



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DEL MODO DE CONTROL DEL PROCESO DE TRATAMIENTO HIDROTÉRMICO PARA MANGOS

Luighi De Francesch-Saavedra

Piura, marzo de 2016

FACULTAD DE INGENIERÍA

Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con Mención en Automática y
Optimización

De Francesch, L. (2016). *Estudio y optimización del modo de control del proceso de tratamiento hidrotérmico para mangos* (Tesis de Máster en Ingeniería Mecánico-Eléctrica con Mención en Automática y Optimización). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

U N I V E R S I D A D D E P I U R A
FACULTAD DE INGENIERÍA



“Estudio y optimización del modo de control del proceso de tratamiento hidrotérmico para mangos”

Tesis para optar el grado de
Máster en Ingeniería Mecánico Eléctrica

Luighi Giuseppe De Francesch Saavedra

Asesor: Dr. Ing. Justo Oquelis Cabredo

Piura, Marzo 2016

A Dios.

A mi familia y en especial a mis padres Giuseppe De Francesch y Luz Saavedra, por todo su amor, paciencia y apoyo para cumplir esta meta.

A mis hermanos Jonathan y Valeria, por todas las cosas que hemos vivido juntos.

A mi prima Anghelina y mi sobrino Salvador, por lo hermosamente diferentes que fueron mis años de estudio, gracias a su compañía.

Prólogo

El tema del estudio nace como iniciativa de buscar algún modo de compatibilizar los protocolos fitosanitarios de exportación de mango a los mercados de Japón y Estados Unidos. Ambos requerimientos pueden cumplirse en un solo tratamiento hidrotérmico, para ello se debe modificar la estrategia de control del proceso. Dentro de estos cambios se planteó el estudio de los consumos de vapor y exigencias de ambos países para recibir la fruta en sus respectivos puertos. Una vez estudiado el proceso y la respuesta de los cambios de temperatura del agua y la pulpa de mango en el tanque, se da parte a la identificación de un modelo matemático y las simulaciones de control, respetando los tiempos establecidos para cada lote de fruta.

Como parte del proyecto se utilizaron los softwares: Productivity Suite, EZSeries Touch Panel y Matlab, con estos programas se ha podido llevar a cabo el algoritmo insertado en el PAC del tablero de control, la interfaz gráfica para el monitoreo de temperaturas y el análisis de identificación e implementación de lazos de control para la optimización del proceso de tratamiento hidrotérmico para mangos. Todo esto es importante porque ha permitido la integración de varios sistemas para implementar el actual sistema de control asegurando una buena producción y ahorro energético.

Como corresponde también, mi agradecimiento a mis profesores y compañeros de investigación por la motivación brindada durante el desarrollo de la presente tesis. De manera especial agradezco al Dr. Ing. Justo Oqueli Cabredo, por sus valiosas enseñanzas, certero asesoramiento académico y confianza en la materia de investigación. Asimismo al Dr. Ing. Edilberto Vásquez Díaz, Dr. Ing. William Ipanaqué y a la empresa Biofruit S.A. por su colaboración y atención que me ofrecieron ante cualquier duda o problema que se presentaba durante el desarrollo de la tesis.

Resumen

El desarrollo de la tesis colabora con el proyecto “Diseño y construcción de un prototipo dual óptimo, para el proceso hidrotérmico del mango para cumplir protocolos fitosanitarios de exportación a los mercados de Japón y Estados Unidos en el Valle de San Lorenzo - Piura” contrato N° 147- FINECYT-IA-2013, cofinanciado por el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad de INNÓVA PERÚ, la empresa BIOFRUIT S.A. y la Universidad de Piura.

La puesta en marcha de este nuevo tanque en la ciudad de Tambogrande es resultado del trabajo conjunto de estas entidades. La investigación participa de la etapa del proceso en sí misma dado que la fase constructiva pertenece a la etapa anterior la cual ya ha sido concluida y verificada.

Al cabo de la investigación se ha cumplido con los objetivos trazados:

- Estudiar el ahorro energético, económico y mejoramiento de la calidad que ofrecen los modos de control avanzado en la industria y que pueden ser implementados en el proceso de tratamiento hidrotérmico para optimizar la cadena productiva de las empresas agroindustriales exportadoras del Perú.
- Identificar el modelo matemático del proceso de tratamiento hidrotérmico.
- Parametrizar el proceso en función al tipo de mango, protocolo de exportación y características del tanque en que va ser sumergido.
- Simular los diferentes modos de control automático con el proceso de tratamiento hidrotérmico.
- Comparar las demandas energéticas que implica cada modo de control y su efecto en la calidad.
- Evaluar económica de la implementación de este nuevo sistema.

Los resultados obtenidos comprenden las respuestas de tratamientos hidrotérmicos sometidos a diferentes modos de control, el comparativo de los consumos de vapor y las simulaciones utilizando modos de control avanzado. También se presenta un esquema del ahorro energético y su equivalente económico para los ratios de producción.

Índice

Introducción	2
Capítulo 1	5
1 Tratamientos de preservación aplicados a productos de exportación	5
1.1 Estándar de seguridad para el control de plagas	6
1.1.1 Nivel de seguridad ‘Probit-9’	6
1.2 Fundamentos de transferencia de calor aplicados al tratamiento de alimentos	6
1.2.1 Transferencia de calor	9
1.2.2 Modelado de transferencia de calor en frutos	10
1.3 Efectos de los tratamientos de calor en la fisiología de los frutos	13
1.3.1 Cambios en la respiración de frutos	13
1.3.1.1 Frutos climatéricos y no climatéricos	14
1.3.1.2 Patrón climatérico	14
1.3.2 Aumento velocidad de maduración, aumento de producción de etileno	14
1.3.2.1 Medidas preventivas ante exposiciones de etileno	14
1.3.2.2 Control de la maduración	15
1.3.3 Posibilidad de daño externo	15
1.3.4 Incremento en la pérdida de agua	15
1.3.5 Posibilidad de daño interno	16
1.3.6 Cambios sensorial al gusto	16
1.4 Estudio cinético de la muerte de insectos por efecto térmico	16
1.4.1 Adaptación de insectos, larvas a gradientes térmicos	17
1.4.2 Métodos experimentales para determinar la cinética de mortandad por efectos térmicos	17
1.4.3 Modelo matemático de la mortalidad cinética en insectos	17
1.4.4 Niveles de tiempo letal	21
Capítulo 2	23
2 Estudio del tratamiento hidrotérmico para mangos y su escenario económico en el país	23
2.1 Escenario de la producción y exportación de mango en Perú	24
2.1.1 Exportaciones de mango	24
2.2 Necesidad del mejoramiento del tratamiento hidrotérmico	26
2.3 Objetivos generales del estudio del tratamiento hidrotérmico	27
2.3.1 Objetivos específicos del estudio del tratamiento hidrotérmico	27
2.4 Metodología para el estudio de tratamiento hidrotérmico	27

2.5	Protocolo de tratamiento hidrotérmico	27
2.5.1	Ventajas del tratamiento hidrotérmico	28
2.5.2	Desventajas del tratamiento hidrotérmico	29
2.6	Principales consideraciones entre los protocolos de EEUU y Japón.....	29
2.6.1	Unificación de protocolos de exportación para la mejora industrial.....	30
2.7	Diseño del tanque híbrido - dual para tratamiento hidrotérmico	31
2.7.1	Puesta en marcha del tanque híbrido	34
2.7.2	Ensayos experimentales en empresa Biofruit.....	36
2.7.2.1	Detalle de ensayos experimentales.....	36
2.7.2.2	Descripción del ensayo N°1 – 7 de abril de 2015.....	37
2.7.2.3	Descripción del ensayo N°2 – 8 de abril de 2015.....	38
2.7.2.4	Descripción del ensayo N°3 – 9 de abril de 2015.....	40
2.7.2.5	Descripción del ensayo N°4 – 29 de enero de 2016.....	42
2.7.2.6	Descripción del ensayo N°5 – 17 de febrero de 2016	43
Capítulo 3	45
3	Identificación matemática del proceso de tratamiento hidrotérmico.....	45
3.1	Identificación de procesos industriales	45
3.2	Metodología de identificación	45
3.3	Calentamiento con carga (CC).....	47
3.4	Enfriamiento con carga (EC)	48
3.5	Calentamiento sin carga (CSC).....	49
3.6	Enfriamiento sin carga (ESC).....	50
Capítulo 4	51
4	Estudio y diseño de controladores en variables de estados para una futura implementación en el proceso de tratamiento hidrotérmico.....	51
4.1	Análisis de la implementación de controlador, estimador y estimador reducido en variables de estado.....	52
4.2	Diseño de regulador proporcional en variables de estado.	52
4.3	Diseño de estimador en variables de estado.	55
4.4	Diseño de estimador y regulador acoplados.	58
4.5	Diseño de estimador reducido.....	61
Conclusiones y Recomendaciones	65
Referencias Bibliográficas.....	67

Introducción

El desarrollo de la ingeniería, la generación de tecnologías, los nuevos estándares de calidad y los exigentes cambios del entorno, implica una rápida adaptación y ello se logra con competitividad, investigación, desarrollo e innovación. A este tipo de situaciones no es ajena el aprovechamiento de los recursos naturales, uno de ellos es el uso eficiente del combustible que demandan las calderas y el tiempo de entrega de un bien perecible como lo es la fruta de exportación. Para ello nuestro país y la empresa privada vienen invirtiendo en una serie de proyectos y gestionando diferentes tratados de comercio.

Forma parte de este plan, el proyecto “Diseño y construcción de un prototipo dual óptimo, para el proceso hidrotérmico del mango para cumplir protocolos fitosanitarios de exportación a los mercados de Japón y Estados Unidos en el Valle de San Lorenzo- Piura”. Aquí nace el tema de tesis que tiene por objetivo optimizar la parte operativa del tratamiento en cuanto a la acción de control sobre la instrumentación instalada. Para ello la tesis se ha dividido en cinco capítulos, los cuales se resumen a continuación.

En el primer capítulo, se da una visión global de lo que comprenden los tratamientos con calor aplicados a los frutos poscosecha, se detalla el aspecto teórico de la necesidad de aplicar estas medidas a los alimentos y sus beneficios para la conservación de los mismos. En el segundo capítulo se detalla la parte experimental realizada en la empresa Biofruit, los resultados de los ensayos de los tratamientos hidrotérmicos aplicados en el nuevo tanque dual. Estos dos primeros capítulos son importantes para situar al lector dentro del contexto de la tesis.

El tercer capítulo abarca el aspecto teórico de la identificación de procesos, parte fundamental para lograr un modelo matemático que se adapte al propósito del proyecto. A lo largo de este capítulo se explican los métodos y técnicas para llegar a una función que represente el tratamiento hidrotérmico y habilite con esto al siguiente capítulo. Durante el desarrollo del cuarto capítulo, se estudia los modos de control avanzado, su modo de seguimiento del set point, la implicancia en la señal de comando y su demanda energética.

Finalmente en capítulo número cinco se detalla el ahorro en los consumos de vapor y su aspecto económico para la empresa, se desarrolla los cuadros de retorno de la inversión y el tiempo que se gana en la entrega de un producto de exportación al cumplir los protocolos fitosanitarios de países como Japón y Estados Unidos.

Capítulo 1

Tratamientos de preservación aplicados a productos de exportación

Desde tiempos pasados, el calor ha tenido variedad de usos, el que interesa estudiar durante este capítulo es el relacionado a la preservación de alimentos. El calor para este tipo de aplicación puede ser generado por varias formas: combustión, resistencias eléctricas, reacciones químicas y por exposición a campos electromagnéticos.

Bajo esta directriz el calor es usado para los requerimientos de los métodos del control de plagas a productos o mercancías que van a ser almacenados y luego servirán para consumo humano. La forma en que se aplica un tratamiento afecta tanto al producto como a la plaga que se quiere controlar, por lo tanto el éxito del método empleado se verificará en la no presencia de insectos ni larvas y en el inexistente daño causado al producto.

Los tratamientos poscosecha, según la historia de la humanidad son aplicados recientemente y por ende aún están en desarrollo. Antiguamente el almacenar productos conllevaba a la presencia de algunas plagas pero era tolerado. Sin embargo, fueron dos los eventos que obligaron a mejorar y desarrollar apresuradamente el cuidado de los alimentos luego de ser cosechados.

La primera situación es relativa a la ubicación y temporada de ciertas plagas, su biología y distribución geográfica era bastante definida. Sin embargo, con el incremento de los viajes de personas, los movimientos migratorios y principalmente con el incremento de las exploraciones comerciales, las larvas e insectos podían ser transportados a nuevas áreas. Estas nuevas zonas con condiciones climáticas para su desarrollo fueron el inicio de la proliferación de plagas fuera de su zona normal. Resultado de esta preocupación se tomó una serie de medidas en cuanto a los procedimientos y regulaciones pertinentes para mantener en cuarentena los productos exportados e importados.

El segundo evento que llevó al desarrollo de los métodos de preservación poscosecha fue evitar el daño económico que causaba a los distribuidores mantener almacenadas mercancías que fueran afectadas por alguna plaga. Gracias al avance tecnológico en la agricultura y a la mejor ganancia que representa un producto colocado en supermercados, emergió un interés global en mantener estos productos habilitados para su consumo. (Hansen & Johnson, 2007)

1.1 Estándar de seguridad para el control de plagas

Las plagas, larvas e insecto en general afectan al almacenamiento, la venta y comercio de los productos alimenticios ya que los dejan inhabilitados para el consumo humano. Su presencia en cualquier cosecha representa:

- Una pérdida de tiempo ya que se trabajó en vano en su cultivo.
- Una pérdida económica porque esos alimentos no son vendidos y deben ser desechados con el formalismo de un residuo sólido. (Ver figura 1)
- Son vectores de posibles problemas ambientales y de salud.

Aunque la fumigación y la aplicación de insecticidas en la precosecha es el método más común tiene sus desventajas. Ante esta situación se vuelve obligatorio poner en práctica métodos de control de plagas innovadores. Por eso se ha venido desarrollando a lo largo de estas décadas tratamiento con calor para productos poscosecha con el fin de atacar biológicamente a las posibles infestaciones que lleven los alimentos. (Ver tabla 1)



Figura 1- Destrucción de fruta

Fuente: http://cesavenay.org.mx/?page_id=446

1.1.1 Nivel de seguridad 'Probit-9'

Este estándar es el nivel de seguridad que exigen la gran cantidad de países para productos alimenticios de importación. Se llama así porque se asegura que el 99.996832% de las plagas más extendidas y populares en el mundo se han neutralizado. En términos prácticos se puede decir que utilizando el nivel Probit-9 sólo podrían supervivir 32 de casi un millón de plagas conocidas. Este nivel de seguridad es normalmente aplicado a productos de los cuales se desconoce con que podrían estar infestados o tienen una alta probabilidad y susceptibilidad de ser atacados.

1.2 Fundamentos de transferencia de calor aplicados al tratamiento de alimentos

Los métodos de tratamientos térmicos usando agua caliente, vapor, microondas, aire caliente forzado y radiofrecuencia vienen siendo investigados extensivamente como alternativa a la fumigación de cultivos en los cuales se usan pesticidas.

En cuanto al método de tratamiento de calor y su aplicación teórica se usa a las frutas como elemento de análisis térmico dado que son los elementos más representativos de los amplios productos agrícolas. (Tang & Wang, 2007)

Tabla 1- Tratamientos Térmicos USA

Producto	Plagas Objetivo	Descripción del Tratamiento
Inmersión en agua caliente		
Limas	<i>Cochinilla y otras plagas superficiales</i>	49°C o mayor durante 20 .
Longan (Lychee de Hawái)	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis</i>	49°C o mayor durante 20 min.
Mango	<i>Ceratitidis capitata, Anastrepha spp, Anastrepha ludens</i>	46°C durante 65 a 110 min, dependiendo del tipo, tamaño y forma del fruto.
Aire forzado a alta temperatura		
Cítricos de México	<i>Anastrepha spp.</i>	Elevar la pulpa de la fruta a 44°C en un lapso de 90 minutos, luego mantener a 44° C durante 100 minutos.
Cítricos de Hawái	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis y cucurbitae</i>	Elevar a 47.2°C el centro de la fruta y mantener por lo menos 4 horas el tiempo total del tratamiento.
Mango de México	<i>Anastrepha luden, oblique y serpentina</i>	Llevar hasta 48°C la temperatura de la superficie del fruto.
Papaya de Chile, Belice y Hawái	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis y cucurbitae</i>	Elevar a 47.2°C el centro de la fruta y mantener por lo menos 4 horas el tiempo total del tratamiento.
Rambután de Hawái	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis</i>	Elevar la pulpa de la fruta a 47,2°C en un lapso de 60 minutos, luego mantener a 47,2° C durante 20 minutos.
Tratamiento de calor con vapor		
Pimientos, berenjena, papaya, piña, tomate, calabaza de Hawái	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis y cucurbitae</i>	44.4°C (centro de fruta) por 8.75h (calentamiento variable)
Clementina, uvas, naranja, mango de México	<i>Anastrepha spp.</i>	Elevar el centro de la fruta a 43.3°C en un lapso de 8h, luego mantener a 43.3°C por 6h
Lychee de Hawái	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis</i>	Elevar la pulpa de la fruta a 47,2°C en un lapso de 60 minutos, luego mantener a 47,2° C durante 20 minutos
Mango de Filipinas	<i>Bactrocera spp.</i>	Elevar la pulpa de la fruta a 46°C en un lapso de 4h, luego mantener a 46°C durante 10 minutos
Mango de Taiwan	<i>Bactrocera dorsalis</i>	Elevar hasta 46.5°C la pulpa de la fruta y luego mantener este valor por 30 minutos
Papaya	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis y cucurbitae</i>	Elevar la temperatura de la pulpa a 47.2°C en un lapso de 4h
Pitaya de Colombia	<i>Ceratitidis capitata, Anastrepha fraterculus</i>	Elevar el centro de la fruta a 46°C en un lapso de 4h, luego mantener a 46°C por 20 minutos
Rambután de Hawái	<i>Ceratitidis capitata, Bactrocera dorsalis</i>	Elevar la pulpa de la fruta a 47,2°C en un lapso de 60 minutos, luego mantener a 47,2° C durante 20 minutos

Fuente: United States Department of Agriculture (USDA)

La transferencia de calor convencional para el tratamiento de alimentos se considera de la siguiente manera: Primero se da una transferencia de calor por convección hasta la superficie del producto y luego de la superficie hasta el centro de la fruta es predominantemente por conducción. Los efectos por radiación son menores. Los coeficientes de transferencia de calor son variables ya que la temperatura modifica estos valores durante los tratamientos.

Una dificultad de los tratamientos con aire caliente y agua es el tiempo que demoran en llegar a los valores de los requisitos fitosanitarios. La baja razón de transferencia de calor hace que se tomen horas de tratamiento. Algunos tratamientos requieren para alcanzar la temperatura de desinfección un rango de 23 minutos para cerezas y hasta 6 horas para manzanas. (Hansen J. D., 1992)

Generalmente la energía térmica que demanda el proceso depende de tres factores globales:

- 1) De la fruta en sí misma (Tipo, tamaño y forma)
- 2) De la temperatura media del tratamiento
- 3) Del tipo de tratamiento empleado

El resultado de una larga exposición a temperaturas altas sin un buen control puede causar un daño interno y externo que va desde una pérdida de cascara, picaduras, ablandamiento anormal y modificaciones en el color. (Lurie, 1998)

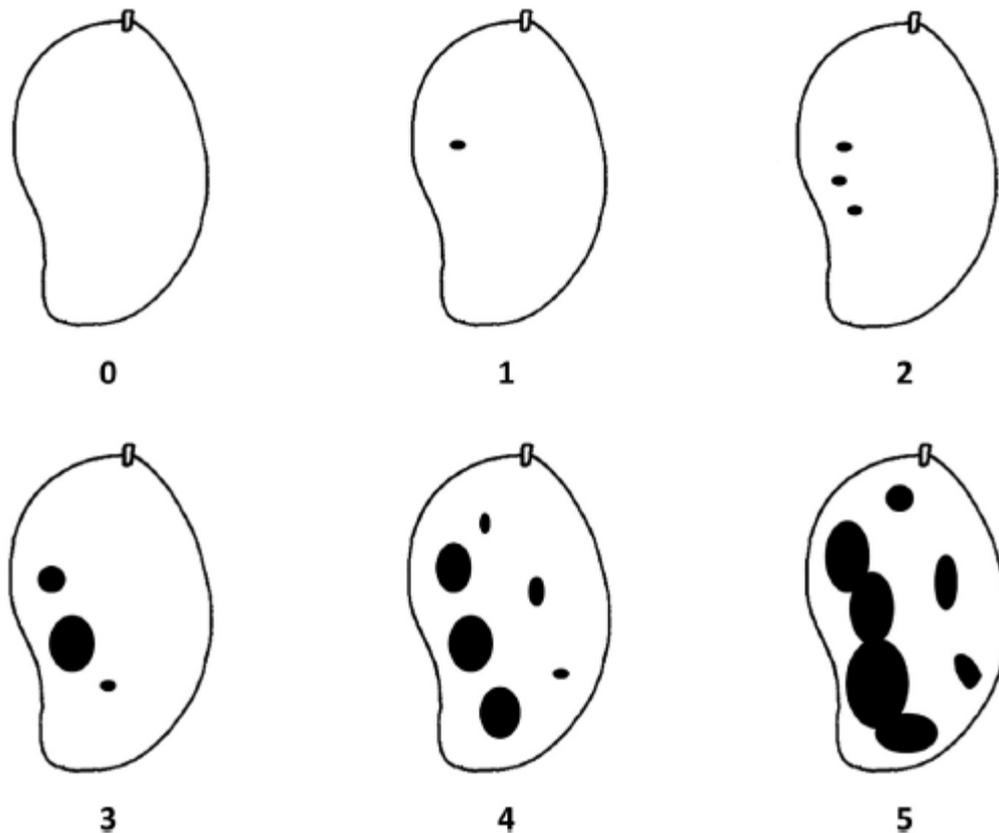


Figura 2- Índice de severidad de antracnosis en mangos

Fuente: Revisiting the efficacy of hot water treatment in managing anthracnose and stem-end rot diseases of mango cv. 'Carabao'

La figura 2 muestra en una escala del 0 al 5 la evolución de antracnosis en un mango. Donde 0 = no hay puntos visibles, 1= se aprecia una mancha, punto ablandado de color oscuro que mide entre 1 a 5 mm de diámetro en la epidermis del mango, 2= se aprecia entre 2 a 3 puntos de iniciación de antracnosis con diámetros también de 1 a 5 mm, 3= el diámetro de las manchas supera los 5 mm, 4= aparecen nuevas puntos de plaga y todos van creciendo en diámetro, 5 = los puntos de ataque con diámetros mayor a 5 mm se fusionan.

