
2		45,5
3		44
4		43,5
5		42
1	1100	46
2		43
3		41
4		39
5		37
1	1200	46
2		42
3		39
4		36
5		34

Elaborado por Sara Villacreses Zambrano

5.2 Modelo Matemático Aplicado al funcionamiento y congelación del túnel IQF para patacones congelados

Mediante el análisis realizado en el capítulo 4 se determinó que los parámetros a considerar en la definición del tiempo de congelación son velocidad de aire en el túnel, temperatura de entrada del producto, composición, forma y tamaño del mismo.

Por esta razón se elaboró un modelo matemático en donde el operador sólo tiene que ingresar dichos parámetros y automáticamente obtiene el tiempo necesario de congelación, con este dato, puede operar el túnel IQF mediante velocidad de banda del mismo, este tiempo de congelación está dado en minutos.

El modelo se desarrollo en el programa Excel, Microsoft Office 2007, mediante las fórmulas descritas en el capítulo 3.

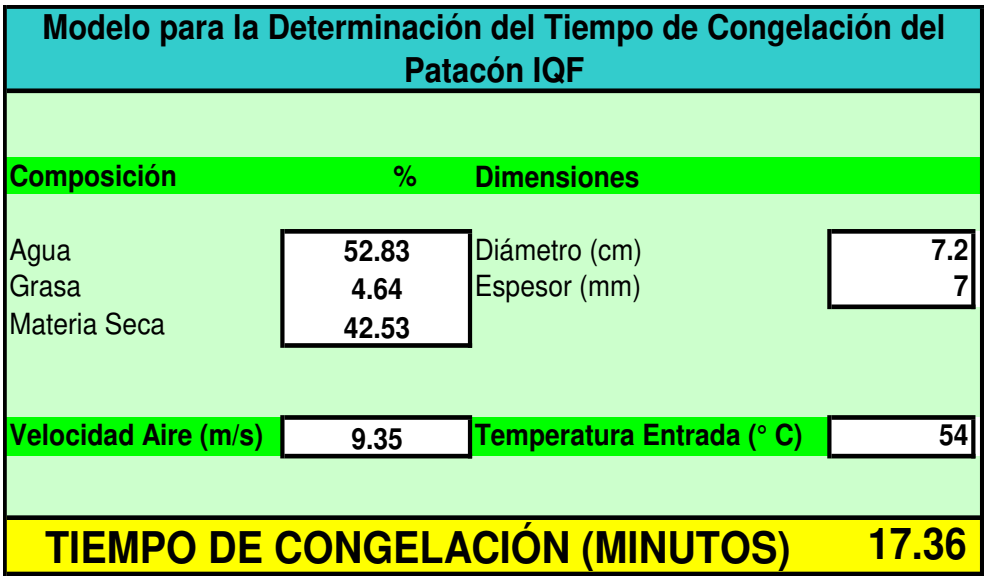


Figura 5.3 MODELO PARA LA DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE CONGELACIÓN

La figura 5.3 muestra el modelo matemático desarrollado, donde los cuadros blancos indican los datos a ingresar, mientras que el cuadro amarillo indica el tiempo que será necesario para la congelación del producto, según sea el caso que se esté presentando en el túnel de congelación.

Así mismo muestra las unidades en que se deberá ingresar estos datos, obteniéndose el tiempo de congelación en minutos. Este modelo permitirá determinar de forma rápida y fácil el tiempo necesario para congelar un producto con características particulares

de acuerdo a los casos que se presenten en la operación de un túnel de congelación IQF.

5.3 Determinación de Tiempos de Residencia de Congelación para los diferentes casos presentados en el Túnel IQF.

Para establecer valores de tiempos de congelación en el proceso de patacón congelado presentados en diferentes casos, se tomó en cuenta la velocidad de aire en el túnel IQF, la temperatura de entrada del producto al mismo y el espesor que se puede formar mediante el apilado del producto dentro del túnel, en este caso no se tomo en cuenta la composición del producto ya que siempre se trata del mismo.

Se elaboraron dos tablas donde se indica el tiempo de congelación para diferentes casos presentados, relacionando los tres valores descritos anteriormente de diferentes maneras y en los peores casos.

La tabla 12 muestra el tiempo en minutos necesario para congelar un patacón de 7 mm de espesor, a diferentes

velocidades de aire en el túnel y temperaturas de entrada del producto al mismo.

Se puede observar claramente que en el peor caso, es decir con una velocidad de aire del túnel de 7.84 m/s, y una temperatura de entrada del patacón de 59° C, se necesitan 21 minutos para congelarlo, mientras que en el caso que el proceso fuera ideal, como se muestra en el capítulo 4, el tiempo de congelación necesario es de 17 minutos, existiendo una diferencia de sólo 3 minutos.

Sin embargo estos datos fueron establecidos para un espesor de 7 mm, habiendo determinado anteriormente que cuando existe mucho producto en el túnel se apilan los patacones, llegando a apilarse hasta 4 patacones, llegando a un espesor de 28 mm, más no todos los patacones se apilan entre sí, por lo que para determinar los tiempos necesarios de congelación en el túnel IQF cuando existe mucho producto, se consideró un espesor promedio de 14 mm.

TABLA 17. TIEMPOS DE CONGELACIÓN PARA UN ESPESOR DE 14 MM A DIFERENTES VELOCIDADES DE AIRE Y TEPERTURAS DE ENTRADA DE PRODUCTO

Tiempo de Congelación necesario para un Espesor de 14 mm a diferentes Velocidades y Temperaturas de Entrada													
Velocidad de Aire (m/s)		7.84	8	8.25	8.5	8.75	9	9.25	9.5	9.75	10	10.25	10.5	10.67
Temperatura Entrada Producto (°C)	48	39.22	38.67	37.85	37.07	36.32	35.61	34.92	34.27	33.64	33.04	32.47	31.91	31.55
	49	39.56	39.01	38.18	37.39	36.63	35.91	35.23	34.57	33.93	33.33	32.75	32.19	31.82
	50	39.9	39.34	38.51	37.71	36.95	36.22	35.53	34.86	34.23	33.61	33.03	32.46	32.09
	51	40.24	39.68	38.83	38.03	37.26	36.53	35.83	35.16	34.52	33.9	33.31	32.74	32.37
	52	40.58	40.01	39.16	38.35	37.56	36.84	36.13	35.46	34.81	34.19	33.59	33.02	32.64
	53	40.92	40.35	39.49	38.67	37.89	37.15	36.44	35.75	35.1	34.47	33.87	33.29	32.91
	54	41.26	40.68	39.82	38.99	38.21	37.46	36.74	36.05	35.39	34.76	34.15	33.57	33.19
	55	41.6	41.02	40.15	39.32	38.52	37.77	37.04	36.35	35.68	35.05	34.44	33.85	33.45
	56	41.94	41.35	40.47	39.64	38.84	38.07	37.34	36.65	35.98	35.33	34.72	34.13	33.74
	57	42.28	41.69	40.8	39.96	39.15	38.38	37.65	36.94	36.27	35.62	34.99	34.4	34
	58	42.62	42.02	41.13	40.28	39.47	38.69	37.95	37.24	36.56	35.91	35.28	34.68	34.28
	59	42.96	42.36	41.46	40.6	39.78	39	38.25	37.54	36.85	36.19	35.56	34.96	34.56

Elaborado por Sara Villacreses Z.

En la tabla 13, se muestra los valores de tiempo en minutos necesarios de congelación para diferentes velocidades de aire en el túnel y temperaturas de entrada del producto al mismo, en el peor de los casos donde se tiene una velocidad de aire de 7.84 m/s, un espesor de 14 mm y una temperatura de entrada de 59 °C, el tiempo necesario de congelación es de 43 minutos, a diferencia del proceso ideal que es de 17 minutos, es decir una diferencia de 26 minutos.

Esto explica porque el producto no sale totalmente congelado, ya que este caso, aunque no se presenta a menudo, es un dato real, que resultó del monitoreo de datos realizado para determinar los límites de nuestro proceso.

Con la elaboración de estas dos tablas el operador tan solo tiene que buscar los valores de velocidad de aire y temperatura de entrada en la misma, para conocer el tiempo necesario de congelación del producto, esto facilita, agilita y mejora la operación del túnel de congelación.

5.4 Validación de Resultados

Para validar los resultados obtenidos a lo largo de este estudio, se midió el porcentaje de error obtenido del tiempo calculado mediante nuestro modelo matemático, y el tiempo real obtenido en el proceso para parámetros determinados en un día de trabajo.