1.2.1 Transferencia de calor

Para realizar un análisis de transferencia de calor en frutas primero es necesario determinar las ventajas y limitantes de este método, también se debe considerar el control y perfil de temperaturas dentro de un rango de trabajo específico.

La primera ley de la termodinámica, referente al principio de conservación de energía aplicado a un sistema cerrado puede ser también utilizado para analizar la transferencia de calor en las frutas. Basados en un balance de energía, la variación de la energía interna de una fruta es resultado del calor recibido por el tratamiento al que ha sido expuesto.

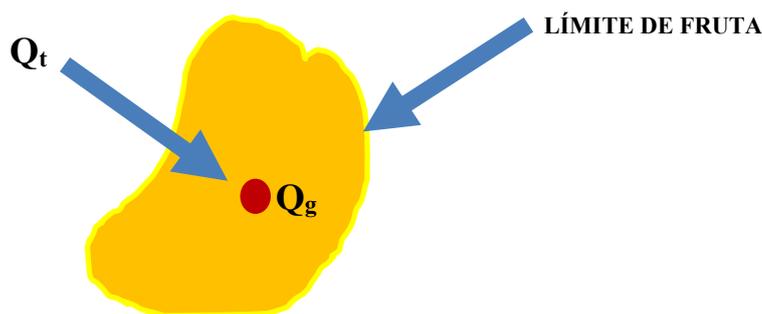


Figura 3- Aplicación de conservación de energía en una fruta

Tomando al fruto como un cuerpo incompresible, se puede plantear la ecuación 1.1

$$Q_t + Q_g = \rho v C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

Donde:

- Q_t : Calor transferido hacia la fruta
- Q_g : Calor generado dentro de la fruta
- ρ : Densidad de la fruta $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- v : Volumen de control referido a la fruta $[m^3]$
- C_p : Calor específico de la fruta $\left[\frac{J}{kg.K}\right]$
- T : Temperatura de la fruta $[K]$
- t : Tiempo $[s]$

El calor transferido hacia la fruta Q_t puede consistir en los tres modos de transferencia de calor convencionales: Conducción, convección y radiación.

1.2.2 Modelado de transferencia de calor en frutos

Por simplicidad para este modelado, en el análisis se va tener en cuenta a las frutas que tienen forma medianamente esférica, como manzanas, cerezas, naranjas y mangos también. Esto se hace porque la transferencia de calor se puede considerar simétrica en todo el volumen de la fruta desde la superficie hasta el centro de la misma. Con ello el perfil de temperaturas es una función de la posición radial y del tiempo que lleva en tratamiento.

En la superficie de la fruta cuando $r = r_0$, la transferencia de calor pasa de convección a conducción siguiendo la ecuación 1.2 y 1.3. (Ver figura 4)

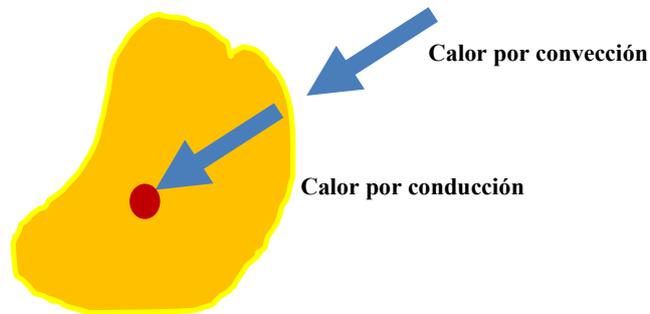


Figura 4- Modo de transferencia de calor dentro de una fruta

En los alrededores de la fruta, la transferencia de calor se da en forma convectiva ya que el fluido circundante puede ser agua, vapor o aire caliente según el tratamiento. Luego, el calor hará que la superficie del producto eleve su temperatura y se dé la transferencia de calor en forma conductiva dentro de la fruta. La ley de Fourier establece para este tipo de transferencia térmica la ecuación 1.2.

$$-k * A * \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \text{Flujo de calor hacia el fruto} \quad (1.2)$$

Esta ecuación determina el régimen transitorio de temperaturas dentro la fruta, considerando que es un medio isotrópico y que además es en sentido contrario al gradiente térmico. Ahora, tomando en cuenta la parte externa de la fruta tenemos transferencia de calor por convección, su planteamiento matemático sigue la expresión 1.3.

$$\text{Flujo de calor hacia el fruto} = h * A * [T(r_0, t) - T_e] \quad (1.3)$$

Ambas ecuaciones se cumplen en el límite exterior de la fruta (por eso se ha evaluado en $r = r_0$), por tanto se pueden igualar 1.2 y 1.3, además de simplificar el valor del área.

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = h[T(r_0, t) - T_e] \quad (1.4)$$

Donde

- k : Conductividad térmica de la fruta $\left[\frac{W}{m K} \right]$
- T : Temperatura de la fruta $[K]$
- r : Distancia radial desde el centro de mango $[m]$
- h : Coeficiente de convección medio $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

Cabe aclarar que el coeficiente de convección es el término más exigente de determinar, dado que se obtiene por métodos experimentales que a su vez depende de factores como:

- El tipo de convección (si es forzada o natural)
- Si el fluido está en régimen laminar o turbulento
- Velocidad del flujo
- Viscosidad, densidad y temperatura del fluido
- Calor específico del fluido
- Conductividad térmica del fluido
- Forma y rugosidad de superficie de intercambio de calor

Haciendo referencia a la ecuación 1.1 se puede introducir el término correspondiente a Q_t por el calor de conducción.

$$Q_t + Q_g = \rho v C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.1)$$

Ley de Fourier unidimensional para transferencia de calor en material isotrópico

$$Q_t = -(k)(A) \frac{dT}{dx} \quad (1.5)$$

Ley de Fourier considerando los tres ejes cartesianos del elemento en estudio

$$Q_t = -kv \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (1.6)$$

Transformado a coordenadas esféricas

$$Q_t = -kv \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (1.7)$$

De esta manera podemos plantear que el aumento de temperatura interna de la fruta se debe al calor que ha recibido por conducción y que además el calor generado por respiración de la misma fruta es despreciable frente al primer sumando $Q_g \approx 0$.

$$kv \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + Q_g = \rho v C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.8)$$

Donde α representa la difusividad térmica (m^2/s), en la tabla 2 se muestra las propiedades térmicas de algunas frutas y materiales.

Tabla 2- Propiedades térmicas de algunos productos

Material	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Calor específico $\left[\frac{J}{kg.K} \right]$	Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m.K} \right]$	Difusividad térmica $10^{-7} \left[\frac{m^2}{s} \right]$
Cobre	8933	385	401	1166
Aluminio	2702	903	237	971
Aire	1.16	1007	0.263	225
Agua	1000	4179	0.613	1.47
Manzana	840	3600	0.513	1.70
Cereza	1010	3643	0.511	1.39
Tomates	1010	3300	0.527	1.58
Naranja	1030	3661	0.580	1.54
Pera	1000	3700	0.595	1.61
Papas	1100	3515	0.560	1.45

Fuente: Incropera and DeWitt (1981), Rahman (1995)

Una característica importante es que la difusividad térmica de las frutas que se presentan en el cuadro están el rango de 1.4 a 1.7 aproximadamente (Mohsenin, 1980), un valor que incluye a la difusividad del agua dando veracidad a la conocida propiedad de que las frutas tienen un alto contenido de agua.

Un valor de difusividad alto indica una rápida transferencia de calor, como en el caso del cobre y un valor bajo indica un proceso más lento como el caso general de las frutas. Aunque hay propiedades que cambian con el valor de temperatura, para el caso de control de plagas que se manejan intervalos de temperatura de 20 a 60°C, los valores de difusividad no tienen grandes variaciones.

Lo que se debe tener muy en cuenta es el tamaño de fruta y la velocidad del flujo ya sea de aire caliente o agua, dado que influyen directamente en el tiempo de tratamiento al que debe ser sometido.

1.3 Efectos de los tratamientos de calor en la fisiología de los frutos

En el proceso de la maduración, los almidones se transforman en azúcares, gracias a la acción de la enzima hidrolasa. Los pigmentos, que dan color se degradan, es así como la clorofila desaparece y se hace visible a los carotenos o las antocianinas, es decir el fruto pasa de color verde a amarillo y rojo, también cambia el contenido de vitaminas, de pectinas, etc. Esto causa modificaciones en el sabor, el color, la textura, el aroma, que son los principales factores de calidad.

Todos los tratamientos de calor, ya sean con agua caliente, aire forzado o radiofrecuencia deben adaptarse a cada tipo de producto para que se dé el control de plagas sin causar daños al fruto. En esta sección se dará el alcance de los efectos que adquiere un producto al ser sometido a temperaturas altas luego de ser cosechado cara a su almacenamiento. Entre los efectos más importantes en la fruta están:

- Cambio en la respiración del tejido interno del fruto
- Producción de hormonas que acelera la formación de etileno
- Activación de enzimas
- Cambio en el color
- Variación en la acidez, solubilidad y cantidad de compuestos volátiles

1.3.1 Cambios en la respiración de frutos

La respiración en un fruto es parte del metabolismo en el cual se consumen las reservas, para producir la energía necesaria para mantener otros procesos. Se consume ácidos orgánicos, carbohidratos y otros compuestos para producir energía, CO₂ y agua. Parte de la energía se pierde al ambiente en forma de calor y produce el calentamiento del producto (calor vital). La respiración causa pérdida de masa, cambios de color, sabor, textura, entre otros.

La velocidad de la respiración depende de factores internos del producto como de factores ambientales que pueden llegar a acelerar los procesos, en los internos es importante mencionar, el tipo de tejido, el área superficial, la edad del producto y la cantidad de agua que contenga. Y en los externos hay que considerar daños mecánicos, la temperatura del ambiente a mayor temperatura, mayor velocidad de respiración (Mitcham & McDonald, 1993) y la cantidad de oxígeno en el medio.

En la respiración, se consumen inicialmente los ácidos orgánicos, es decir al aumentar el grado de madurez el producto, se vuelve menos ácido. Después se consumen los carbohidratos. Cuando la velocidad de respiración aumenta crea una atmosfera interna dentro de la fruta con una mayor proporción de CO₂ y menor de O₂. Esta situación ayuda a la desinfección ya que los insectos también respiran a mayor velocidad ante temperaturas altas.

La aplicación de atmosferas controladas ayuda en la disminución del tiempo de tratamiento de calor que se necesita para la desinfección.

1.3.1.1 Frutos climatéricos y no climatéricos

De acuerdo a la tasa de respiración, los frutos se clasifican en estos dos tipos: climatéricos y no climatéricos.

Los primeros incrementan su ritmo respiratorio y la producción de etileno después de la cosecha, esto se puede interpretar como una maduración después de ser cosechados. En este tipo de productos se pueden mencionar, el mango, la papaya, el tomate, el banano, entre otros. Se cosechan “verdes” y se almacenan para que “maduren” y lleguen al consumidor final en un estado agradable.

Mientras que en los no climatéricos, el ritmo respiratorio va disminuyendo una vez separado de la planta. Estos productos es necesario cosecharlos cuando ya han madurado en la planta, dentro de esta categoría se destacan, los cítricos (naranja, mandarina, lima, limón), la fresa, la mora, el tomate y piña.

1.3.1.2 Patrón climatérico

Con la cosecha finaliza el intercambio de materia entre la fruta y el resto del vegetal. A pesar de esta separación física de la planta y bajo condiciones aeróbicas, las frutas continúan respirando (absorben O₂ y expelen CO₂) y oxidando sus reservas de carbohidratos. La mayor parte de energía resultado de la oxidación libera calor.

Se producen cambios químicos como: desaparición de la astringencia y sabor agrio, cambios de acidez, desaparición de la clorofila y síntesis de algunos pigmentos, ablandamiento de los tejidos, desarrollo de constituyentes de los componentes aromáticos característicos de cada fruta en particular.

1.3.2 Aumento velocidad de maduración, aumento de producción de etileno

El etileno es una hormona natural de las plantas. Afecta el crecimiento, desarrollo, maduración y envejecimiento de todas las plantas. Normalmente es producido en cantidades pequeñas por la mayoría de las frutas y vegetales. El etileno, a concentraciones muy bajas (0.1 ppm) acelera la maduración del fruto. Cabe indicar que si el etileno se encuentra en el ambiente de la sala de maduración, penetrará las cajas de cartón, madera (que son usadas para envío de los productos) y hasta la membrana de cada fruto.

Mientras que el etileno es invaluable debido a su habilidad para iniciar el procesamiento de maduración en muchas frutas, este puede también ser muy dañino para otras frutas, vegetales, flores y plantas ya que acelera el proceso de envejecimiento, disminuyendo así la calidad del producto y los días que podría demorar el transporte. Con una maduración acelerada ya no se tiene tanta holgura para que el fruto llegue en óptimo estado al consumidor final.

1.3.2.1 Medidas preventivas ante exposiciones de etileno

El grado de daño depende de la concentración de etileno, el tiempo que ha sido expuesto y temperatura del producto. Evidentemente si la fruta ha experimentado un tratamiento térmico, este tercer factor dará pie a una producción de etileno mayor.

Los siguientes métodos preventivos pueden ser usados para asegurar que los productos sensitivos al etileno no estén tan expuestos al mismo.

- a) Frutas que produzcan etileno (manzanas, paltas, bananas, melones, melocotones, peras y tomates) deberán ser colocadas separadas de los que son sensibles al etileno (brócoli, col, coliflor, hojas verdes, lechugas, etc.)
- b) Se debe ventilar el lugar de almacenamiento, de forma continua o regular para limpiar el aire de etileno. En cámaras de frío también es imperativo ventilar.
- c) En caso sea necesario se deberán colocar filtros de absorción de etileno. Está comprobado que estos reducen y mantienen bajo el nivel de etileno.

1.3.2.2 Control de la maduración

La preservación durante largo tiempo de la fruta requiere de un retardo adrede del proceso de maduración. Esto puede lograrse por refrigeración. La efectividad de la refrigeración se ve afectada por los parásitos o plagas que pudieron haber estado presente en la cosecha como los hongos.

El almacenamiento bajo atmósfera controlada consiste en colocar la fruta en ambientes refrigerados y herméticamente cerrados, reemplazando la atmósfera natural por una mezcla de gases rica en nitrógeno pero pobres en oxígeno. Se debe renovar continuamente el gas para eliminar el CO₂, producto de la respiración.

1.3.3 Posibilidad de daño externo

En los productos agrícolas el daño que causa un tratamiento térmico puede aparecer en varias formas:

- Oscurecimiento de la cascara
- Puntos de picadura
- Cambios de color verde a amarillo

En conclusión, el tipo de daño es observable pues lo evidencia la superficie del producto. En la figura 5, se muestra una manzana bajo los efectos de una “quemadura” en su superficie.

1.3.4 Incremento en la pérdida de agua

Cuando un producto pasa por un tratamiento de calor, aumenta la pérdida de agua del fruto. En un experimento de mango tipo “Tommy Atkins” tratado con aire forzado a 51.5°C por 3 horas perdió 1% más de su peso que aquellos mangos que fueron almacenados directamente por 3 semanas a 12°C. (Miller, McDonald, & Sharp, 1991)

En frutas como peras y melones se han reportado pérdidas de agua en torno al 2% de la masa inicial del fruto antes del tratamiento en calor.



Figura 5- Quemadura superficial en manzana

Fuente: <http://umaine.edu/fruit/harvest-and-storage-of-tree-fruits/storage-disorders/>

1.3.5 Posibilidad de daño interno

Algunas veces el daño interno está presente, sin tener ninguna evidencia externa. Como principal ejemplo están las paltas. En muchas oportunidades debemos haber tenido que abrir una de ellas con muy buenas condiciones externas. Al seccionarla, nos encontramos con un gran volumen ya oscurecido por efecto de la maduración.

En el caso de mangos y papayas el daño interno se presenta como un color difuminado y un ablandamiento sectorizado que alberga cavidades en descomposición. Tomando como ejemplo un tratamiento de aire caliente forzado se demostró que el CO₂ incremento en un 13% y que el O₂ disminuyó en 6% en una prueba con mangos que finalmente mostró un desarrollo de cavidades internas (Mitcham & McDonald, 1993)

1.3.6 Cambios sensorial al gusto

Tomando de base un mango que ha pasado por un tratamiento de aire caliente forzado, este muestra incrementos en las concentraciones de etanol y acetaldehído los cuales se sugiere dan resultado a un sabor a fermentado. En el experimento que ocurrió esto, la fruta fue tratada a 46°C en intervalos de 3 a 4 horas. (Mitcham & McDonald, 1993)

Pero si el tratamiento es a 48°C por 5 horas, las concentraciones son muchos más altas y siguen aumentando por varias horas después del tratamiento. De hecho este proceso metabólico es resultado del cambio en la atmósfera interna del mango.

La mayor demanda de oxígeno puede ser explicada por el aumento de temperatura que a su vez promueve la fermentación y la acelera. (Zhou, Criddle, & Mitcham, 2000)

1.4 Estudio cinético de la muerte de insectos por efecto térmico

Con la información apropiada del control de plagas por efecto del estrés térmico inducido en las larvas e insectos se obtiene una alternativa más para este requerimiento fitosanitario de exportación.

Bajo este enfoque ya no solo se usaría los controles puramente químicos o por fumigación con pesticidas.

El conocimiento de que una plaga puede ser controlada por una entrega de calor “letal” da pie al desarrollo de investigaciones vinculadas a los tratamientos postcosecha. (Hansen, Wang, & Tang, Accumulated lethal time model to evaluate efficacy of heat treatments for codling moth *Cydia pomonella* in cherries, 2004)

1.4.1 Adaptación de insectos, larvas a gradientes térmicos

Las velocidades de calentamiento afectan significativamente el metabolismo de los insectos pero como medio de supervivencia las larvas han desarrollado una capacidad de acondicionamiento térmico y aclimatación a velocidades de calentamiento que van desde 0.13 a 0.20°C/min. (Neven, 1998). Es decir si un tratamiento no logra estos gradientes térmicos, se hará más largo el proceso hasta alcanzar temperaturas muy elevadas. La plaga objetivo no será eliminada y por tanto el producto no cumplirá los estándares de calidad.

Si el fruto tiene características de difusividad térmica bajas, entonces será inevitable que el tratamiento se prolongue por más horas. Esto aumenta la probabilidad de daños que podrían ocurrirle por estar expuesto durante mucho tiempo a temperaturas altas.

1.4.2 Métodos experimentales para determinar la cinética de mortandad por efectos térmicos

Estos métodos simulan las condiciones que tendrían las plagas en la fruta, nivel de humedad, oxígeno, movimiento y espaciado. La recopilación de datos es en función del efecto que causa los cambios de temperatura en la mortalidad de las larvas colocadas intencionalmente.

Características generales de los métodos empleados para recopilar datos:

- Exponer directamente una muestra en un baño de agua durante horas específicas.
- Sumergir y retirar muestras en agua, a diferentes valores de temperatura.
- Infestar adrede una fruta o pulpa de fruta para su posterior análisis.

1.4.3 Modelo matemático de la mortalidad cinética en insectos

Para plantear estas ecuaciones se usa el porcentaje del número de individuos que sobreviven de un grupo inicial del muestreo.

$$\frac{dS}{dt} = -kS^n \quad (1.9)$$

Donde $S = (N/N_0) * 100$ y N representa el número de larvas sobrevivientes en el tiempo t , respecto del número inicial de la muestra (N_0). K (min^{-1}) es la constante representativa del proceso. Finalmente n , representa el grado de regresión lineal que más se ajuste.

Aplicando propiedades de integrales para $n \neq 1$.

$$\int dS = - \int kS^n dt$$

$$S = -kS^n t + c$$

$$\frac{S}{S^n} = -kt + c$$

$$S^{n-1} = -kt + c \quad (1.10)$$

Para $n=1$

$$\int \frac{1}{S} dS = - \int k dt$$

$$\ln(S) = -kt + c \quad (1.11)$$

Un análisis de regresión lineal puede interpretarse dentro de un experimento como el ajuste que más acercó los datos a una expresión matemática. Tomando como datos los ensayos realizados por Gazit en 2004, estos parámetros están en función del tiempo que estuvo el microorganismo expuesto a una temperatura de 46°C. (Ver tabla 3)

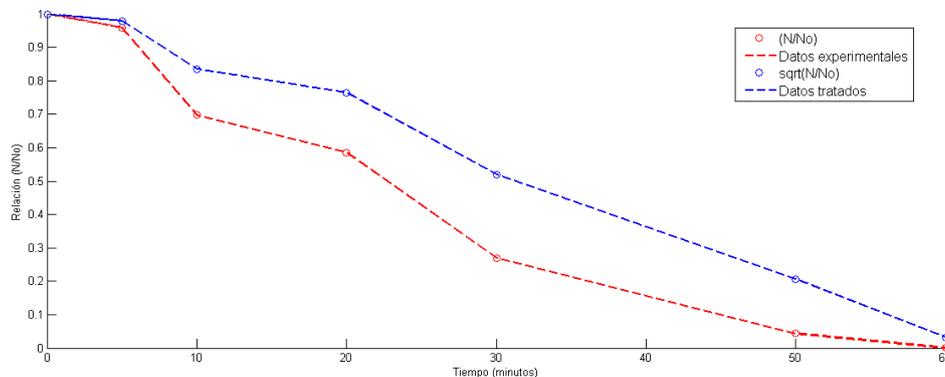
Tabla 3- Survival rate of third-instar Mediterranean fruit fly at different orders (n) vs time at 46°C

Tiempo (minutos)	N/N_0	$n=0$ $(N/N_0)^1$	$n=0.5$ $(N/N_0)^{0.5}$	$n=1$ $\ln((N/N_0))$	$n=1.5$ $(N/N_0)^{-0.5}$	$n=2$ $(N/N_0)^{-1}$
0	1.000	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000
5	0.959	0.959	0.979	-0.042	1.021	1.043
10	0.697	0.697	0.835	-0.361	1.198	1.434
20	0.585	0.585	0.765	-0.535	1.307	1.709
30	0.269	0.269	0.519	-1.312	1.927	3.717
50	0.043	0.043	0.207	-3.146	4.821	23.238
60	0.001	0.001	0.032	-6.908	31.623	1000.000

Fuente: (Gazit, Rossler, Wang, & Tang, 2004)

Cada columna de la tabla es el resultado de elevar a “n” la primera columna. Como ejemplo grafico se muestra el ploteo en la figura 6.