La tabla 14 muestra los porcentajes de error obtenidos.

TABLA 14

VALIDACIÓN DE RESULTADOS

T inicial (°C)	h (W/M2k)	T final (° C)	tiempo (min)	Tiempo real (min)	% error
48	42,43	20,40	30	34	11,76
49	44,56	20,20	32	35	8,57
53	42,43	15,00	31	35	11,43
49.8	39,23	11.4	32	36	11,11
48,8	35,31	20,20	35	39	10,26
51.6	46,67	17,00	30	32	6,25
52.2	41	12.4	32	36	11,11
49	38,87	20,00	35	37	5,41
49,4	34,96	18,00	37	40	7,50
59	38,16	11,00	38	40	5,00
58.2	39,94	12,40	37	39	5,13
56.2	41	12,00	33	37	10,81

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

1. De acuerdo a la toma de datos, y análisis llevados a cabo a lo largo de este trabajo, se determinó que las causas de la calidad baja en el proceso de elaboración de patacón congelado IQF en una industria nacional, son ocasionadas mayormente por una mala operación en la etapa de congelación, específicamente en el túnel de congelación, ya que no existe parámetros que indiquen como operarlo de acuerdo al caso que se presente.

2. Mediante un estudio de tiempo; realizado al inicio de este trabajo, se pudo determinar las llamadas “horas pico”, que son las horas donde existe mayor ingreso del producto al túnel, por lo tanto una disminución considerable en el coeficiente de transferencia de calor. Gracias a esta determinación se relacionó como se comporta el túnel a través del tiempo, determinando cuáles son los parámetros más influyentes en su operación.

3. En un proceso de congelación existen tres parámetros de suma importancia que son: velocidad de aire en el túnel de congelación, pues de ésta depende el coeficiente de transferencia de calor, que no es más que la velocidad para remover el calor del alimento; temperatura de entrada del producto al túnel, pues mientras es más alta, mayor tiempo tardará el mismo en congelarse y la cantidad de alimento que ingresa al túnel, ya que a mayor cantidad del mismo, la eficiencia de operación va disminuyendo.

4. El tiempo de congelación determinado en este trabajo para las características del patacón elaborado en la industria nacional es de 17 minutos, siendo este ideal.

5. Se realizó un modelo matemático que permita de manera rápida y confiable determinar el tiempo de congelación necesario en los diferentes casos presentados en el proceso de elaboración de patacón congelado, de esta manera, se obtienen datos más precisos reduciendo pérdidas a causa de la baja de calidad del producto.

6. La validación de resultados demuestra un error promedio del 8.69%, indicando que el modelo matemático desarrollado es una buena

herramienta de ayuda para la determinación de tiempos de congelación en este proceso.

7. La temperatura de entrada del producto al túnel de congelación es uno de los parámetros que influye considerablemente en la remoción de calor del alimento, por esto, se recomienda colocar dos ventiladores en la banda transportadora antes de la entrada al túnel, para disminuir la temperatura del patacón, pues quedó demostrado que 1°C puede influir mucho en el tiempo de residencia de congelación.

8. Un dato importante a tomar en cuenta, es el espesor del patacón, pues para realizar los cálculos no se debe tomar en cuenta este dato, sino la suma del espesor de dos patacones.

TABLA 12. TIEMPOS DE CONGELACIÓN PARA UN ESPESOR DE 7 MM A DIFERENTES VELOCIDADES DE AIRE Y TEPERTURAS DE ENTRADA DE PRODUCTO