Figura 6- Representación de la tasa de supervivencia de una muestra inicial N_0



Este tipo de análisis se hace también para diferentes valores de temperatura, por ejemplo a 48°C, 50°C, 52°C. Obteniendo como resultado el mayor alto grado de correlación cuando se hace un ajuste con $n=0.5$.

Definido una vez el grado de reacción “*half-order*”, la bibliografía utiliza la ecuación de Arrhenius para modelar la constante representativa del proceso.

$$k = k_{ref} * e^{\frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (1.12)$$

Donde

k_{ref} : Constante de reacción a la temperatura de referencia

T : Temperatura absoluta del medio [K]

E_a : Energía de activación $\left[\frac{J}{mol} \right]$

R : Constante universal de los gases $\left[\frac{J}{mol K} \right]$

Lo más importante a rescatar del estudio de esta constante es su variación con respecto a la temperatura. En la figura 7 se muestra la ecuación a la que resumió Gazit su trabajo.

$$\log(k) = 95.098 - \frac{31016}{T} \quad (1.13)$$

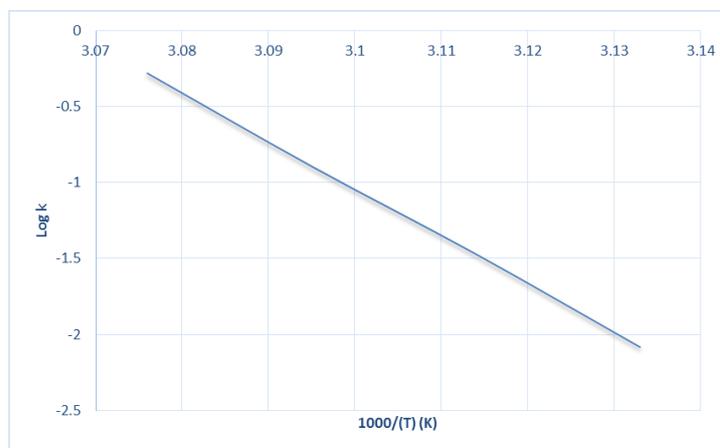


Figura 7- Variación de la constante de muerte por cinética térmica vs temperatura del proceso

Fuente: (Gazit, Rossler, Wang, & Tang, 2004)

Tratando matemáticamente la ecuación 1.13 resulta la expresión 1.14 y su ploteo respectivo en la figura 8. Observamos que a mayor temperatura de tratamiento, la cinética por muerte térmica aumenta exponencialmente.

$$k = 10^{\left[95.098 - \frac{31016}{T} \right]} \quad (1.14)$$

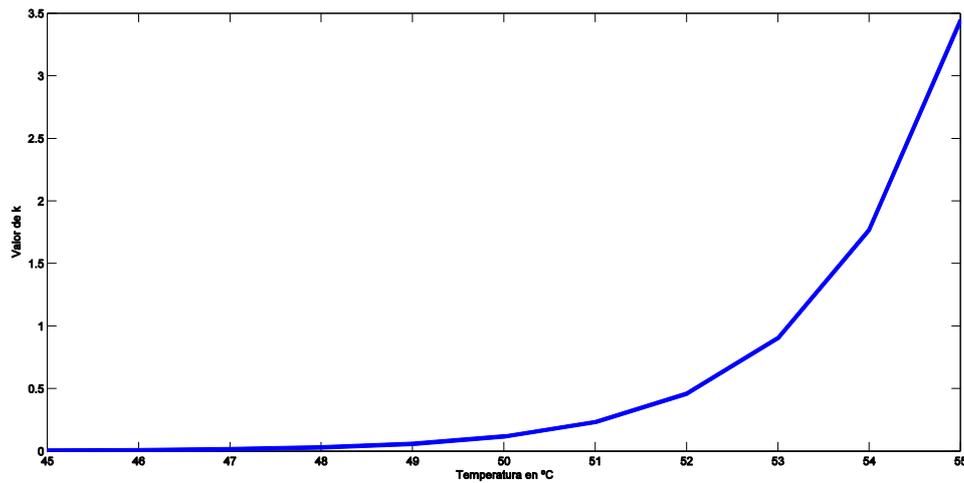


Figura 8- Variación de k vs temperatura del proceso

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, el estudio de mortandad puede analizarse por muestras a temperaturas establecidas, como en la figura 9. La dispersión en azul representa la tasa de supervivencia a 46°C. La grafica en verde, rojo y celeste a 48°C, 50°C y 52°C respectivamente.

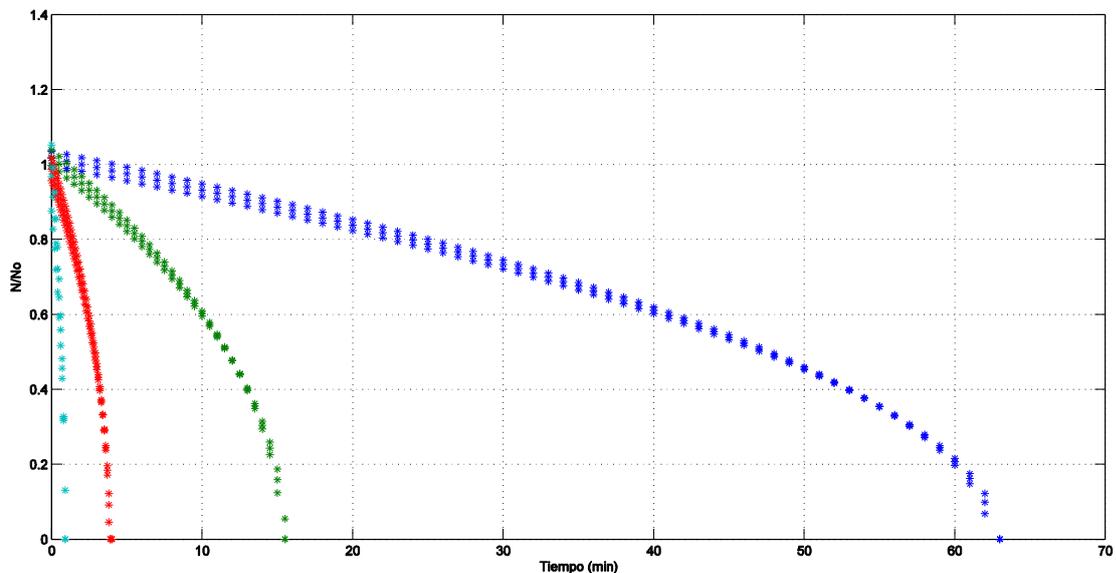


Figura 9- Curvas de mortalidad térmica a 4 temperaturas diferentes usando el modelo "half order"

Fuente: (Gazit, Rossler, Wang, & Tang, 2004)

Es evidente el alto grado de susceptibilidad al tratamiento, ya que al variar de 46 a 48°C el tiempo letal baja de 64 min a 16 min aproximadamente.

También es muy notorio que al elevar hasta 52°C, se logra en menos de un minuto llegar al tiempo letal de estrés térmico.

Para obtener la figura 9 se ha utilizado las ecuaciones a las que se resumió el comportamiento cinético de la muerte de plagas por efecto térmico. (Ver tabla 4)

Tabla 4- Parámetros de la cinética térmica lineal a 4 temperaturas

Temperatura (°C)	k±SE	c±SE
46	0.0165±0.0007	1.0327±0.0383
48	0.0674±0.0035	1.0361±0.0427
50	0.2545±0.0177	0.9755±0.0609
52	1.0417±0.2082	0.9370±0.1698

Fuente: (Gazit, Rossler, Wang, & Tang, 2004)

1.4.4 Niveles de tiempo letal

El tiempo letal “*Lethal time*” es definido como el tiempo necesario para neutralizar o eliminar un porcentaje de insectos de una plaga a una temperatura dada. La tabla 5 muestra los *lethal time* más usados para el control de plagas postcosecha. Entre mayor sea el nivel Probit que exija el ente importador, mayor será el tiempo de tratamiento térmico para la fruta en mención.

Este nivel es análogo a un factor de seguridad en temas fitosanitarias y de salud.

Tabla 5- *Lethal time levels as a function of mortality (M), survival ratio (S) and probit levels*

Lethal Time Level	M(%)	S	N/No	Probit Level
LT ₉₅	95	0.05	1/20	6.645
LT ₉₉	99	0.01	1/100	7.326
LT _{99.83}	99.83	0.0017	1/600	7.929
LT _{99.9968}	99.9968	0.000032	1/31250	9.000

Fuente: (Gazit, Rossler, Wang, & Tang, 2004)

Capítulo 2

Estudio del tratamiento hidrotermico para mangos y su escenario económico en el país

El consumo de frutas y hortalizas se ha incrementado en las últimas décadas en respuesta a diversos factores, uno de ellos es que las personas prefieren alimentos más sanos. Cada vez más personas se interesan en un estilo de vida que beneficie su nutrición y salud. (Machado, 2000) El mango es uno de los frutos tropicales más apreciados y populares a nivel mundial, presentando un gran consumo en América Latina, EE.UU e incluso en países asiáticos. Debido a su delicioso sabor, atractivo color, y valor nutritivo (Mitra & Baldwin, 1997)

La problemática que afronta la fruta para que pueda ser consumida es que debe estar dentro de un entorno de control de calidad fitosanitario que permita eliminar “La mosca de la fruta”, en especial la *Ceratitis capitata* (Mosca de la fruta del Mediterráneo), la cual es una de las plagas más esparcidas y dañinas del mundo. También se debe tomar en cuenta que; para la aceptación de la fruta se debe cuidar su susceptibilidad a daños mecánicos y las enfermedades post-cosecha. (Johnson & Coates, 1993)

Los establecimientos comerciales de tratamiento hidrotérmico son muy grandes y rutinariamente son usados para tratar la fruta en una inmersión a una temperatura de 115 a 116°F (de 46.1 a 46.67°C) de 65 a 90 minutos dependiendo del peso de la fruta y la variedad de mango. La temperatura a la que será sometido, deberá ser controlada y registrada de manera que sea la misma durante el tiempo que dura el proceso.

Para que se lleve a cabo un correcto proceso y pueda ser certificado, se deberá tener presente una serie de condiciones y permisos sanitarios por el ente regulador de cada país.

Los requerimientos del tratamiento o protocolos de exportación es impuestos por el país importador de la fruta, en el caso de EEUU es el Departamento de Agricultura (USDA), con el propósito de que las medidas que dictaminen tenga como fin que la frutas queden libres de insectos y enfermedades como una medida preventiva para evitar su diseminación.

2.1 Escenario de la producción y exportación de mango en Perú

El mango es un cultivo que se produce a grandes escalas en la zona norte del Perú, específicamente en el Alto Piura y en el valle de San Lorenzo. Existen alrededor de 6000 ha dedicadas a este cultivo, distribuidos aproximadamente entre 3700 productores agrupados en la “Asociación de productores y exportadores de mango (APEM)”.

En cada campaña, la cual abarca los últimos meses del año y el primer trimestre del siguiente año, las estadísticas indican que se generan más de un millón y medio de jornales directos y una producción que bordea las 120000 Tn de mango entre el mercado nacional e internacional. (Castilla, 2010)

Para una buena programación de la cosecha de mango se debe trabajar con anterioridad el tema de maduración y floración del fruto. Es muy importante indicar que la época de floración del mango es óptima entre temperaturas de 15-22°C por ello se realiza el injerto entre los meses de Abril y junio. Luego el tiempo de maduración según el crecimiento del fruto coincidirá en los meses de verano momento en el cual la planta necesita estar entre 24-28°C a más.

En cuanto al requerimiento de agua durante el crecimiento de la planta es poco y no letal para la producción ya que es luego de 5 años del injerto en que empieza una producción alta por parte de la planta. En los años de crecimiento la planta soporta hasta 400mg de sal por litro de agua. Durante la maduración del mango en planta no es favorable la precipitación pluvial, porque aumentan la susceptibilidad del fruto a contraer una plaga.

2.1.1 Exportaciones de mango

Los principales mercados de exportación de mango peruano son el norteamericano y el europeo, seguido por el asiático. Del mango producido en Piura los principales mercados son el de EEUU, Holanda e Inglaterra.

Tabla 6- Históricos de la exportación años 2014, 2015 y 2016

EXPORTACION MANGOS FRESCOS O SECOS			2	12					
MES	2,016			2,015			2,014		
	FOB	KILOS	PREC. PROM.	FOB	KILOS	PREC. PROM.	FOB	KILOS	PREC. PROM.
ENERO	61,393,629	52,810,850	1.16	63,799,605	43,112,101	1.48	50,037,031	49,601,635	1.01
FEBRERO	31,374,496	23,542,197	1.33	49,065,452	32,648,592	1.50	36,532,091	36,465,757	1.00
MARZO				31,200,466	18,384,463	1.70	26,947,077	19,739,783	1.37
ABRIL				5,682,265	2,085,501	2.72	5,222,256	2,254,519	2.32
MAYO				174,719	63,535	2.75	875,592	155,902	5.62
JUNIO				67,732	50,240	1.35	10,686	7,696	1.39
JULIO				34,978	30,370	1.15	8,938	6,975	1.28
AGOSTO				71,642	51,666	1.39	8,845	6,619	1.34
SEPTIEMBRE				18,834	15,917	1.18	16,000	2,583	6.19
OCTUBRE				738,145	712,673	1.04	468,949	418,578	1.12
NOVIEMBRE				7,919,092	5,342,293	1.48	1,651,528	1,040,351	1.59
DICIEMBRE				35,774,152	30,088,784	1.19	15,535,411	10,287,901	1.51
TOTALES	92,768,125	76,353,047	1.21	194,547,082	132,586,135	1.47	137,314,404	119,988,299	1.14
PROM. MES	46,384,063	38,176,524		16,212,257	11,048,845		11,442,867	9,999,025	
% CRECIMIENTO ANUAL	186%	246%	-17%	42%	10%	28%	13%	3%	10%

Fuente: <http://www.agrodataperu.com/2016/03/mangos-frescos-peru-exportacion-febrero-2016.html>

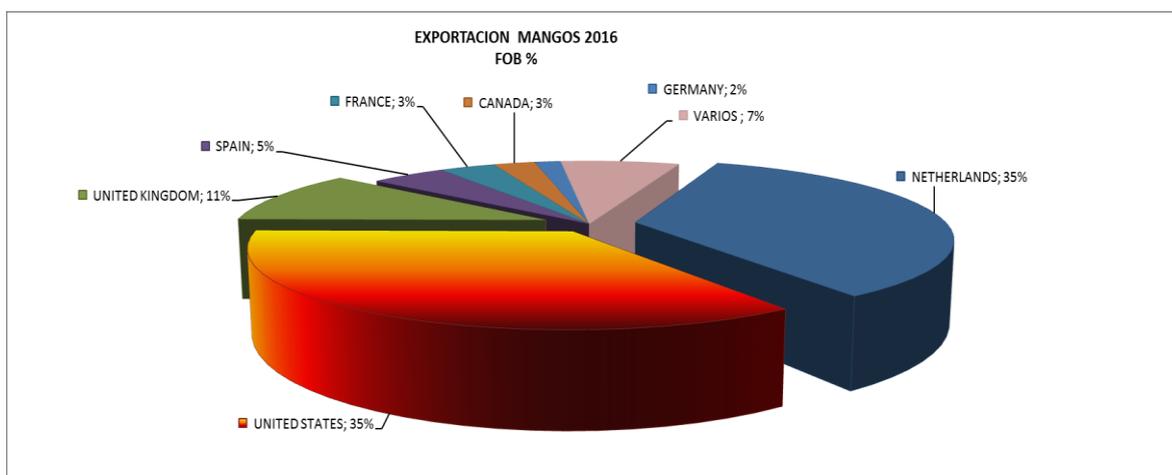


Figura 10- Distribución de países importadores de mango

Fuente: <http://www.agrodataperu.com/2016/03/mangos-frescos-peru-exportacion-febrero-2016.html>

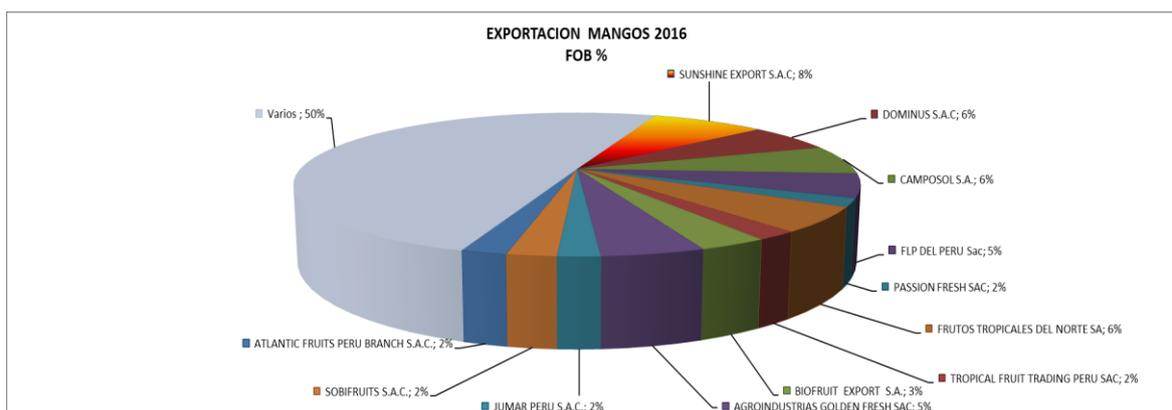


Figura 11- Distribución de las empresas exportadoras

Fuente: <http://www.agrodataperu.com/2016/03/mangos-frescos-peru-exportacion-febrero-2016.html>

La tabla 6 muestra el detalle de mes a mes de la cantidad de kilogramos de mangos que se exportaron. En cada año también figura el valor del FOB¹ para esa cantidad de fruta. Por último se muestra el valor del precio promedio.

El precio promedio es la división del FOB representativo a esa cantidad de mango entre los kilogramos exportados. El análisis comparativo para los meses de enero y febrero del presente año muestra que el precio promedio del mango ha descendido fuertemente mientras que la cantidad de fruta exportada es mayor la recaudación de dinero proveniente de esta actividad no ha tenido la misma predicción que el año anterior.

¹ FOB (del inglés Free On Board, «Libre a bordo, puerto de carga convenido») El vendedor entrega la mercancía «a bordo del buque» designado por el comprador en el puerto de embarque indicado, y por tanto estibado; en ese momento se traspasan los riesgos de pérdida o daño de la mercancía del vendedor al comprador.

En cuanto al gráfico de distribución de la figura 10, Estados Unidos sigue siendo el país que importa la mayor cantidad de mango peruano. Holanda por su parte ha aumentado sus requerimientos de esta fruta a lo largo de estos años siendo el 2016 el año en que ha igualado en cantidad de mango solicitado a EEUU. Respecto a la figura 11, el perfil de distribución entre las principales empresas se mantiene casi al mismo régimen de ventas, destacando sunshine export, camposol y tropical fruit trading Perú. La empresa Biofruit Export SA entra a la distribución con un 3% muy respetable dado el flujo que ha logrado Perú como referente de exportación de mango.

Algunos detalles importantes de la tabla 6, es lo sucedido en setiembre de 2014, donde el precio promedio 6.19 USD/kg fue el más alto. Este pico puede explicarse por dos situaciones.

A) Dada la poca disponibilidad de fruta, el precio naturalmente se incrementa, puede verse que es el mes de menor tonelaje de venta.

B) Ese mes es coincidente, con los inicios del alza del dólar que afecto a las economías mundiales desde el año 2014. (Ver figura 12)

Posteriormente se ve una normalización tanto en el precio como en los kilogramos de venta.

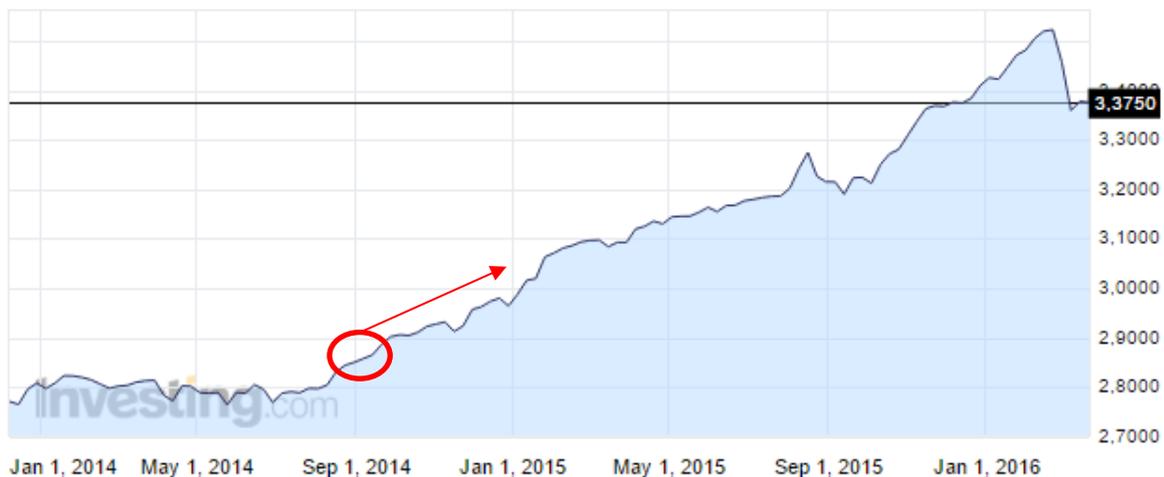


Figura 12- Registro del precio del Dolar americano / Nuevo sol

Fuente: <http://es.investing.com/currencies/usd-pen>

2.2 Necesidad del mejoramiento del tratamiento hidrotérmico

Los crecientes mercados internacionales, así como las exigencias de los estándares de calidad y manufactura, han elevado la competitividad en la exportación. La velocidad con que crecen los mercados internacionales, es sólo comparable con la competitividad que se requiere para estar al frente de ellos.

La mejora de los procesos, en gran parte influenciada por los avances tecnológicos, nos obliga a implementar mejoras continuas en todas las áreas de la empresa. El Perú tiene productos agroindustriales de calidad muy alta, que necesitan ser cultivados de forma adecuada para que puedan conseguir las características requeridas por los mercados extranjeros.

La tesis a desarrollar busca mejorar el proceso de tratamiento hidrotérmico que reciben los mangos para su exportación a mercados como el de Estados Unidos y Japón. Por medio de la optimización del modo de control, del proceso hidrotérmico, se mejorará los índices generales de la cadena productiva dándole versatilidad, competitividad y calidad del producto, las cuales son características imprescindibles para esta época.

2.3 Objetivo generales del estudio del tratamiento hidrotérmico

Estudiar el ahorro energético, económico y mejoramiento de la calidad que ofrecen los modos de control avanzado en la industria, que pueden ser implementados en el proceso de tratamiento hidrotérmico para mangos y así optimizar la cadena productiva de las empresas agroindustriales exportadoras del Perú.

2.3.1 Objetivos específicos del estudio del tratamiento hidrotérmico

- Identificación del modelo matemático del proceso de tratamiento hidrotérmico.
- Parametrizar el proceso en función al tiempo tanto para temperatura de agua como temperatura de la pulpa de la fruta
- Simular los diferentes modos de control automático con el proceso de tratamiento hidrotérmico.
- Comparar las demandas energéticas que implica cada modo de control y su efecto en la calidad.
- Evaluación económica de la implementación de este nuevo sistema.

2.4 Metodología para el estudio de tratamiento hidrotérmico

La metodología a utilizarse seguirá los siguientes pasos:

- Se desarrollará el estado del arte de los sistemas de tratamiento hidrotérmico para mangos en los países que llevan a cabo esta actividad y que exportan este producto.
- Se afrontará el tema de control, desarrollando la teoría necesaria para su aplicación y realizando comparación entre las formas más utilizadas para determinar la que ofrece mejores resultados.
- Se ensayarán durante los días de prueba, diferentes modalidades para el control de temperatura.
- Se recopilarán los datos de señales de entrada y salida del sistema para una modelación matemática del proceso.
- Finalmente se realizará la confrontación de los resultados teóricos de las simulaciones frente a los experimentales y se dará una propuesta de implementación.

2.5 Protocolo de tratamiento hidrotérmico

1. Los mangos deben estar pre-seleccionados por clasificación de peso. El tratamiento de cargas mixtas y de diferente tipo no está permitido.

2. El tiempo estimado para tratamiento hidrotérmico se determina por el peso máximo de la fruta, para pesos menores a 425 g, el tiempo es de 75 minutos y para pesos en el rango 425 a 650 g, el tiempo será de 90 minutos. (Ver Tabla 7)

3. La temperatura de la pulpa al inicio del tratamiento debe ser de 21,1 °C (70°F) como mínimo.

Tabla 7- Tiempo de proceso según calibre de fruta

Forma de la fruta	Peso (gramos)	Tempo de inmersión (minutos)
Variedades aplanadas y alargadas: <i>Ataulfo, Carrot, Frances, Irwin, Zill y Manila.</i>	Hasta 375	65
	375 a 570	75
Variedades redondeadas: <i>Kent, Keitt, Hayden y Tommy Atkins.</i>	Hasta 425	75
	425 a 650	90

4. La fruta debe quedar sumergida a una profundidad de 10 cm. o más, debajo de la superficie del agua durante todo el tratamiento.

5. El agua debe circular permanentemente para ser mantenida a 46.1 °C (115°F) durante todo el tratamiento.

6. Los “sensores de temperatura de agua” serán monitoreados estrechamente durante los primeros 5 minutos del tratamiento. Es requisito que la temperatura de todos los “sensores de temperatura de agua” (permanentes y portátiles) alcancen al menos 115.0 °F (46.1 °C) dentro de los 5 primeros minutos. Si no es así, la prueba debe repetirse.

7. La temperatura del agua puede bajar hasta 45.4 °C (113.7 °F), por un periodo de 10 minutos en tratamientos de 75 minutos y por un periodo de 15 minutos en tratamientos de 90 minutos. Si en el proceso, la temperatura del agua cae por debajo de 45.4°C en cualquier momento durante el periodo de tratamiento, éste se rechaza.

8. Durante el tratamiento comercial, el diferencial de la temperatura del agua entre los sensores permanentes del tanque no debe exceder 1°C (1.8 °F).

9. En las lecturas de temperatura en los tratamientos de 75 y 90 minutos, el diferencial de la temperatura de la pulpa, entre la temperatura más baja y más alta no puede exceder 3 °C (5.4 °F). El mínimo de temperatura que puede registrar un sensor de pulpa al inicio del tratamiento es de 37.8 °C (100°F) y al final de 45 °C (113°F). Si la lectura final es menor de 45 °C el tratamiento es rechazado.

10. Si como decisión del empacador, se desean utilizar los mismos frutos en otro tratamiento, estos deben ser enfriados a menos de 32.2 °C.

2.5.1 Ventajas del tratamiento hidrotérmico

- En frutos de mango el tratamiento hidrotérmico ha demostrado ser efectivo para el control de la antracnosis la cual es causada por el Hongo *gloeosporioide*. . Rondón et al. (2006); Saucedo y Mena, (1995); Flores, (1994); Avilán y Rengifo, (1990),

- Zambrano y Materano (1999), reportaron que el tratamiento con calor a temperaturas entre 38 y 46 °C aumenta la tolerancia al daño por el frío y redujo la podredumbre de los frutos de mango.
- Los tratamientos de acondicionamiento previo a altas temperaturas, son tratamientos físicos no contaminantes ni destructivos.
- La aplicación del tratamiento hidrotérmico no tiene efectos perjudiciales en la calidad sensorial de los frutos.
- La diferencia de grados Brix después del tratamiento es mínima. El pH y la firmeza del mango tampoco presentan diferencias considerables después del tratamiento.

2.5.2 Desventajas del tratamiento hidrotérmico

- En caso se produzca un tratamiento de forma inapropiada, pueden tener efectos adversos en la calidad de los frutos de mango que se manifiestan como alteraciones en la actividad enzimática, aumento en la velocidad de la respiración, hundimiento de la pulpa y otros efectos no deseables en parámetros físicos, químicos y sensoriales (Báez, R.; E. Bringas, G. González, T. Mendoza, J. Ojeda y J. Mercado. 2001)
- Por cada 10 grados que aumenten en el fruto de mango, se duplica la acción enzimática, provocando con ello que se acelere la maduración del fruto.

2.6 Principales consideraciones entre los protocolos de EEUU y Japón

La principal diferencia radica en que el tratamiento para EEUU esta parametrizado en cuanto al tiempo, mientras que el protocolo de Japón está limitado por alcanzar cierto valor de temperatura indiferentemente del tiempo que haya tomado llegar hasta esa referencia.

Para el tratamiento de EEUU:

- El producto debe estar inmerso por lo menos de **75 min** según el calibre correspondiente, para el otro el otro rango de calibres el tiempo mínimo es de **90min**.
- La temperatura mínima del fruto, al iniciar el tratamiento debe ser mayor a **70°F**.
- La temperatura del agua de la tina no debe de bajar de los **115°F (46.1°C)** más de un minuto.
- Los primeros 5 min son muy importantes ya que ningún sensor de agua debe descender de **115°F**.
- El proceso termina al cumplirse el condicional de tiempo, según calibre del producto.

Para el tratamiento de Japón:

- El lapso del tratamiento depende de la temperatura de la pulpa del mango de la zona más fría de la tina.
- El fin del tratamiento queda determinado cuando todos los sensores de temperatura de pulpa de mango lleguen a **46°C (114.8°F)**.
- Al iniciar la inmersión en agua caliente, la temperatura de la fruta no debe ser menor a **70°F (21.1°C)**, dado que en la zona norte del Perú no hay problema con esta

restricción, el paso de selección de mangos a la zona de tratamiento no necesita ningún tipo de precalentamiento.

- La temperatura del agua de la tina no debe bajar de los **115.5°F (46.4°C)** más de un minuto.
- La temperatura inicial del agua en la tina no debe ser mayor a **116.6°F (47°C)**

2.6.1 Unificación de protocolos de exportación para la mejora industrial

Para lograr una versatilidad en cumplir ambos protocolos de EEUU y Japón, se ha recurrido a un análisis de los registros de temperaturas de campañas anteriores y a un estudio exhaustivo para la fabricación del tanque híbrido. Es parte de este proyecto la publicación científica titulada “Estudio analítico, de campo y de simulación numérico-computacional en el comportamiento fluido dinámico y térmico de equipos de tratamiento hidrotérmico del mango (2015)” la cual tiene como autores a los PhD. Elder Mendoza, Daniel Marcelo, Justo Oquelis y al Ing. Paul Villar. Este *paper* es una bibliografía primordial para el desarrollo de la presente tesis.

Para la unificación, básicamente lo que se debe cumplir para que una misma canastilla de mango tenga la certificación de ambos tratamientos es cumplir a la vez ambos protocolos.

Explicando a detalle:

Tomando como ejemplo una selección de mango que este entre los 425 a 650 gr, por protocolo EEUU corresponde un control de tiempo mínimo de 90 min, con el cuidado de los 5 primeros minutos y un set point mínimo de temperatura de agua a 115°F.

Para acoplarlo a lo requerimientos de exportación de Japón se deberá iniciar el tratamiento a una temperatura de agua a 116.6°F (47°C) para tener a favor el mayor gradiente de temperatura inicial, por tanto la primera valla a superar es que el diseño del tanque híbrido tenga una proporción de volumen de agua tal que, al recibir la carga de mango fría no baje de los 115°F (46.1°C) como pide EEUU. La solución a esto es aumentar la masa de agua contenida en el tanque, por tanto será un tanque más grande que al inicio sí necesitará mayor calor para mantener el valor de temperatura establecido. La situación a favor es que el adicional de calor contenido ayudará enormemente a cumplir el requisito que ningún sensor de temperatura de agua baje del límite de control inferior de temperatura.

La segunda valla es que el protocolo de EEUU precisa un set point mínimo de 115°F, no limita el valor superior y por tanto podemos desplazarlo hasta el 115.5°F es decir medio grado Fahrenheit más. Con esto cumplimos con ambos protocolos.

La tercera valla es que, una vez que llega al tiempo de tratamiento para EEUU, no hay obligación de retirar la canastilla de mango del tanque inmediatamente, entonces utilizaremos esto a favor y lo que se hará es dejar sumergido el producto hasta que todos los sensores de pulpa de mango lleguen a los 114.8°F (46°C). Históricamente esto se logra entre los 15 a 20 minutos siguientes.

La unificación de protocolos para el tanque dual se puede resumir en que, al inicio se cuida en cumplir con los requerimientos de EEUU y que la parte final la determina las exigencias de Japón. En cuanto a tiempos de proceso, una mejora estupenda fuese que el protocolo de Japón se cumpla antes que el de EEUU, ello sí sería un ahorro muy atractivo.

2.7 Diseño del tanque híbrido - dual para tratamiento hidrotérmico

Tomado de los laboratorios de Energía y Mecánica de la Universidad de Piura se presentan los siguientes diseños del tanque dual y la canastilla de izaje, necesarios para el proyecto.

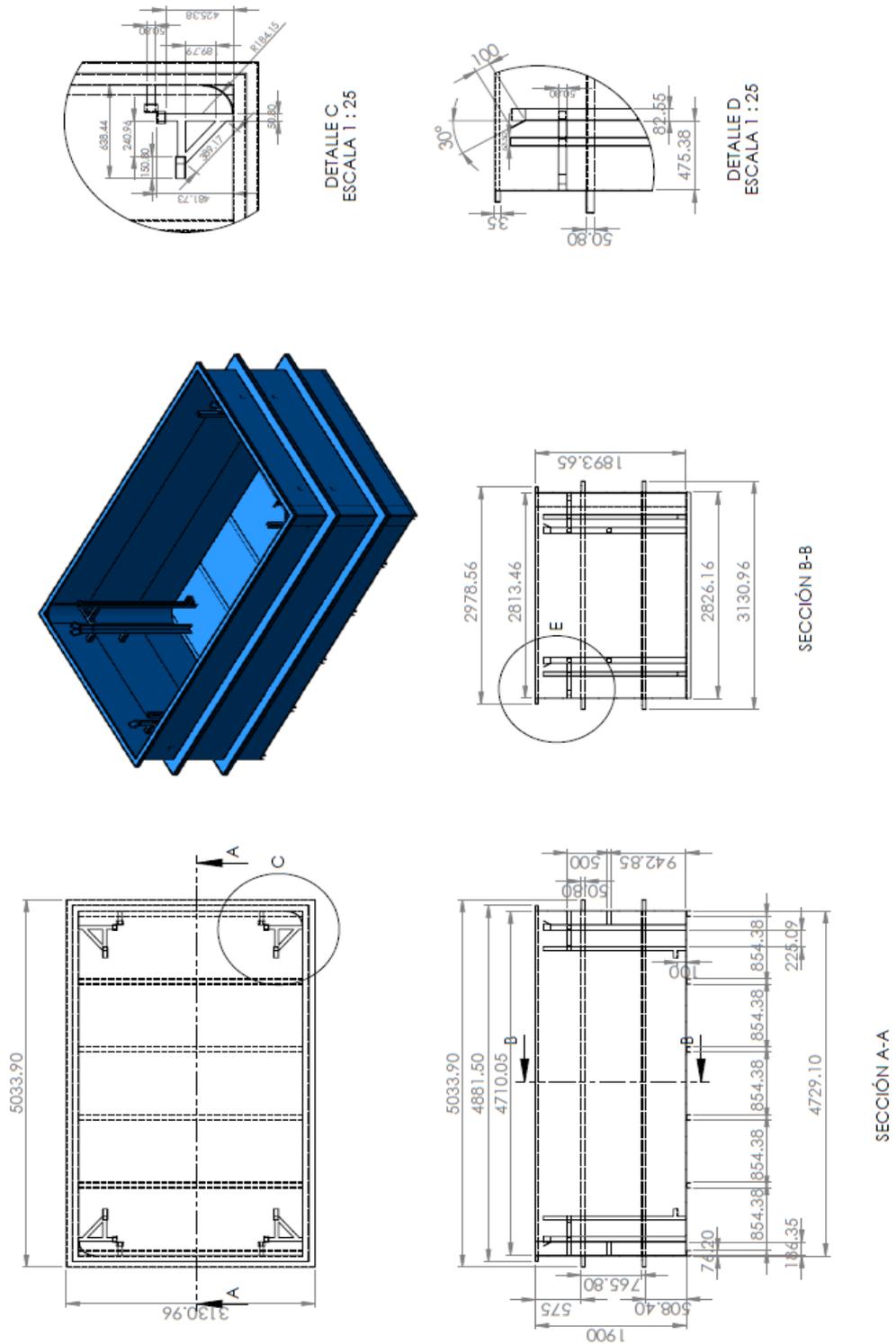


Figura 13- Diseño de tina de tratamiento hidrotérmico

Fuente: Plano de diseño desarrollado por el laboratorio de Mecánica de la Universidad de Piura

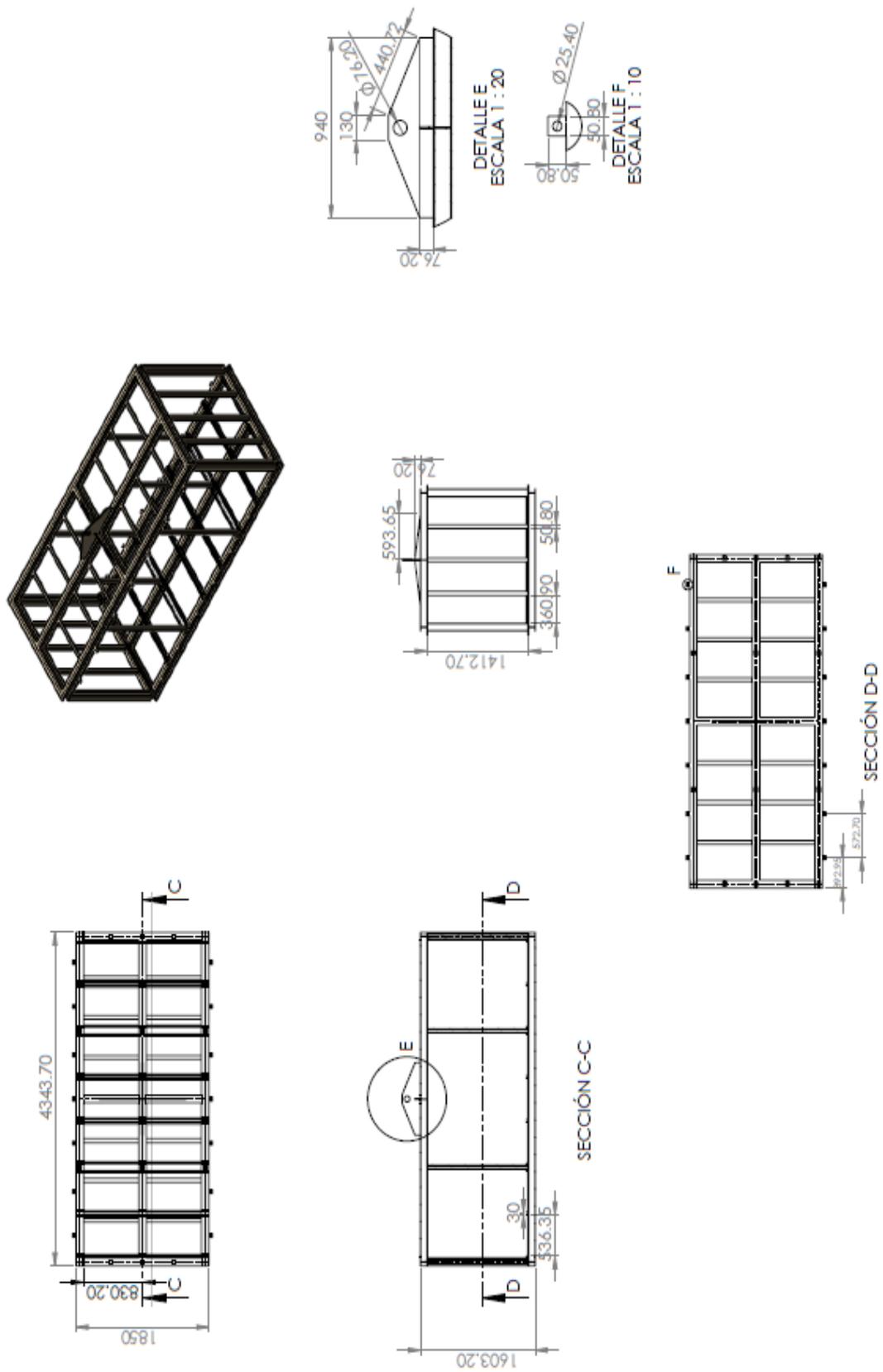


Figura 14- Diseño de canastilla de izaje

Fuente: Plano de diseño desarrollado por el laboratorio de Mecánica de la Universidad de Piura



Figura 15- Construcción de tanque-Empresa Biofruit
Fuente: Fotografía personal



Figura 16- Pintado de serpentines, para intercambio de calor
Fuente: Fotografía personal



Figura 17- Canastilla para jabas de mangos
Fuente: Fotografía personal

Las figuras 13 y 14 son los planos de construcción del equipo híbrido, las figuras 15, 16 y 17 son fotografías durante la fabricación del equipo.

2.7.1 Puesta en marcha del tanque híbrido



Figura 18- Prueba de giro de motores de impulsores

Fuente: Fotografía personal

Como puede observarse en la figura 18, técnicos electricistas hicieron las conexiones del motor con la respectiva prueba de giro para que el sentido de los impulsores sea el correcto.



Figura 19- Panel de control y visualización de temperaturas de tratamiento

Fuente: Fotografía personal

Las variables de proceso además de verse en el SCADA, también pueden ser manipuladas desde el Touch panel instalado en el tablero de control. (Ver figura 19)



Figura 20- Tina lista para iniciar proceso de tratamiento hidrotérmico

Fuente: Fotografía personal

Las pruebas o ensayos de proceso se realizaron con la cantidad y calidad de agua de un protocolo normal. Se aprecia en la figura 20 la tina lista para recibir la carga.



Figura 21- Encanastillado y colocación de sensores en jabs

Fuente: Fotografía personal

La preparación del ensayo requiere decidir la ubicación de los sensores tanto de pulpa de mango como de agua, por lo general se eligen las zonas más fría y más caliente en cada plano de corte de la altura de la canastilla. Influye también el calibre de mango con el cual se hace la prueba ya que tiene relación directa con el tiempo de calentamiento.



Figura 22- Izaje y maniobra de canastilla

Fuente: Fotografía personal

Dentro de las actividades rutinarias para un TH, está el izaje y colocación de la canasta dentro de la tina. Esta maniobra se realiza con las medidas de seguridad correspondientes y a cargo del operador del área.

2.7.2 Ensayos experimentales en empresa Biofruit

2.7.2.1 Detalle de ensayos experimentales

- Se realizó un ensayo por día ya que después de cada tratamiento la fruta debía regresar a temperatura ambiente y así simular las condiciones normales de trabajo.
- Durante los ensayos, la caldera alimentaba de vapor solamente a las líneas de los serpentines del tanque híbrido. No hubo ninguna otra tina que solicitará vapor.
- La disposición de fruta, aproximadamente 3500 kg de mango (175 jabas de 20 kg c/u) fue habilitada por la empresa Biofruit, así como sus instalaciones en general y su personal de trabajo. El último ensayo se realizó con 180 jabas ya que se usó el nuevo arreglo de jabas dentro de la canastilla.
- Los tableros de control junto con la instrumentación fue preparada en la Universidad de Piura. Los demás accesorios fueron preparados e instalados in situ.
- Las jornadas de trabajo experimentales se llevaron a cabo dentro del horario normal de la empresa.
- La recopilación de datos fue realizada por los equipos de automatización y también fue contrastada con los indicadores de temperatura que disponía Biofruit.
- La ubicación de los sensores fue seleccionada tal que abarque todo el perfil de temperatura que se desarrolla dentro del tanque.
- Se realizaron mediciones de temperatura de la línea de vapor, agua del tanque, pulpa de mango y los efluentes de los condensos de los serpentines.