Tiempo de Congelación necesario para un Espesor de 7 mm a diferentes Velocidad Entrada										
Velocidad de Aire (m/s)		7,84	8	8,25	8,5	8,75	9	9,25	9,5	9,75
Temperatura Entrada Producto (°C)	48	18,93	18,63	18,2	17,78	17,38	17	16,64	16,3	15,97
	49	19,09	18,79	18,35	17,93	17,53	17,15	19,79	16,44	16,1
	50	19,25	18,96	18,51	18,09	17,68	17,3	16,93	16,58	16,24
	51	19,41	19,12	18,67	18,24	17,83	17,44	17,07	16,72	16,38
	52	19,58	19,28	18,82	18,39	17,98	17,59	17,22	16,86	16,52
	53	19,74	19,44	18,98	18,55	18,13	17,74	17,36	17	16,65
	54	19,9	19,6	19,14	18,7	18,28	17,88	17,5	17,14	16,79
	55	20,07	19,76	19,29	18,85	18,43	18,03	17,65	17,28	16,93
	56	20,23	19,92	19,45	19	18,58	18,18	17,79	17,42	17,07
	57	20,39	20,08	19,61	19,16	18,73	18,32	17,93	17,56	17,21
	58	20,55	20,24	19,76	19,31	18,88	18,47	18,08	17,7	17,34
	59	20,72	20,49	19,92	19,47	19,03	18,62	18,22	17,84	17,48

Elaborado por Sara Villacreses Z.

APÉNDICES

APENDICE A

kg/h ALCANZADOS A TRAVÉS DEL TIEMPO

Día	Hora	Flujo
16-mar	1	1250
	2	940
	3	878
	4	1150
	5	1130
19-mar	1	1180
	2	965
	3	885
	4	1175
	5	1050
20-mar	1	1260
	2	930
	3	850
	4	1155
	5	1140
21-mar	1	1270
	2	1085
	3	960
	4	1240
	5	1100
22-mar	1	1260
	2	930
	3	885
	4	1155
	5	1140

APENDICE B

REGISTRO DE TEMPERATURAS EN UN DIA

16-mar	UNIDADES	1	2	3	4	5
Flujo	(Kg/h)	1020	1200	1005	1125	1200

Temperatura de Entrada	°C	49	51	58,6	52,2	50,2
	°C	48,8	57,4	59,8	62,2	46,7
	°C	51,6	49	57,2	58	60,8
	°C	45,8	51,8	55,4	55,4	56,8
	°C	55,2	56,8	53,4	56,2	49,6
	°C	56,2	46,4	60,6	50,8	56,4
	°C	52,6	53,4	44,2	53	58,2
	°C	54,8	51,6	57,8	52,8	57,6
	°C	46,8	42,4	46,2	61	58,8
	°C	49,4	58,8	54	57,2	60,8
PROMEDIO	°C	**51,020**	**51,860**	**54,720**	**55,880**	**55,590**
Temperatura de Salida	°C	-13,6	-16,5	-17,4	-15,4	-8
	°C	-13,4	-13,4	-11	-9	-12,5
	°C	-19,6	-14	-18,2	-13,6	-18,4
	°C	-16	-14,9	-17,6	-16,8	-8,4
	°C	-10,8	-14,2	-10,8	-11,2	-13,4
	°C	-18,8	-15,5	-9,4	-8,4	-14,2
	°C	-10,2	-8,6	-10,2	-16,6	-12,8
	°C	-8,4	-7,5	-7,8	-8,2	-15,4
	°C	-10,2	-11,4	-15,4	-11,4	-14,4
	°C	-9	-9,2	-15,8	-10,6	-17,2
PROMEDIO	°C	**-13,000**	**-12,520**	**-13,360**	**-12,120**	**-13,470**

APÉNDICE C

FORMATO PARA EL MONITOREO DE DATOS DE VELOCIDAD DE AIRE

Día	Flujo (kg/h)	Velocidad 1 (m/s)	Velocidad 2 (m/s)

Día	UNIDADES	1	2	3	4	5
Flujo	(Kg/h)					

Temperatura de Entrada	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
PROMEDIO	°C					
Temperatura de Salida	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
	°C					
PROMEDIO	°C					

Temperatura de aire						

APENDICE E

FORMATO PARA EL ESTUDIO DE TIEMPOS

Día	Etapa	Hora	Tiempo

APENDICE F

METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UNA GRÁFICA DE CONTROL

1. Recoger aproximadamente 100 datos. Dividirlos en 20 0 25 subgrupos, con 4 o 5 en cada uno. El tamaño del grupo es generalmente entre 2 y 10 en la mayoría de los casos.

2. Calcule el promedio x para cada subgrupo $\underline{x = x1 + x2 + ...+ Xn,}$ donde n

$$n$$

es el tamaño de cada subgrupo. Por lo general, el resultado se calcula con una cifra decimal más aquellas de los datos originales.