- Se recopiló datos de los estados de las válvulas solenoides que permiten el ingreso de vapor hacia el sistema. Ambas válvulas están sincronizadas para actuar con la misma señal de control asegurado la simetría en la distribución de temperaturas.
- Se recopiló datos de las velocidades del agua dentro del tanque con puntos de referenciales que abarquen la todo el volumen de control.
- Para los tres primeros ensayos se usaron 14 sensores portátiles y 2 estáticos. Para los 3 ensayos siguientes se usaron 9 sensores portátiles y los 2 estáticos.
- Toda la información referente a las mediciones se encuentra disponible para ser corroborada y evaluada.

De las características de los ensayos indicaremos que se usará los siguientes nombres para diferenciar de qué etapa se está analizando.

Calentamiento en vacío: Momento en que la inyección de calor se realiza sin carga térmica, es decir solo se calienta agua y sucede antes de iniciar los tratamientos.

Enfriamiento en vacío: Momento en que no hay inyección de calor ni tampoco se encuentra sumergida la canastilla de mangos.

Calentamiento con carga: Situación en que se está ingresando calor al sistema y además ya se encuentra sumergido el lote de fruta.

Enfriamiento con carga: Situación en que el control ON/OFF ha superado el límite superior de control y debe esperar la dinámica del sistema para nuevamente ingresar vapor al sistema.

2.7.2.2 Descripción del ensayo N°1 – 7 de abril de 2015

Este ensayo fue el primero y por tal se detectaron las cosas que faltaban, algunos detalles y las reparaciones de último momento en cuanto al tanque, como por ejemplo una fuga de agua en el cople de la RTD, un ajuste entre las bridas de la línea de vapor, la habilitación de un tablero de fuerza para la alimentación eléctrica de los motores de los impulsores y la conexión a tierra de los instrumentos para no tener problemas en la señal de datos.

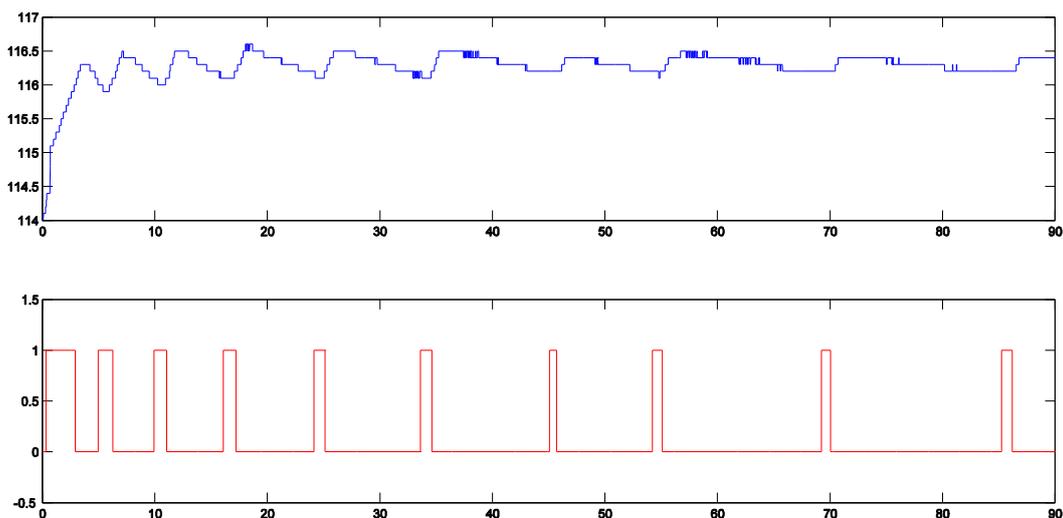


Figura 23- Señal de temperatura de agua vs tiempo

Fuente: Elaboración propia

De la figura 23, el sensor de temperatura de agua es la gráfica en azul y fue ubicado en la parte más fría del tanque. La gráfica en rojo representa la señal de control sobre el sistema. Tratamiento de 90 minutos. La señal de control al ser una relación de estado única: prendido o apagado se puede analizar con tiempos totales para el consumo de vapor. Según control ON/OFF el sistema apertura la línea de vapor entre 8 a 10 veces por lapsos de 60 a 90 segundos. (Datos históricos desde 2014)

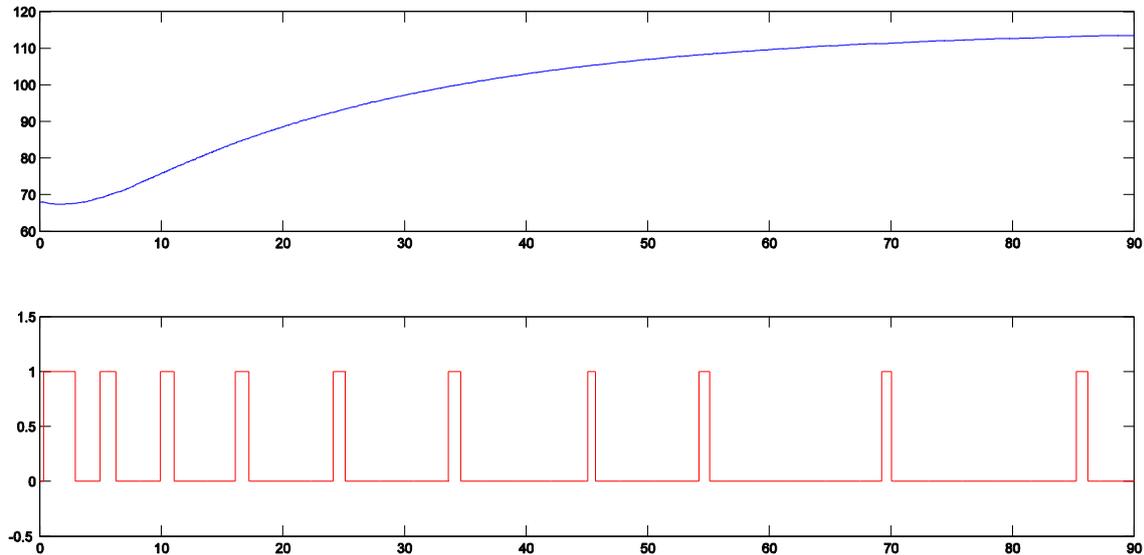


Figura 24- Señal de temperatura de pulpa de mango vs tiempo

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento del calentamiento de la pulpa fruta obedece a una dinámica de proceso común de los sistemas térmicos. (Ver figura 24)

2.7.2.3 Descripción del ensayo N°2 – 8 de abril de 2015

Esta prueba fue para llevar todos los sensores a 116°F y contrastar el valor de temperatura leído, todos los sensores estaban sumergidos dentro del tanque. El objetivo de este ensayo fue calibrar las lecturas en el punto de trabajo nominal, por ello todas las curvas se acompañan mutuamente hasta llegar al set point. (Ver figura 25)

El valor de inicio de 95°F se debe a que el agua aún se encontraba caliente resultado del ensayo del día anterior, esta condición inicial no influye en los ajustes de lecturas.

Aproximadamente a los 10 min de iniciado el ensayo se observa que el aumento de temperatura se detiene dado que se interrumpió a adrede el ingreso de vapor hacia los serpentines como lo corrobora las siguiente data correspondiente al estado de las válvulas de control. (Ver figura 26)

El muestreo inicia a las 11 horas con 23 min y se considera con el inicio de apertura de válvula de vapor para el calentamiento, se puede observar un retardo aproximado de 3 min como variable matemática del sistema.

Cabe aclarar que las RTDs se encontraban en el fondo del tanque (lugar más frío del sistema). Como se comprobará después, la distribución de temperaturas dentro del tanque tiene un perfil de mayor valor en la superficie y menor en el fondo.

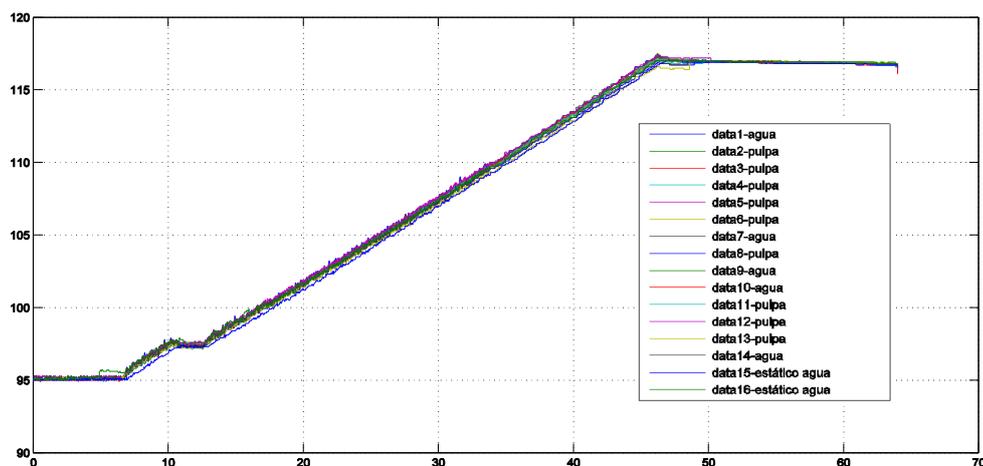


Figura 25- Calibración de sensores en punto nominal de trabajo

Fuente: Elaboración propia

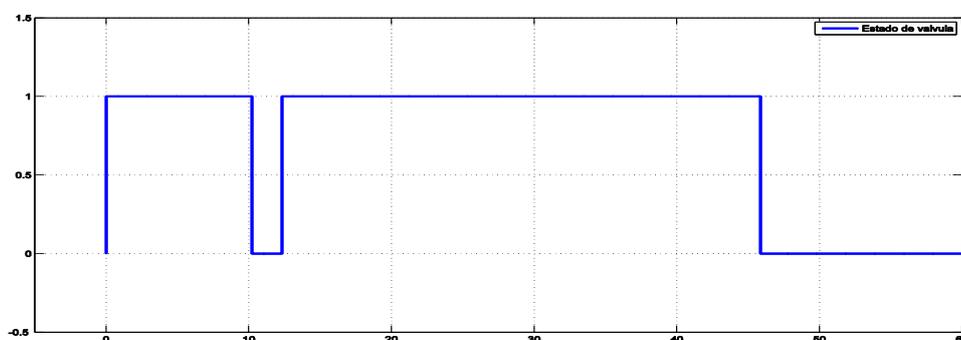


Figura 26- Estado de válvulas de vapor para la calibración

Fuente: Elaboración propia

Una vez concluida la prueba de calibración de sensores y el calentamiento del agua se inició el ensayo de tratamiento controlado acorde a los valores de los protocolos de EEUU.

En la figura 27, se muestra el despliegue de temperaturas del segundo ensayo con un control ON/OFF sobre la válvula de vapor. Se colocaron 9 sensores portátiles en pulpa más 5 sensores portátiles para agua. Adicional a esto siempre estarán presente las lecturas de los sensores estáticos. Puede observarse que las señales que suben rápidamente de medir la temperatura ambiente (antes de la inmersión) a medir la temperatura del agua caliente (después de la inmersión) son a los que se le llama sensores de agua.

En el minuto 5, se aprecia que todos las lecturas superan los 115°F, incluida la señal roja y ploma (data 10 y 14 de la leyenda). A los 90 minutos, una vez que finaliza el tratamiento se confirma que el control de temperatura sobre el agua contenida se ha mantenido en los rangos establecidos por el protocolo.

Adicionalmente todos los sensores de pulpa han superado el límite inferior de 114.8°F antes de los 80 minutos cumpliendo el requisito para exportación hacia Japón.

Por otro lado, en la evaluación del modelo matemático se puede apreciar que hay retardos diferenciados respecto a la cota donde esta cada mango, eso significa que aparte de

desarrollar una dinámica diferente por calibre y ubicación también lo hacen valor numérico del retardo del proceso.

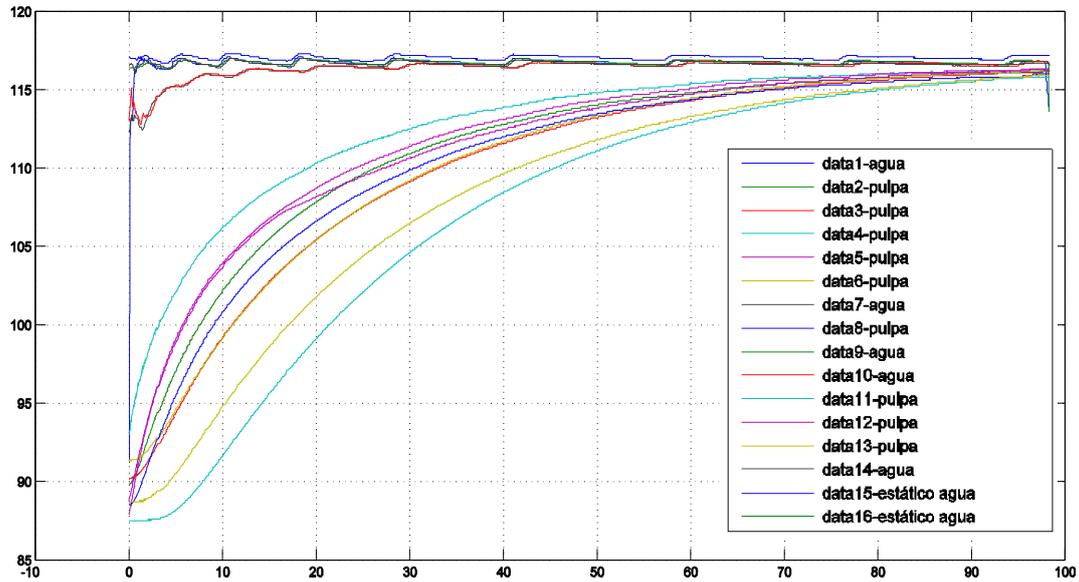


Figura 27- Registro de temperaturas de Tratamiento hidrotérmico según protocolo EEUU

Fuente: Elaboración propia

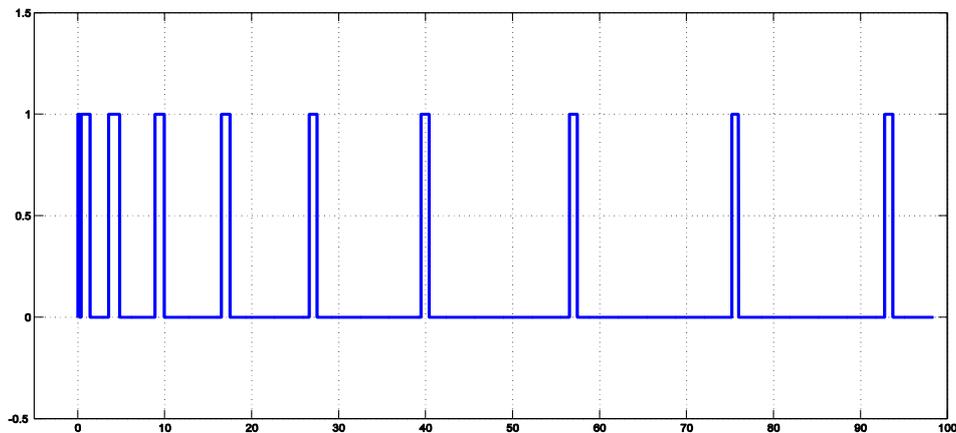


Figura 28- Señal de control ON/OFF para tratamiento hidrotérmico

Fuente: Elaboración propia

La señal de control representada en la figura 28, muestra 8 inyecciones de vapor antes de los 90 min manteniendo lapsos iguales que el ensayo anterior. Para este caso los primeros 30 minutos se dieron más seguidas que el resto de tratamiento. Al principio mantiene un proporción de 3 inyecciones cada 10 min, luego desciende hasta 1 inyección cada 20 min.

2.7.2.4 Descripción del ensayo N°3 – 9 de abril de 2015

Para este ensayo, se probó el control PID que ofrecía el PAC Productivity 3000 de Automation Direct. La acción correctiva se programó para que actué cada 10 segundos. Esta acción sobre la válvula solenoide significaba que según el algoritmo del PID de un tiempo total de 10 segundos cuanto tiempo debería durar el pase de vapor hacia los serpentines para

calentar el agua de la tina. El registro de este pulso modulante puede apreciarse en la figura 29.

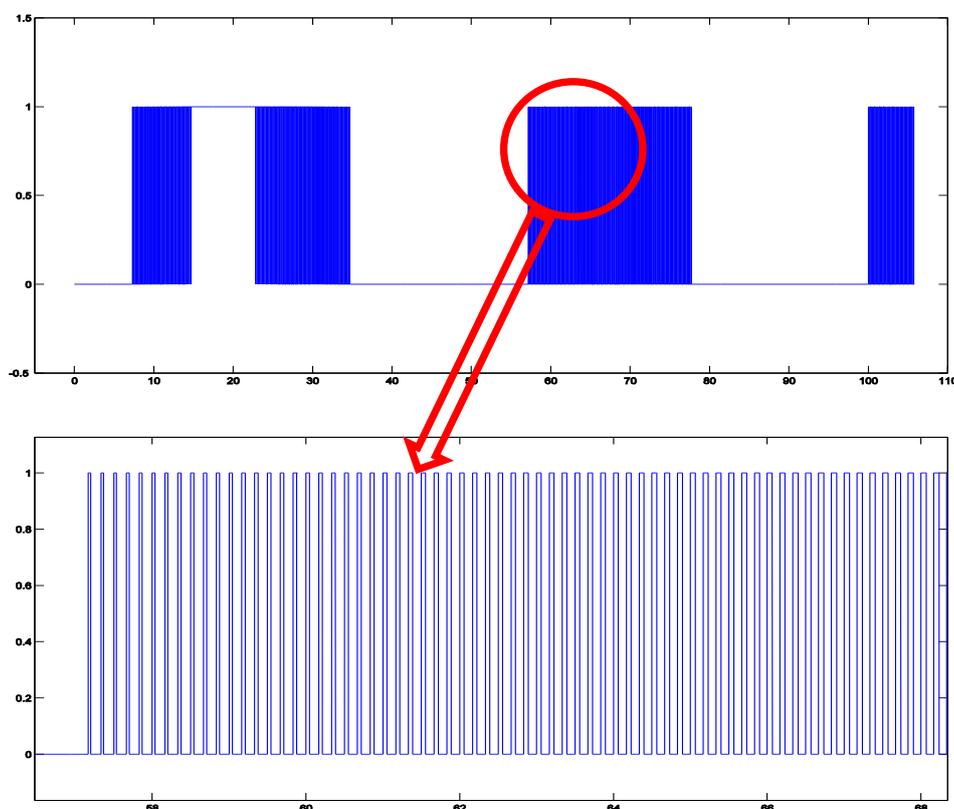


Figura 29- Pulso modulante sobre válvula de control

Fuente: Elaboración propia

El tiempo que debía estar abierta la válvula, fue restringido a un mínimo de 2 segundos para evitar un desgaste mecánico acelerado provocado por el switcheo del instrumento. Por lo tanto si el cálculo indicaba que debía estar abierta 700 ms, el algoritmo daba como salida un estado OFF de la señal digital hasta alcanzar un tiempo de 2 segundos o mayor.

Durante este ensayo la acción de control se modificó de ON/OFF a una señal modulante, esto con el fin de simular una señal iso-porcencial en los solenoides. La actualización en los valores del *duty cycle* es cada 10 segundos como ya se explicó. Por ejemplo si el cálculo resulta ser 4.60, significa que de los 10 segundos habilitados; 4.6 segundos estará abierta la válvula y los 5.4 restantes estará cerrada. Con esta metodología se obtuvieron muy buenos resultados en el ahorro de vapor. Para tener un dato referente se dispuso de cilindros a la salida del serpentín con el fin de recolectar el condensado. La tabla 8 detalla las masas de condensado durante el proceso y su comparativo de consumos entre prueba y prueba.

La figura 30, es el ploteo de todas las temperaturas registradas para ese ensayo, generando curvas de calentamiento similares al ensayo anterior. Cumple con el protocolo de EEUU y aproximadamente hasta llegar a los 95 min cumple con los requisitos de Japón.

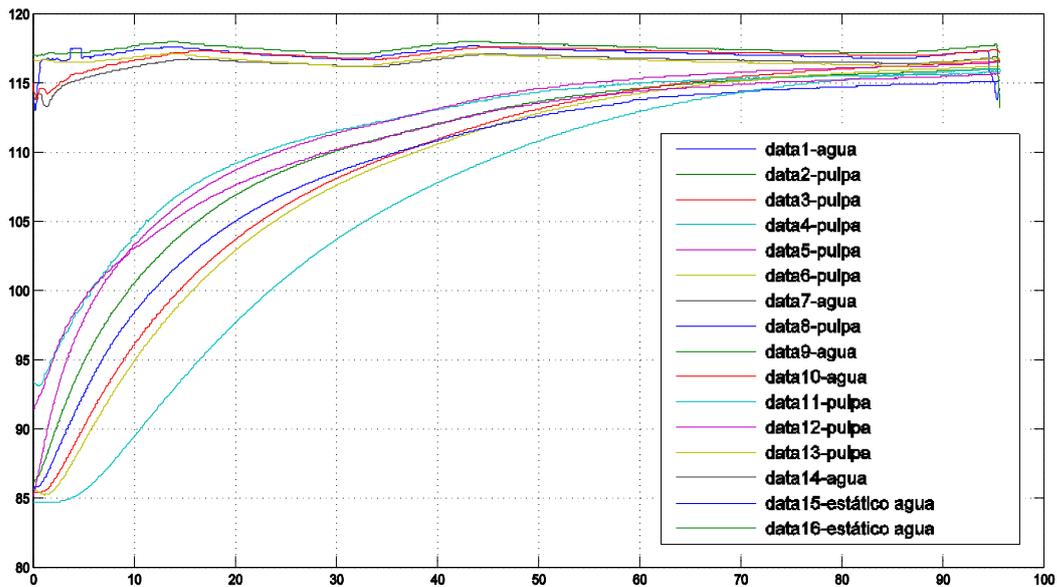


Figura 30- Despliegue de temperatura de TH usando PID

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8- Datos de masa de condensado en proceso hidrotérmico

Jueves 9 de abril		Miércoles 8 de abril	
kg		kg	
Peso Bruto	Tara	Peso Bruto	Tara
147	24	218.5	25
241.5	24.5	224	24
194.5	24.5	222.5	25
		121	24

$$\text{Consumo de vapor ON/OFF} = (218.5 + 224 + 222.5 + 121 - 25 - 24 - 25 - 24)$$

$$\text{Consumo}_{\text{OFF}}^{\text{ON}} = 688 \text{ Kg}$$

$$\text{Consumo de vapor PIDmodulante} = (147 + 241.5 + 194.5 - 24 - 24.5 - 24.5)$$

$$\text{Consumo de vapor PIDmodulante} = 510 \text{ Kg}$$

$$1\text{era aprox} = \frac{688 - 510}{688} = 25,87\% \text{ ahorro kg vapor}$$

2.7.2.5 Descripción del ensayo N°4 – 29 de enero de 2016

Este ensayo se realizó en la siguiente campaña de mango, por ello la diferencia entre las fechas de las pruebas anteriores. En esta prueba, el tanque ya fue ubicado en un área exclusiva a miras para futuros tanques duales. El inicio del tratamiento después del llevar el agua a 47°C (11:26 horas) comienza sin problemas para el protocolo de Japón.

El fin del ensayo fue a las 15:24, es decir casi 4 horas de exposición de la fruta. El fin de este ensayo fue tener el comportamiento normal cuando se hace el control hasta los 110 minutos y recolectar los datos de enfriamiento con la canasta sumergida. Una característica muy importante de este ensayo fue la prueba de nuevas hélices o impulsores en el eje del motor para recirculación de agua.

Se cancela el ingreso de vapor hacia los serpentines y se deja la recirculación de agua activada aproximadamente por dos horas. En la figura 31, se observa a partir de minuto 110 un gradiente negativo de los sensores de agua, sin embargo los sensores de pulpa aún mantienen el gradiente positivo porque el agua aún está a mayor temperatura que el centro de fruta y la transferencia de calor seguirá dándose.

Debe acotarse que la fruta de la zona más fría es la que se demora más en calentarse y es también la que se demora más en enfriarse. Este tipo de característica servirá para el control adaptativo tenga el condicional que: Durante un calentamiento gobierna la fruta de la posición más profunda pero al enfriarse gobierna la posición de la fruta en la parte superior.

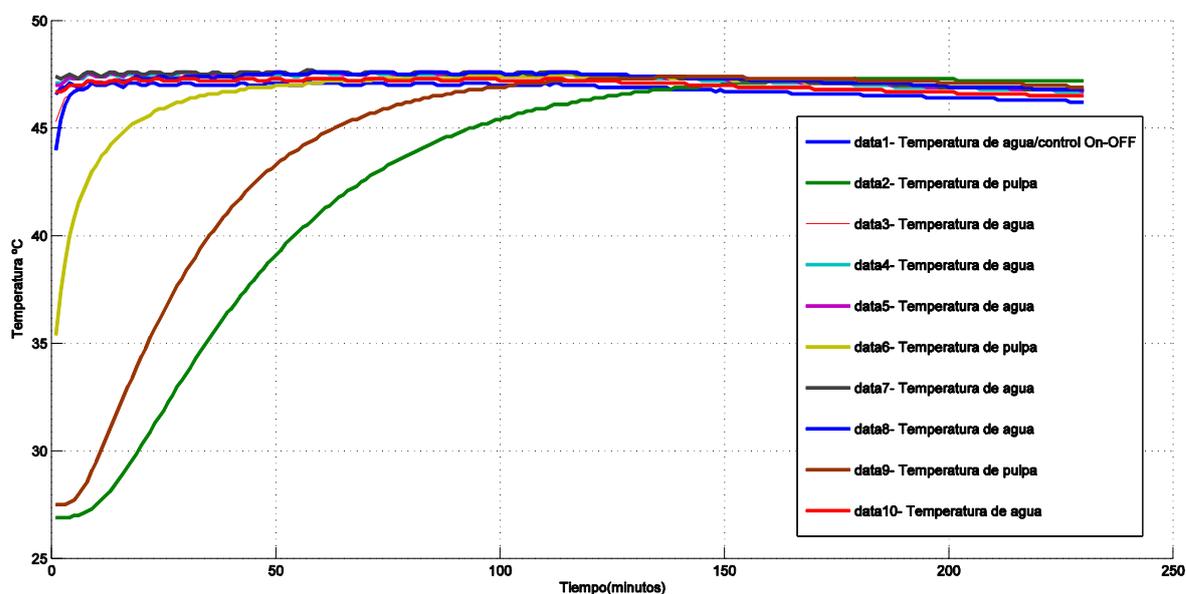


Figura 31- Ensayo de tratamiento hidrotérmico N°4

Fuente: Elaboración propia

2.7.2.6 Descripción del ensayo N°5 – 17 de febrero de 2016

El quinto ensayo surge de la necesidad de recolectar datos a lazo abierto, esto con el objetivo hacer una identificación a lazo abierto del sistema de tratamiento hidrotérmico.

Esta prueba elevó de 34°C el agua de la tina hasta los 50°C para así tener una rampa con un buen margen de grados ganados con la canastilla sumergida desde un principio. Con este experimento se podrá analizar mejor la dinámica de calentamiento con carga, parte esencial del proceso.

Luego de llegar al valor de temperatura indicado, se cerró la válvula del ingreso de vapor y se dejó sumergida la canastilla para ver la evolución del enfriamiento del sistema. (Ver figura 32)

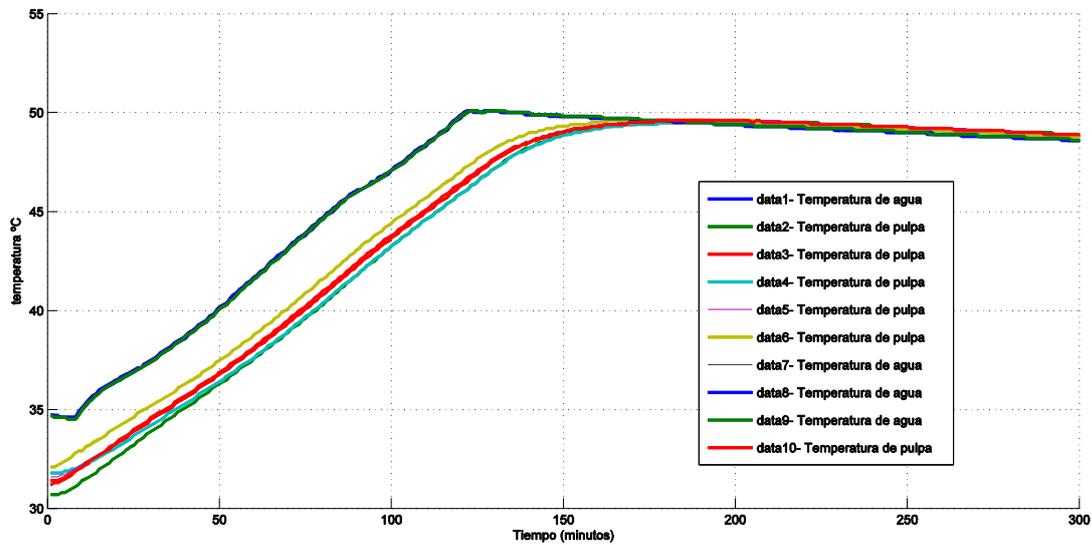


Figura 32- Prueba a lazo abierto en ensayo N°5

Fuente: Elaboración propia

La señal de control para esta grafica en una activación sostenida por 120 minutos, continuada de un cierre hasta finalizado el experimento. El ensayo inicio a las 11:00 horas, con las siguientes datos de proceso: presión de vapor 30psi, 50 galones de consumo total con un precio unitario de 6.50 soles/galón.

Para referencia de los siguientes capítulos se muestra la tabla 9 en cual están los rangos de masa que distingue a cada calibre de mango, vale decir que la diferenciación de calibres es fundamental porque presentan constantes de tiempo individuales.

Tabla 9- Calibres de mango y rango de masa

Calibre	Rango de Masa (gramos)	Masa promedio (gramos)
16	245-280	262.5
14	281-310	295.5
12	311-380	345.5
10	381-425	403
9	426-480	453
8	481-550	515.5
7	551-645	598
6	646-720	683
5	721-895	808

Fuente: Datos de proceso de Biofruit S.A.

Capítulo 3

Identificación matemática del proceso de tratamiento hidrotérmico

3.1 Identificación de procesos industriales

La identificación de procesos industriales, se basa en los ensayos experimentales que pueden hacerse con una planta en específico. El manejo de los datos de entrada y salida es la opción más rápida para obtener una representación matemática de dicho proceso. Otra opción es el modelado matemático considerando los parámetros físicos del sistema, balances de energía, flujos de masa y condiciones del entorno que puedan plasmarse en ecuación de diferentes grados. Ambos procedimientos tienen sus ventajas y desventajas.

Para esta ocasión se analizará los datos de los ensayos obtenidos en la planta de Biofruit descritos en el capítulo anterior y adicionalmente se analizará la ecuación obtenida en la publicación “Estudio analítico, de campo y de simulación numérico-computacional en el comportamiento fluido dinámico y térmico de equipos de tratamiento hidrotérmico del mango (2015)”

Una identificación es llegar a obtener una relación con ayuda de los registros de datos que contengan los valores de las entradas y salidas del sistema, sin importar las leyes que gobiernen la dinámica del sistema, es decir, toma al sistema como si fuera una caja negra. Por ello, los experimentos realizados para el registro de datos desempeñan una tarea fundamental. Habitualmente éste es el método más utilizado para el control de procesos reales, mientras que la modelación es más empleada para estudiar los comportamientos y propiedades de los sistemas. (Gutarra Castillo, 2016)

Así, el método de identificación es empleado al tanque híbrido construido e instalado en la empresa Biofruit- Tambogrande, para que con el modelo obtenido se pueda implementar las estrategias de control.

3.2 Metodología de identificación

Para plantear un buen experimento de identificación, la señal de entrada deberá tener cambios en la amplitud y tiempos de acción cerca del punto de trabajo nominal. De esta manera la señal de salida del proceso mostrará toda su dinámica ante las posibles variaciones

en la entrada. Para el tratamiento hidrotérmico, como se explicó existen cuatro subprocesos que gobiernan en cada fase del control.

- **Calentamiento sin carga:** Momento en que la inyección de calor se realiza sin carga térmica, es decir solo se calienta agua y sucede antes de iniciar los tratamientos.
- **Enfriamiento sin carga:** Momento en que no hay inyección de calor ni tampoco se encuentra sumergida la canastilla de mangos.
- **Calentamiento con carga:** Situación en que se está ingresando calor al sistema y además ya se encuentra sumergido el lote de fruta.
- **Enfriamiento con carga:** Situación en que el control ON/OFF ha superado el límite superior de control y debe esperar a la dinámica del sistema para nuevamente ingresar vapor al tanque.

Por esta razón, en los experimentos realizados para la obtención del modelo se debe sectorizar con mucho cuidado los datos recolectados.

Figura 33- Esquema identificación de procesos

Fuente: (Gutarra Castillo, 2016)

El mejor alcance que ofrece la identificación por datos experimentales es que se obtiene un modelo de manera rápida y sin mucho conocimiento de proceso se logra tener una relación matemática. Gracias a este método no es necesario la intervención de más equipos que los ya instalados (actuadores, sensores y equipo de control). La limitante es que el rango de validez es solo usable en torno al punto de trabajo identificado y por tanto solo es factible en una pequeña banda de funcionamiento.

Los pasos para identificación son iterativos y se pueden listar como sigue:

1. Planear el experimento, lo más recomendable consiste en establecer unos datos aleatorios para las entradas y luego de ser procesados por el sistema y poder recoger datos de las salidas del proceso.
2. Inspeccionar y arreglar los datos, consiste en filtrar los datos, remover tendencias y sobresaltos.
3. Elegir un tipo de modelo, es decir, un modelo que mediante hipótesis estadísticas se ajuste a los datos experimentales y que nos brinde el mínimo error (ejemplo: N4SID genera un modelo en espacio de estados o una aproximación por función de transferencia).
4. Estimar parámetros, consiste en hacer una selección adecuada de parámetros para analizar cuál selección es la que brinda un mejor modelo.
5. Validar el modelo obtenido, para ello, es necesario evaluar su respuesta ante saltos escalón e impulsos, así poder determinar posibles defectos y diagnosticar sus causas. Además el índice de performance es un método muy eficaz que se puede utilizar en éste paso. Es un indicador de que tan bien se ajusta el modelo a los datos obtenidos.

Estos pasos no son para seguirlos al pie de la regla, de manera unidireccional, sino que se tiene la libertad de volver a cada uno de ellos para hacer modificaciones. (Gutarra Castillo, 2016)

3.3 Calentamiento con carga (CC)

Datos:

Número de polos=3

Número de ceros=0

Datos correspondiente a 110 muestras (110 minutos)

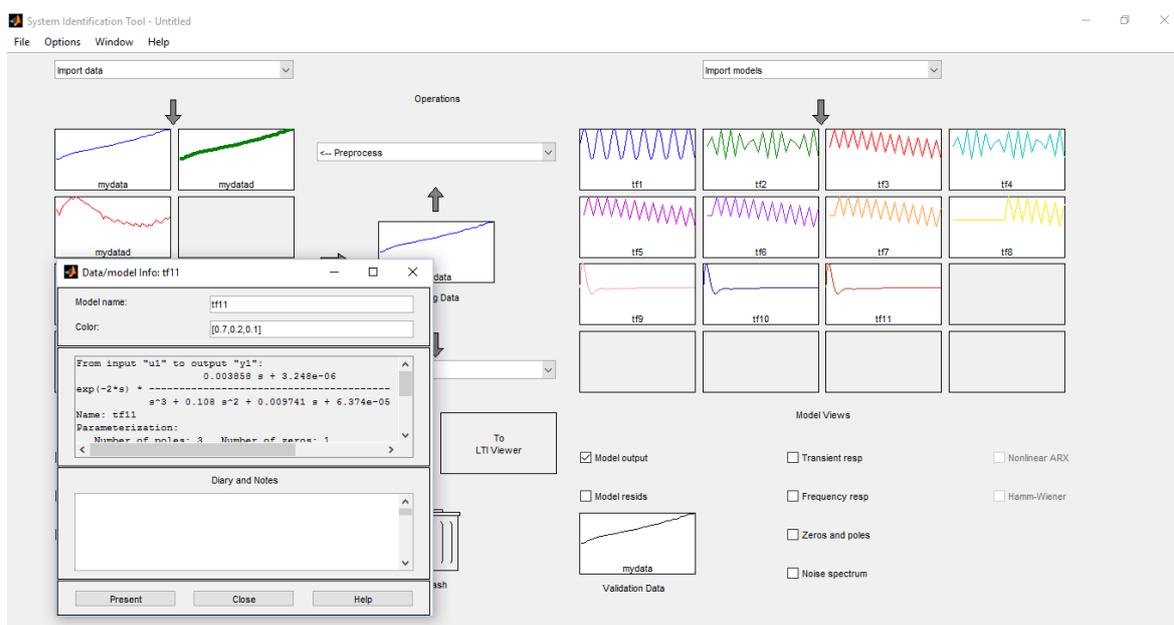


Figura 33- Procedimiento para identificación de CC

Fuente: Elaboración propia

Después de 11 iteraciones de modelos, el que se ajusta mejor es el indicado en la ecuación (3.1) con un FIT del 97.02.

$$TF_{CC-agua} = \frac{0.003248}{s^3 + 0.06724s^2 + 0.009332s + 4.617 * 10^{-5}} \quad (3.1)$$

Esta representación del calentamiento del agua con la jaba inmersa servirá más adelante para el acoplamiento de los cuatro subprocessos del tratamiento hidrotérmico.

Ahora corresponde analizar la dinámica del calentamiento pero vista desde la pulpa de mango ubicado en la zona más fría de la tina.

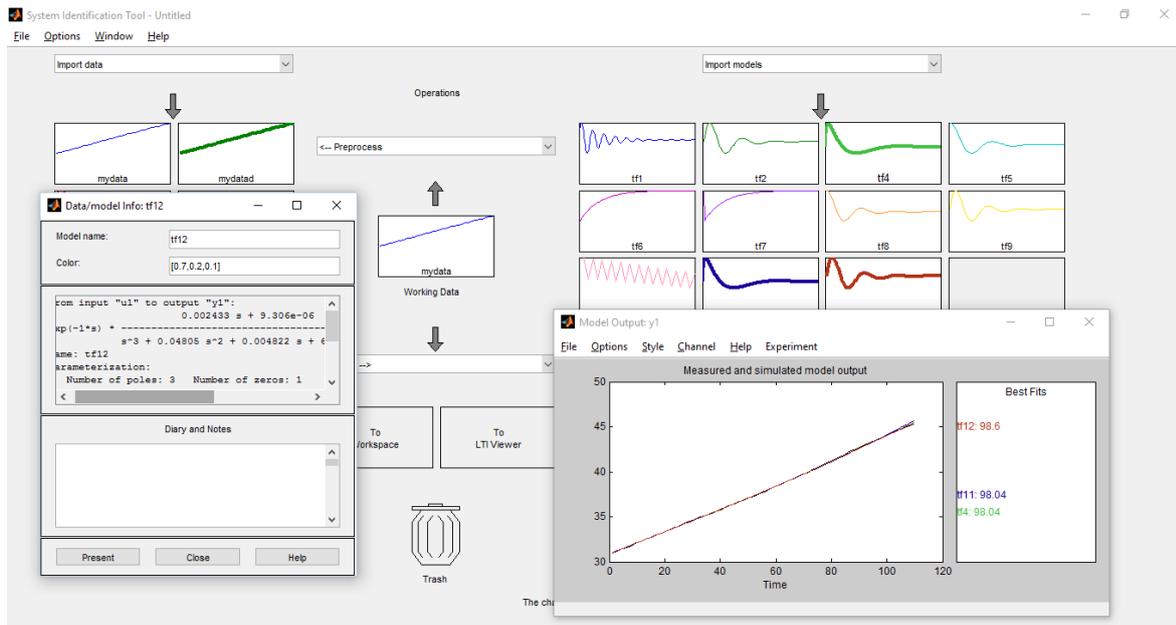


Figura 34- Curva de calentamiento del mango en la posición más fría

Fuente: Elaboración propia

$$TF_{CC-pulpa} = \frac{0.003161}{s^3 + 0.06997s^2 + 0.007974s + 5.457 * 10^{-5}} \quad (3.2)$$

Después de 12 iteraciones, buscando la relación adecuada se llegó a la ecuación 3.2, la cual genera un FIT de 92.49.

3.4 Enfriamiento con carga (EC)

Los datos para esta etapa fueron recolectados mientras la canastilla se encontraba sumergida y sin inyección de vapor en los serpentines. Se dejó la recirculación activada y se esperó que la temperatura descienda y así poder conocer la tasa de calor que se emite hacia los alrededores. Dado que el tanque se encuentra aislado en buena parte de su área externa, los gradientes de temperaturas fueron muy bajos a tal punto que transcurrido más de 3 horas, el tanque solo había descendido tres grados su temperatura media. Utilizando la transformada de Laplace de una recta (Ver figura 36) se determina la ecuación 3.3.

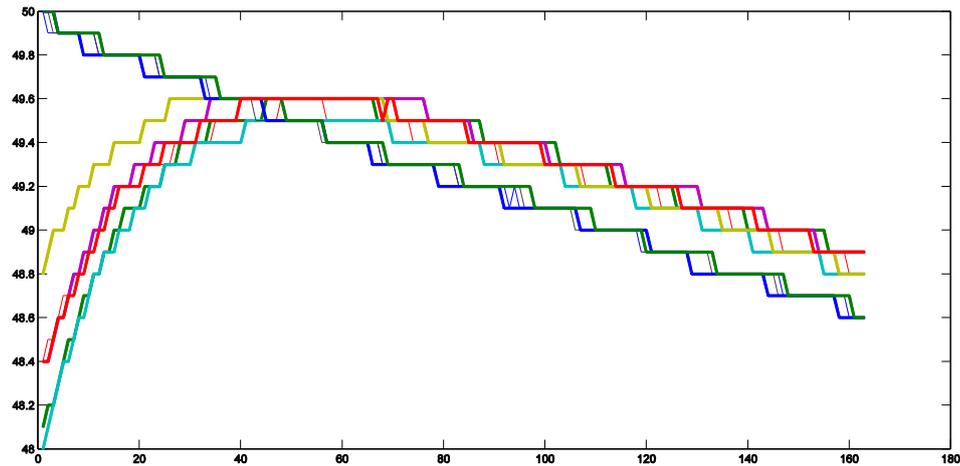


Figura 35- Descenso de temperatura de agua y pulpa de mango

Fuente: Elaboración propia

$$TF_{EC-agua} = \frac{-0.008589}{s^2} \quad (3.3)$$

3.5 Calentamiento sin carga (CSC)

Para recolectar estos datos se precisa que todos los sensores de agua estén midiendo la misma temperatura mientras se eleva este valor.

La situación más accesible para estos datos son la calibración de sensores, que suele realizarse para la acreditación o certificación de un tanque para poder llevar a cabo tratamientos hidrotérmicos.