3. Calcule el promedio bruto x, dividiendo el total de los x de cada subgrupo por el número de subgrupos k. $\underline{x = x1 + x2 + ...+ Xk,}$

$$k$$

4. Calcule el rango de cada subgrupo R restando el valor mínimo del valor máximo de los datos en un subgrupo. R = (valor máximo en un subgrupo) - (valor mínimo en un subgrupo)
5. Calcule el promedio R del rango R, dividiendo el total de los R de cada subgrupo por el número de grupos k. $\underline{R = R1 + R2 + ...+ Rk,}$

$$K$$

6. Calcule cada una de las líneas de control para la gráfica x con las siguientes fórmulas:

Línea Central	LC = x
Límite de control superior	LCs = x + A2 R
Límite de control inferior	LCi = x – A2 R

Lci no se tiene en cuenta cuando n es menor que 6.

A2 es el coeficiente determinado por el tamaño del subgrupo (n), y se muestra a continuación.

Tamaño del subgrupo n	**A2**
2	1.880
3	1.023

4	0.729
5	0.577
6	0.483

7. Prepare una hoja de papel cuadriculado y marque el eje vertical de la izquierda con los valores de x y el eje horizontal con el número de subgrupos.
8. Registre los valores de x para cada subgrupo sobre la misma línea vertical en el orden del número del subgrupo.

APENDICE G

COEFICIENTES PARA PROPIDADES DE LOS ALIMENTOS

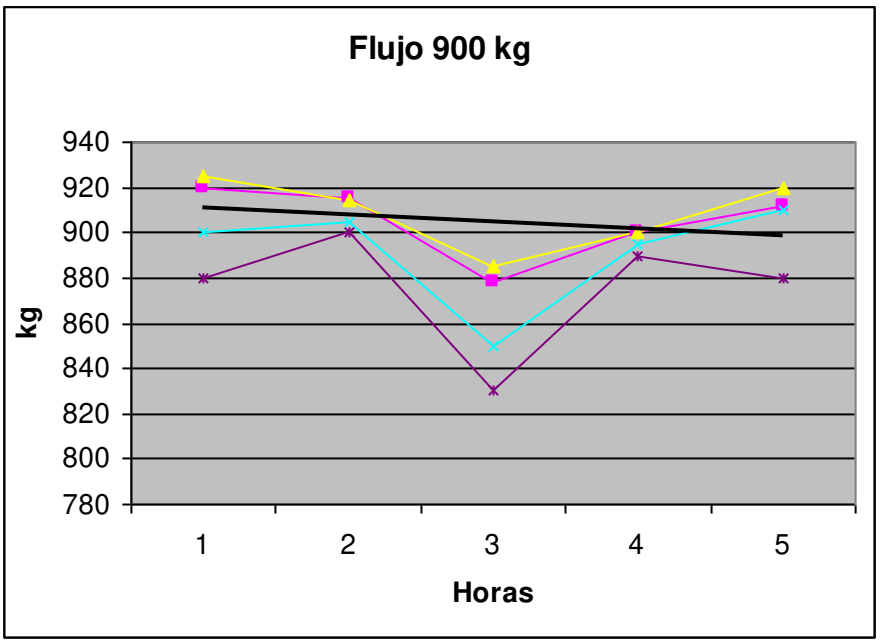
Table A.2.9 Coefficients to Estimate Food Properties