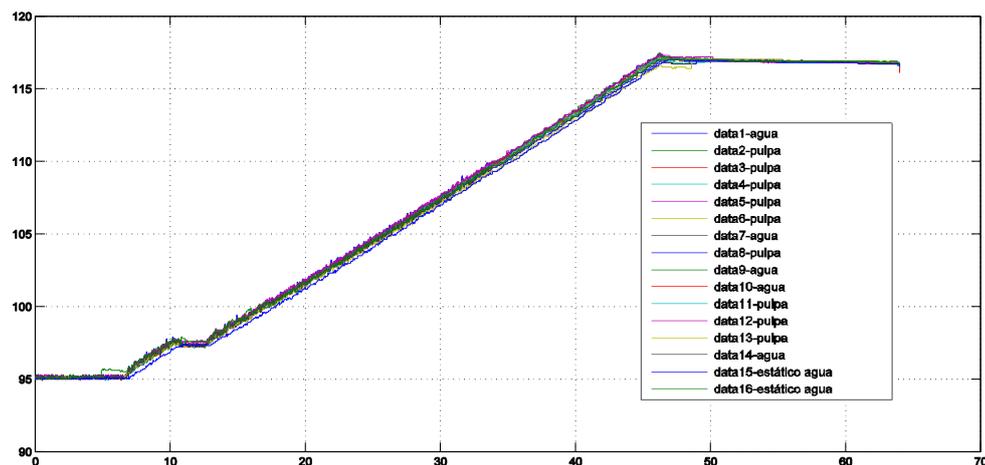


Figura 36- Prueba a lazo abierto para calentamiento sin jabas

Fuente: Elaboración propia

De manera análoga al enfriamiento con carga, la dinámica muestra un comportamiento lineal, por ello aproximamos también a una recta el proceso de calentar el agua de la tina sin la inmersión de la canastilla de mangos. (Ver ecuación 3.4)

$$TF_{CSC-agua} = \frac{0.54}{s^2} \quad (3.4)$$

3.6 Enfriamiento sin carga (ESC)

Esta situación se logra al retirar la canastilla de mangos, así la tina se queda simplemente con el agua del tratamiento. Sin ninguna inyección de calor, el líquido naturalmente se enfriará y mostrará una dinámica de su disminución de temperatura. (Ver figura 38)

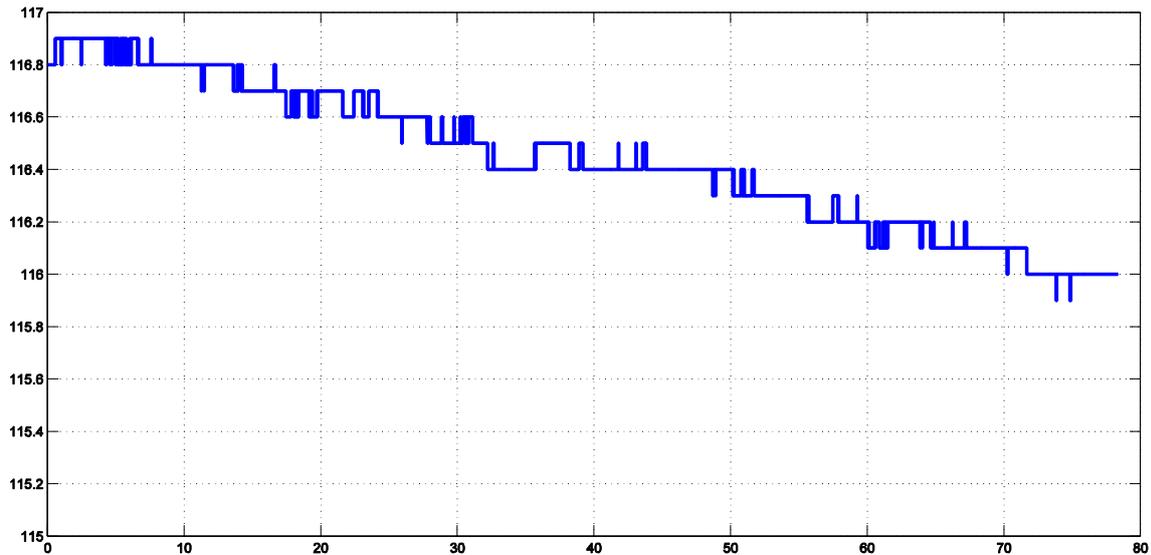


Figura 37- Disminución de la temperatura de agua en tina sin jabas
Fuente: *Elaboración propia*

$$TF_{ESC-agua} = \frac{-0.006}{s^2} \quad (3.5)$$

La ecuación mostrada en (3.5) presenta menor coeficiente de pérdida de calor que el enfriamiento con carga. Esto puede explicarse porque el agua debe ceder calor tanto a los mangos que aún están por debajo de su temperatura y también debe ceder calor al exterior. Si solo va a ceder calor al exterior entonces, le durará más la energía térmica almacenada y por tanto la disminución de temperatura será más baja. (Menor gradiente)

Capítulo 4

Estudio y diseño de controladores en variables de estados para una futura implementación en el proceso de tratamiento hidrotérmico

El avance de la tecnología le ha dado una gran ventaja a los dispositivos de campo, por ejemplo ahora tienen capacidad para comunicación y procesamiento local de señales. Estas características permiten integrarlos en un control de procesos, también hacen más fiable y rentable el sistema de producción.

A nivel digital la incorporación de equipos en el nivel más bajo, es decir, el de campo conlleva a varias situaciones. La más importante es el aumento de datos. El aumento de datos a su vez requiere un orden para su almacenamiento, un estándar de tamaño de memoria, un protocolo de transferencia, un modo de visualización y en otras situaciones mucho más delicadas requieren también ser procesadas dentro un *tiempo crítico*². (Oqueli Cabredo, 1997)

El uso de las nuevas tecnologías cambia el panorama industrial, la automatización de procesos ayuda en gran medida a las empresas a mejorar su control, calidad y productividad. Ante este nuevo escenario, surge un mercado el cual ofrece el servicio de instalación, venta de equipos y análisis de propuestas. Son muchísimas las empresas que brindan este tipo de soluciones. Es por ello que, las personas encargadas de iniciar un nuevo proyecto de automatización también deben evaluar el tipo de tecnología a usar, la ingeniería de requisitos se verá muy favorecida si personas con amplia experiencia en este rubro participan de esta etapa.

Cuando se ha decidido por un fabricante, ya sea por los beneficios, precios, tiempos de entrega y/o ejecución, accesibilidad, repuestos, historial y ejemplos de trabajos realizados con anterioridad. Además, es importante evaluar el soporte técnico que brindan, ya que muchas de las fallas precisan ser corregidas en el menor tiempo posible por los efectos negativos que podrían acarrear para la empresa. Dicho esto, se le explica al lector que los motivos de uso del PAC Productivity 3000 para la realización de la presente tesis son; la

² El tiempo crítico es el intervalo de tiempo, dentro del cual uno o más acciones deben ser completadas con un nivel de certeza definido. Una demora superior al tiempo crítico en el sistema específico, conlleva el riesgo de fallo con probables accidentes para los equipos, la planta e incluso para las personas.

experiencia de su implementación en diferentes proyectos de la región por parte del grupo asesor, su facilidad de compra y el constante soporte técnico.

Automation Direct ofrece un abanico completo de productos que pueden ser visualizados en su página web para proyectos de este tipo, también pone a disposición su software Click Programming y Productivity Suite 1.10, que son de libre acceso, están en constante actualización y ha sido empleado para esta tesis.

4.1 Análisis de la implementación de controlador, estimador y estimador reducido en variables de estado

Cara a la instrumentación actualmente instalada en el tanque de tratamiento hidrotérmico de la empresa Biofruit, los modos de control que se pueden emplear son:

- Control ON/OFF
- PID modulante

Por ello se ha desarrollado la teoría de los controladores en variables de estado en el presente capítulo. Para lograr su implementación se debe cambiar el actuador, es decir la válvula que gobierna el ingreso de vapor por una válvula iso-porcetual o de posicionador inteligente, la cual ofrezca aperturas en porcentajes menores al diámetro de la línea de vapor. Cabe resaltar que una vez dispuesta en planta la válvula modulante se debe hacer una identificación del modelo matemático del actuador y así acoplar los modelos hallados en el capítulo 3.

El desarrollo de las siguientes páginas es la forma de cómo responden y controlan las variables del proceso cuando se utiliza la metodología de control en variables de estado. Se analizará el modelo matemático con las siguientes situaciones.

- Diseño de regulador proporcional en variables de estado
- Diseño de estimador en variables de estado
- Diseño de estimador y regulador acoplados
- Diseño de estimador reducido

4.2 Diseño de regulador proporcional en variables de estado.

Sistema de ecuaciones para desarrollo en variables de estado. Ver ecuación (4.1)

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4.1)$$

La matriz A, B, C elegidas son:

$$A = \begin{pmatrix} 8 & 1 & 6 \\ 3 & 5 & 7 \\ 4 & 9 & 2 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Determinamos los autovalores del sistema plateado a lazo abierto

$$\det(sI - A) = 0$$

$$\det \left[\begin{pmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 8 & 1 & 6 \\ 3 & 5 & 7 \\ 4 & 9 & 2 \end{pmatrix} \right] = 0$$

$$\det \left[\begin{pmatrix} s-8 & -1 & -6 \\ -3 & s-5 & -7 \\ -4 & -9 & s-2 \end{pmatrix} \right] = 0$$

$$s^3 - 15s^2 - 24s + 360 = 0 \quad (4.2)$$

Las raíces de la ecuación (4.2) son:

$$p_1 = 15, \quad p_2 = 4.899, \quad p_3 = -4.899$$

El sistema es inestable por presentar polos con raíz real positiva.

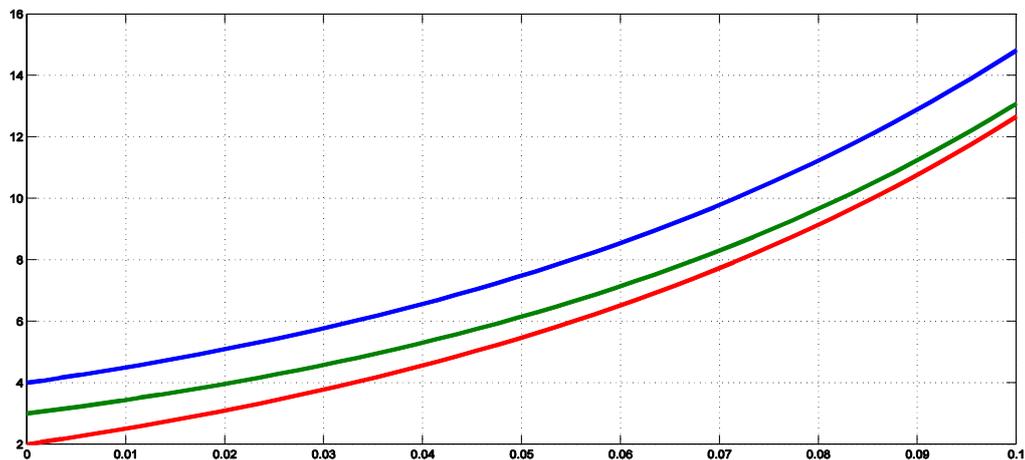


Figura 38-Respuesta divergente del sistema ante una entrada escalón

Fuente: Elaboración propia

La figura 39 es un zoom de los primeros 0.1 segundos y se puede observar que a lazo abierto el proceso es inestable. Si se dejara más tiempo para la simulación los valores de los estados divergen. Para controlar a lazo cerrado se utilizará el regulador proporcional. Primero se determinará si la matriz de controlabilidad cumple con las condiciones necesarias.

$$Co = [B \ AB \ A^2B]$$

$$Co = \begin{pmatrix} 0 & 6 & 67 \\ 0 & 7 & 67 \\ 1 & 2 & 91 \end{pmatrix}, \det(Co) = -67, \text{ como es diferente de cero entonces es controlable}$$

Técnica de control para utilizar regulador proporcional

$$\mu(t) = -k x(t) \text{ reemplazamos en } \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B * -k x(t)$$

$$\dot{x}(t) = (A - Bk)x(t)$$

$$\det(sI - (A - Bk)) = \text{producto de los polos deseados} = (s + 2)(s + 3)(s + 5)$$

$$s^3 + (k_3 - 15)s^2 + (-24 + 6k_1 + 7k_2 - 13k_3)s + (37k_3 - 38k_2 - 23k_1 + 360) = (s + 2)(s + 3)(s + 5)$$

$$k_1 = 84.4, \quad k_2 = -18.06, \quad k_3 = 25$$

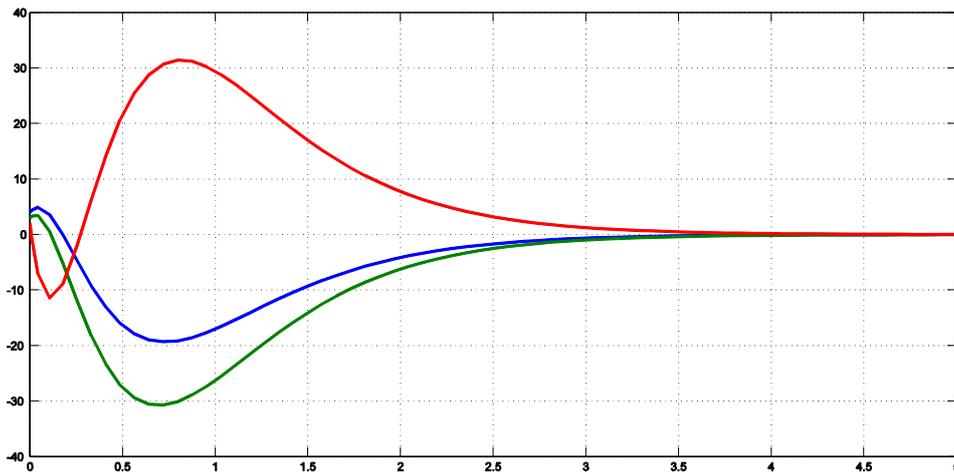


Figura 39- Los estados convergen a cero, como corresponde.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 40, esto sucede después de cambiar la entrada ‘u’ por un controlador proporcional que retroalimenta a la matriz B. El arreglo simulink se puede apreciar en la figura 41.

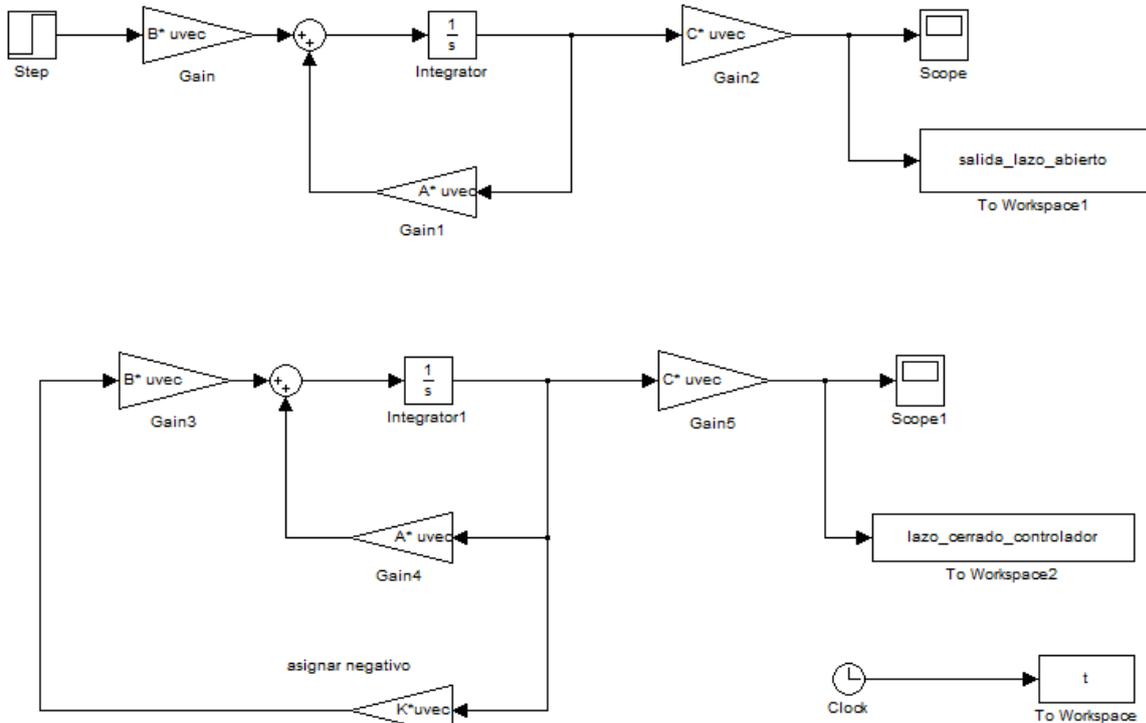


Figura 40- Diagrama de bloques utilizado para esta sección

Fuente: Elaboración propia

4.3 Diseño de estimador en variables de estado.

Sistema de ecuaciones para desarrollo de estimador en variables de estado

Hipótesis

Se conocen A, B, C, D, la señal de entrada y la señal de salida.

$$x(t) = \text{vector de estados reales}$$

$$\widehat{x}(t) = \text{vector estimador de los estados}$$

Ahora, la ecuación fundamental de espacios de estados, posee un factor de corrección. Este factor es el resultado de múltiples estudios los cuales han llegado a la conclusión de ser la mejor aproximación. (Ecuación 4.3) El esquema se muestra en la figura 42.

$$\dot{\widehat{x}}(t) = A\widehat{x}(t) + Bu(t) + [L(y(t) - \widehat{y}(t))] \quad (4.3)$$

$$\widehat{y}(t) = C\widehat{x}(t)$$

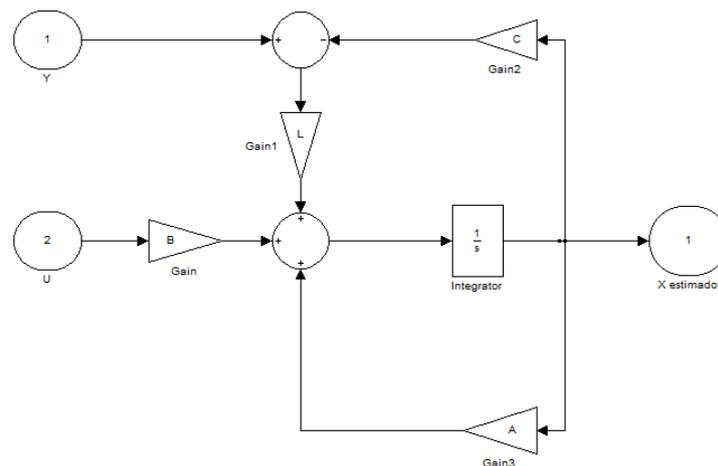


Figura 41- Esquema de estimador, entradas: y, u. Salida x estimado

El error en la estimación quedará definida por:

$$e_x = x(t) - \widehat{x}(t)$$

$$\frac{de_x}{dt} = \frac{dx(t)}{dt} - \frac{d\widehat{x}(t)}{dt}$$

$$\dot{e}_x = \dot{x}(t) - \dot{\widehat{x}}(t)$$

$$\dot{e}_x = [Ax(t) + Bu(t)] - [A\widehat{x}(t) + Bu(t) + [L(y(t) - \widehat{y}(t))]]$$

$$\dot{e}_x = [Ax(t) - A\widehat{x}(t)] - L(y(t) - \widehat{y}(t))$$

$$\dot{e}_x = A[x(t) - \widehat{x}(t)] - L[Cx(t) - C\widehat{x}(t)]$$

$$\dot{e}_x = A[x(t) - \widehat{x}(t)] - LC[x(t) - \widehat{x}(t)]$$

$$\dot{e}_x = A[e_x] - L C[e_x] \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= (A - LC)e_x \\ \dot{e}_x &= (A_{estimado})e_x \end{aligned}$$

La nueva matriz que acompaña a la variable error, posee la incógnita de los valores de L y se puede ver en la ecuación (4.4). Nosotros asignamos los nuevos polos, tal que, lleven de manera rápida el error a cero.

Para el diagrama en bloques de la figura 42 el valor de la entrada U, puede ser simulada por un step. La entrada Y puede ser recogida por la respuesta del sistema a lazo abierto. Previo a las imágenes que se mostraran se debe agregar que la matriz A, B, C, D que se eligieron en el ejemplo anterior son las mismas pero en otra representación de espacios de estados.

Los pasos para realizar esta actividad han sido; utilizar las matrices ya definidas y obtener la función transferencia del proceso, luego obtener la nueva representación a partir de la función transferencia hallada.

Matrices Anteriores

$$A = \begin{pmatrix} 8 & 1 & 6 \\ 3 & 5 & 7 \\ 4 & 9 & 2 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; C = (1 \ 0 \ 0); D = 0$$

Matrices Actuales

$$A = \begin{pmatrix} 15 & 24 & -360 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; C = (0 \ 6 \ -23); D = 0$$

De esta forma las simulaciones se vuelven más sencillas, y la comparación de los parámetros reales con los estimados se vuelve más robusta.