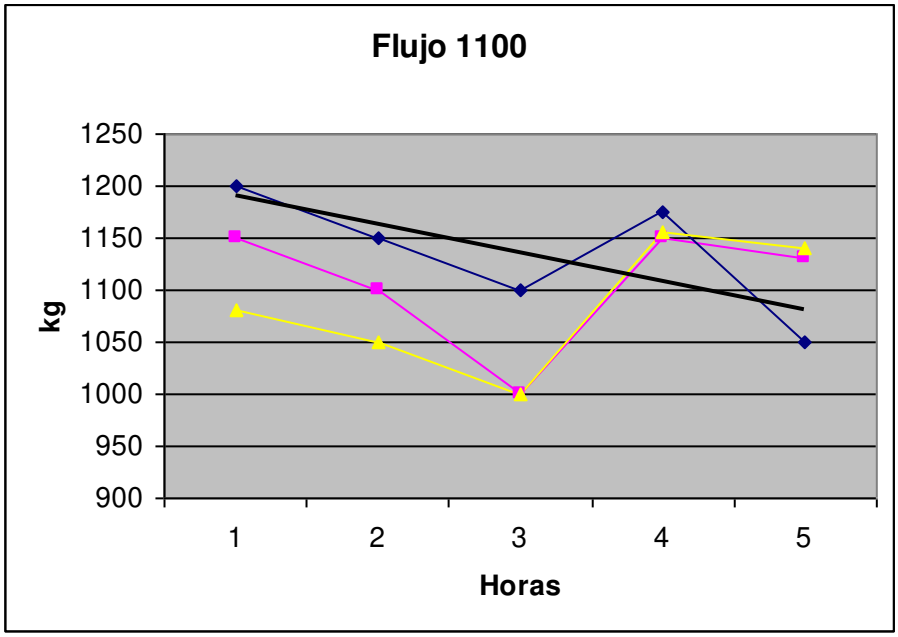
Property	Component	Temperature function	Standard error	Standard % error
k (W/[m °C])	Protein	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$	0.012	5.91
	Fat	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$	0.0032	1.95
	Carbohydrate	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	0.0134	5.42
	Fiber	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$	0.0127	5.55
	Ash	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$	0.0083	2.15
	Water	$k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2$	0.0028	0.45
	Ice	$k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T + 1.0154 \times 10^{-4}T^2$	0.0079	0.79
α (m^2/s)	Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-2} + 4.7578 \times 10^{-4}T - 1.4646 \times 10^{-6}T^2$	0.0038	4.50
	Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-2} - 1.2569 \times 10^{-4}T - 3.8286 \times 10^{-8}T^2$	0.0020	2.15
	Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-2} + 5.3052 \times 10^{-4}T - 2.3218 \times 10^{-6}T^2$	0.0058	5.84
	Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-2} + 5.1902 \times 10^{-4}T - 2.2202 \times 10^{-6}T^2$	0.0026	3.14
	Ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-1} + 3.7321 \times 10^{-4}T - 1.2244 \times 10^{-6}T^2$	0.0022	1.61
	Water	$\alpha = 1.3168 \times 10^{-1} + 6.2477 \times 10^{-4}T - 2.4022 \times 10^{-6}T^2$	0.0022×10^{-6}	1.44
	Ice	$\alpha = 1.1756 - 6.0833 \times 10^{-3}T + 9.5037 \times 10^{-5}T^2$	0.0044×10^{-6}	0.33
ρ (kg/m^3)	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^{3} - 5.1840 \times 10^{-1}T$	39.9501	3.07
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^{2} - 4.1757 \times 10^{-1}T$	4.2554	0.47
	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^{3} - 3.1046 \times 10^{-1}T$	93.1249	5.98
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^{3} - 3.6589 \times 10^{-1}T$	8.2687	0.64
	Ash	$\rho = 2.4238 \times 10^{3} - 2.8063 \times 10^{-1}T$	2.2315	0.09
	Water	$\rho = 9.9718 \times 10^{2} + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$	2.1044	0.22
	Ice	$\rho = 9.1689 \times 10^{2} - 1.3071 \times 10^{-1}T$	0.5382	0.06
c_p (kJ/[kg °C])	Protein	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$	0.1147	5.57
	Fat	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$	0.0236	1.16
	Carbohydrate	$c_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$	0.0986	5.96
	Fiber	$c_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$	0.0293	1.66
	Ash	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$	0.0296	2.47
	Water[a]	$c_p = 4.0817 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$	0.0988	2.15
	Water[b]	$c_p = 4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$	0.0159	0.38
	Ice	$c_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$		

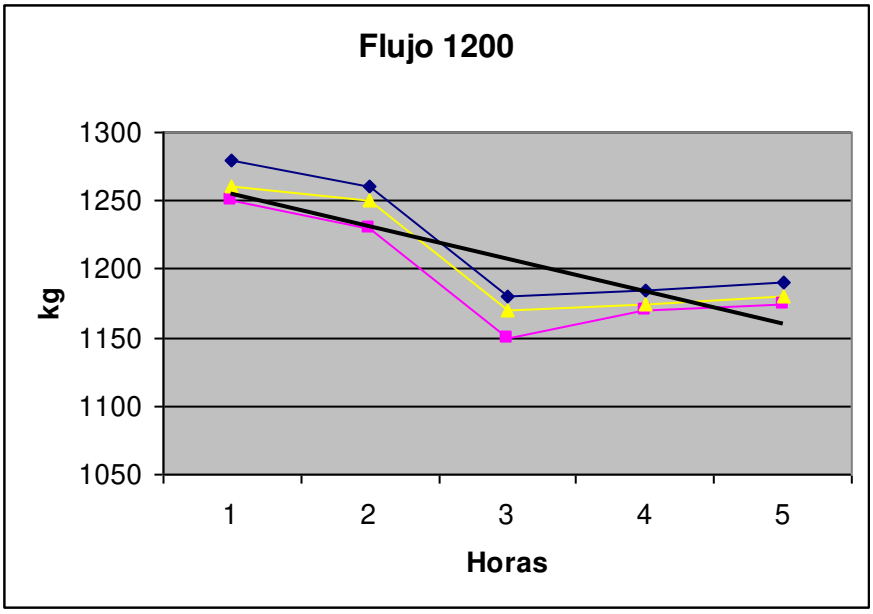
Source: Choi and Okos (1986).
[a]For the temperature range of −40 to 0°C.
[b]For the temperature range of 0 to 150°C.

APENDICE H

GRAFICAS DE RELACIÓN DE FLUJO VS TIEMPO


Flujo 900 kg
940
920
900
880
860
840
820
800
780
kg
1
2
3
4
5
Horas


Flujo 1100
1250
1200
1150
1100
1050
1000
950
900
kg
1
2
3
4
5
Horas


Flujo 1200
1300
1250
1200
1150
1100
1050
kg
1
2
3
4
5
Horas

BIBLIOGRAFÍA

1. HELDMAN,DR, Food Properties during freezing, Food Technology, 1982

2. PERRY, R Y CHILTON, C, Chemical Engineers Handbook, Quinta Edición, Editorial Mc Graw Hill.

3. UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO, FACULTAD DE RESURSOS NATURALES, ESCUELA DE ALIMENTOS, Tópicos en Transferencia de Calor y Propiedades Termofísicas en Refrigeración y Congelación de Alimentos, Editorial Maval, 1986, Chile.

4. INSTITUTO NACIONAL DEL FRIO, Alimentos congelados procesado y distribución. Traducido por León Villanúa Fungairiño, Editorial Acribia S.A Zaragoza, España.

5. RAMÍREZ JUIDIAS, E; LEÓN BONILLO, MJ. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de la Universidad de Sevilla. Predicción de Tiempos de Congelación y Descongelación de Alimentos.

6. MADRID, ANTONIO Y GOMEZ, JOSE. Refrigeración, congelación y envasado de los alimentos, Editor Madrid Vicente, ediciones, España

7. DA-WEN.SUE. Handbook of Frozen Food Processing and Packaging. Taylor and Francis group. 2006 USA

8. www1, 2007: http://es.wikipedia.org/wiki/Congelaci%C3%B3n

9. www2, 2007: http:// www.monografias.com/trabajos15/congelacion-alimentos/congelacion-alimentos.shtml

10. www3, 2007: http:// www.quiminet.com.mx

11. www4, 2007:http://www.botanical-online.com/platanos1.htm

12. www5, 2007: http://html.rincondelvago.com/congelacion-de-alimentos.html

13. www6,2008: http://www.fmctechnologies.com/FoodTech/FruitsandVegetables/Freezers/IQFFreezers/FLoFREEZEMandS.aspx

14. www7,2008: http://www.tecvirtual.com/ibq/alimentos/ing_alimentos/36congelacion.htm

15. www8,2008 http://es.wikipedia.org/wiki/Calor_espec%C3%ADfico

16. www9,2008 http://es.wikipedia.org/wiki/Densidad

17. www10,2008 http://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_t%C3%A9rmica

18. www11, 2009 http://www.euroresidentes.com/Alimentos/definiciones/platano-macho.htm

19. www12, 2009 http://www.consumer.es/web/es/alimentacion/aprender_a_comer_bien/curiosidades/2004/01/15/94142.php

20. www13, 2009 www.sica.gov.ec

21. www14, 2009 http://www.tecvirtual.com/ibq/alimentos/ing_alimentos/35congelacion.htm