Ahora procederemos a determinar los valores del vector columna L. El sistema a lazo abierto tiene un polo real negativo y es aproximadamente 5, para ello se escogerán los nuevos polos entre 200 y 300.

$$\det(sI - (A - LC)) = (s + 200) * (s + 250) * (s + 300)$$

$$\det \left[\begin{pmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 15 & 24 & -360 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} + L * (0 \ 6 \ -23) \right]$$

$$\det \left[\begin{pmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 15 & 24 & -360 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{pmatrix} * (0 \ 6 \ -23) \right]$$

$$\det \left[\begin{pmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 15 & 24 & -360 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 6l_1 & -23l_1 \\ 0 & 6l_2 & -23l_2 \\ 0 & 6l_3 & -23l_3 \end{pmatrix} \right]$$

$$\det \begin{bmatrix} s - 15 & 6l_1 - 24 & 360 - 23l_1 \\ -1 & 6l_2 + s & -23l_2 \\ 0 & 6l_3 - 1 & s - 23l_3 \end{bmatrix}$$

$$s^3 + (6l_2 - 23l_3 - 15)s^2 + (-24 + 6l_1 + -113l_2 + 345l_3)s + (345l_2 - 23l_1 - 1608l_3 + 360) = \quad (4.5)$$

$$(s + 200) * (s + 250) * (s + 300)$$

$$l_1 = -337265, \quad l_2 = 96525, \quad l_3 = -25213$$

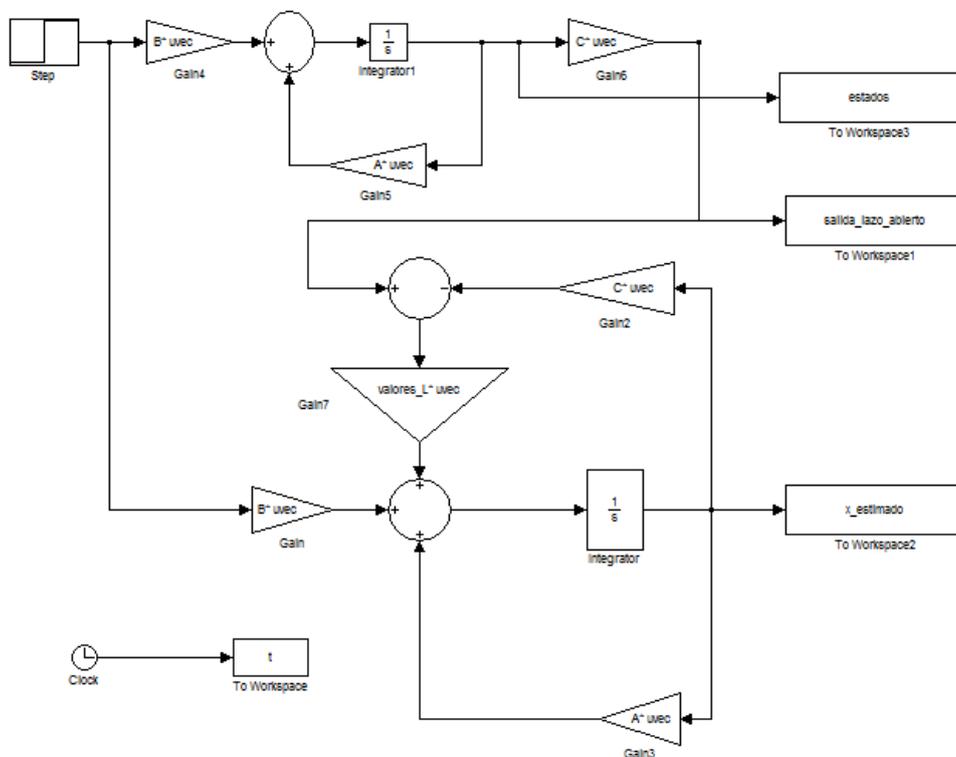


Figura 42- Diagrama de bloques estimador de estados utilizando la salida del sistema a lazo abierto

Estados del sistema a lazo abierto. Se observa divergencia en sus valores, por tanto los estados estimados también deberán comportarse así. Las condiciones iniciales para los tres estados han sido 50, 40, 30. (Ver figura 44)

Para la siguiente grafica de estimación se ha utilizado como condiciones iniciales cero para todos los estados ya que en principio no se conoce el valor de estas variables. Por otro lado, si se diera los mismos valores en que inician los estados reales no se vería como logra el estimador aproximarse al estado real. (Ver figura 45)

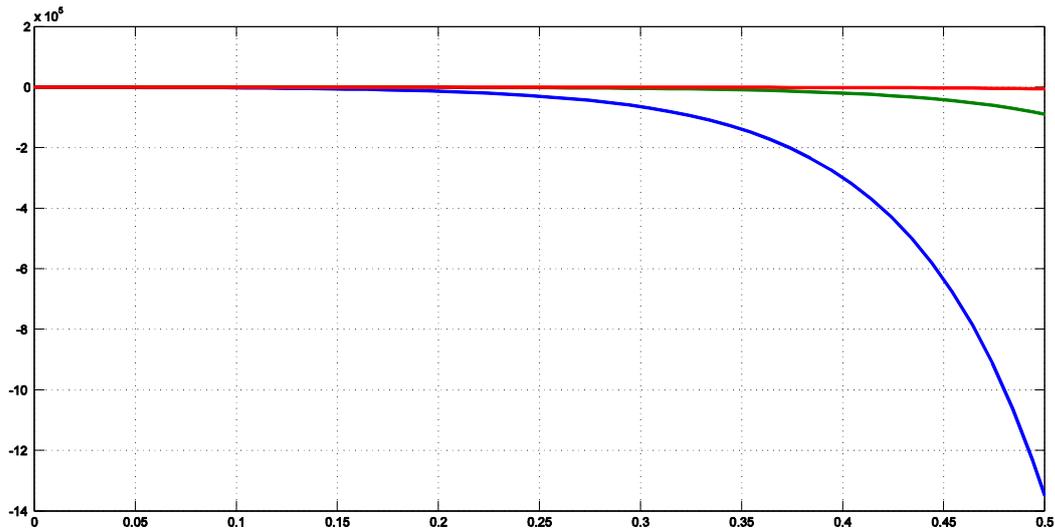


Figura 43- Estados del sistema a lazo abierto

Fuente: Elaboración propia

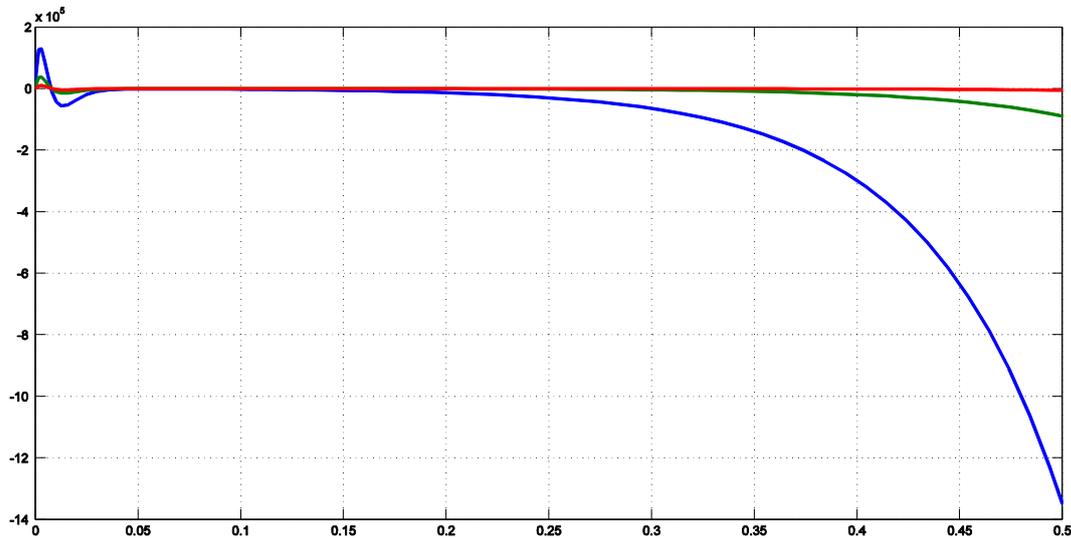


Figura 44- Respuestas de los estados aproximados

Fuente: Elaboración propia

Como era de proveerse, al principio el error y la dinámica es fuerte, esto tiene como fin llevar los estados aproximados al valor de los estados reales. Una vez que se logra llegar a la referencia, el error es cero y se mantiene así durante el resto de la simulación.

4.4 Diseño de estimador y regulador acoplados.

Como se ha visto en los dos ejemplos anteriores, el regulador de las variables de estados logra la convergencia a cero de cada uno de los estados, sea o no estable la matriz característica.

Por otro lado el estimador logra aproximar las variables de estados al valor real. Cada uno tiene un fin, y si se acoplan los dos esquemas se deberá obtener también una convergencia a cero de los estados estimados. Una vez que el estimador y el regulador cumplen su tarea, deberá haber una superposición de valores.

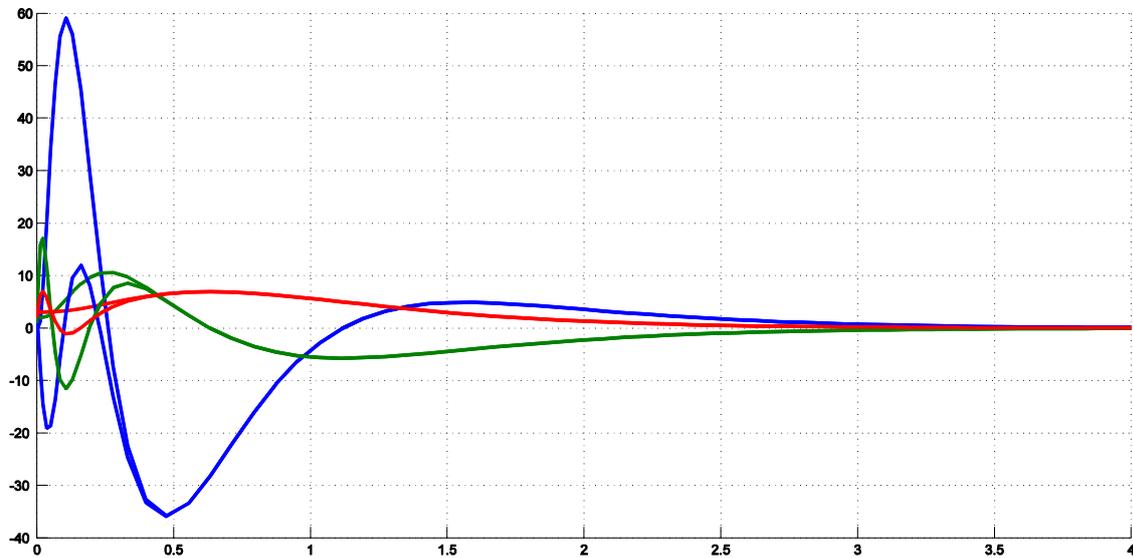


Figura 46- Respuesta de los estados reales y estimados a un tiempo de simulación de 4 s.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 47, se observa una convergencia a cero, este comportamiento se debe a la acción del regulador, el cual establece que el estado final debe ser igual a cero.

Por otro lado, el regulador retroalimenta la entrada, que a su vez forma parte del lazo de control del sistema real y aproximado, por ello esta propiedad afecta también a los estados estimados.

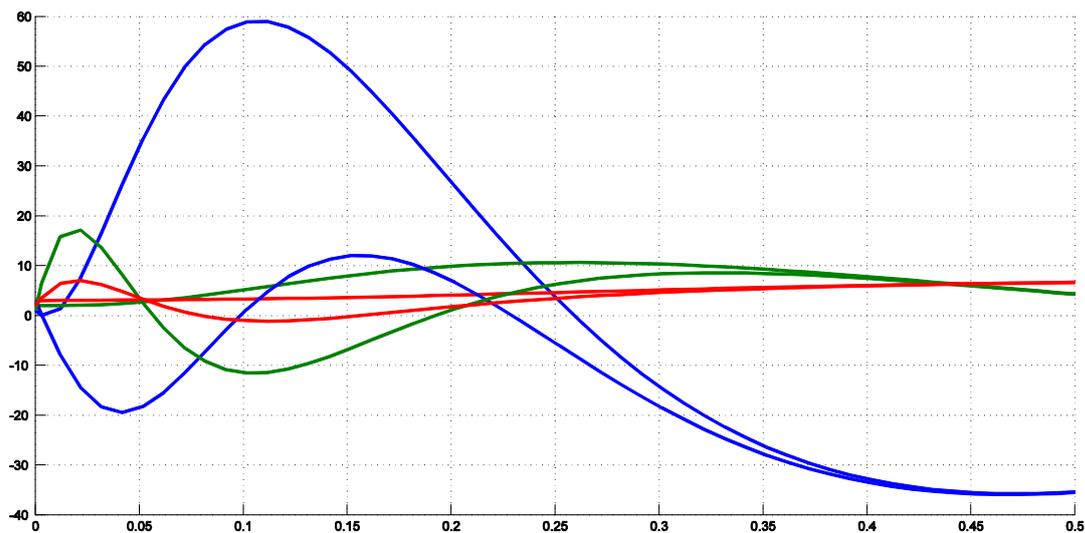


Figura 47- Respuesta de los estados reales y estimados a un tiempo de simulación de 0.5 s

Fuente: Elaboración propia

El primer estado (azul) logra la superposición de valores a un tiempo aproximado de 0.4 segundos.

El segundo estado (rojo) logra la superposición de valores a un tiempo aproximado de 0.27 segundos.

El tercer estado (verde) logra la superposición de valores a un tiempo aproximado de 0.38 segundos.

La acción del estimador es lograr aproximar lo más rápido posible, según la dinámica de los polos que se hubiesen elegido, cada uno de los estados, al valor real. (Ver figura 48)

4.5 Diseño de estimador reducido

El vector de estados ahora está conformado por valores medibles y no medibles, los estados que se pueden medir se denotaran por el sub índice **a**, y es un dato recopilado mediante el instrumento correspondiente instalado en campo.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \begin{pmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_a \\ B_b \end{pmatrix} u \\ \dot{x}_b &= A_{ba}x_a + A_{bb}x_b + B_b u \\ \dot{x}_b &= [A_{bb}]x_b + [A_{ba}x_a + B_b u] \\ \dot{x}_a &= A_{aa}x_a + A_{ab}x_b + B_a u \\ [\dot{x}_a - A_{aa}x_a - B_a u] &= [A_{ab}]x_b\end{aligned}$$

Haciendo la analógica al sistema

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= [A]x(t) + [B]u(t) \\ y(t) &= [C]x(t)\end{aligned}$$

Obtenemos

$$\begin{aligned}[A] &= A_{bb} \\ [B]u(t) &= A_{ba}x_a + B_b u \\ [y] &= \dot{x}_a - A_{aa}x_a - B_a u \\ [C] &= A_{ab}\end{aligned}$$

Ahora aplicamos la aproximación de sistema con estimador

$$\begin{aligned}\widehat{\dot{x}}(t) &= A\widehat{x}(t) + Bu(t) + [L(y(t) - \widehat{y}(t))] \\ \widehat{\dot{x}}_b(t) &= A_{bb}\widehat{x}_b(t) + [A_{ba}x_a + B_b u] + L[(y(t) - \widehat{y}(t))] \\ \widehat{\dot{x}}_b(t) &= A_{bb}\widehat{x}_b(t) + [A_{ba}x_a + B_b u] + L([\dot{x}_a - A_{aa}x_a - B_a u] - [A_{ab}\widehat{x}_b(t)]) \\ \widehat{\dot{x}}_b(t) &= (A_{bb} - LA_{ab})\widehat{x}_b(t) + (A_{ba} - LA_{aa})x_a + (B_b - LB_a)u + L\dot{x}_a\end{aligned}$$

Una vez que se llega a esta expresión, se debe considerar que la salida, es decir y , está conformado solo por los estados medibles, lo cual es bastante aceptable dado que los parámetros físicos de interés suelen ser temperaturas, presiones, caudales, y son medidos directamente.

$$\dot{y} = [I \ 0] \begin{pmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{pmatrix}$$

Aplicamos esta expresión a la ecuación anterior.

$$\widehat{\dot{x}}_b(t) = (A_{bb} - LA_{ab})\widehat{x}_b(t) + (A_{ba} - LA_{aa})y + (B_b - LB_a)u + L\dot{y}$$

El error de la estimación reducida quedara definida por la diferencia entre el estado x_b no medible menos el $\widehat{x}_b(t)$ no medible estimado.

$$\begin{aligned} e_{xb} &= x_b - \widehat{x}_b(t) \\ \dot{e}_{xb} &= \dot{x}_b - \dot{\widehat{x}}_b(t) \\ \dot{e}_{xb} &= A_{bb}e_{xb} - LA_{ab}e_{xb} \\ \dot{e}_{xb} &= (A_{bb} - LA_{ab})e_{xb} \end{aligned}$$

Del sistema que se viene desarrollando, tenemos

$$A = \begin{pmatrix} 8 & 1 & 6 \\ 3 & 5 & 7 \\ 4 & 9 & 2 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; C = (1 \quad 0 \quad 0); D = 0$$

Se asumirá que el estado medible es x_1 por tanto

$$A_{aa} = 8, A_{ab} = [1 \quad 6], A_{ba} = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix}$$

$$A_{bb} = \begin{bmatrix} 5 & 7 \\ 9 & 2 \end{bmatrix}, B_a = 0, B_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Para determinar los valores del vector L, debemos asignar polos a la matriz de autovalores del error.

$$\begin{aligned} &\det(sI - (A_{bb} - LA_{ab})) \\ &\det \left[\begin{pmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 5 & 7 \\ 9 & 2 \end{bmatrix} + L * [1 \quad 6] \right] \\ &\det \left[\begin{pmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 5 & 7 \\ 9 & 2 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} * [1 \quad 6] \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s^2 + (-7 + l_1 + 6l_2)s + (-23l_2 + 52l_1 - 53) &= (s + 20) * (s + 25) \\ l_1 &= 380 \text{ y } l_2 = -12.2 \end{aligned}$$

Del sistema inicial se ha considerado que las variables no medibles son x_2 (azul) y x_3 (verde). Las condiciones iniciales del sistema a lazo abierto han sido colocadas en 40 y 30 respectivamente. Las condiciones iniciales para los estados estimados se han colocado en cero, dado que no se conocen estos valores. El estimador logra llevar el estado aproximado x_2 al valor de la variable real a los 0.055s, mientras que la tercera variable lo hace a los 0.04s. (Ver figura 49)

El estimador reducido ya no se ocupa de aproximar el estado de la variable uno dado que es un dato recogido directamente de un instrumento y no es necesario tratarlo matemáticamente. Esquema de estimador reducido en la figura 50.

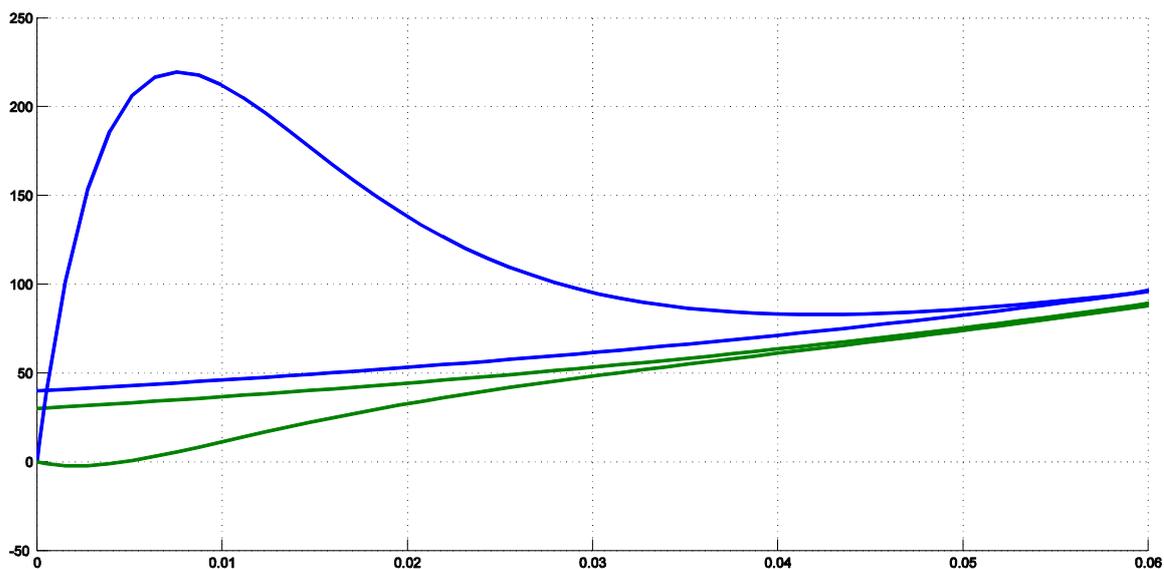


Figura 48- Comparación de los estados no medibles en estimador reducido vs estados reales
Fuente: Elaboración propia

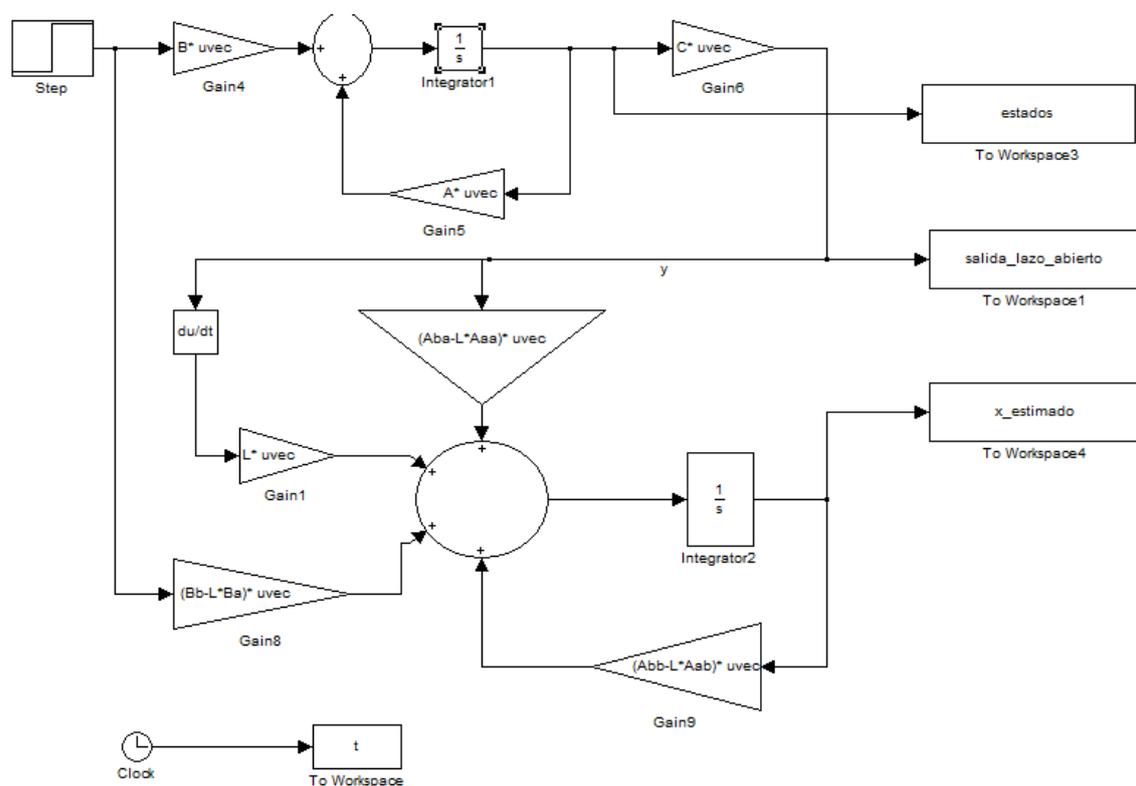


Figura 49- Diagrama de bloques utilizado para la simulación de estimador reducido

Conclusiones y Recomendaciones

Los tratamientos de calor poscosecha son fundamentales para la preservación de los alimentos, tanto para su ampliación de días de almacenaje como para evitar el ataque de plagas.

Es muy importante definir el tipo de tratamiento a cada fruta, diferenciado tipo de fruta y lugar de procedencia ya que un mismo producto puede ser atacado por plagas de zonas geográficamente separadas.

La capacidad térmica de cada fruta forma, tamaño implicara tratamientos térmicos diferentes, en cuanto a temperatura y tiempo de exposición.

La variación enzimática que sufre un producto tratado térmicamente debe mantenerse dentro de los parámetros fitosanitarios para que no sea un riesgo para el consumo humano.

Los tratamientos térmicos son muy perjudiciales si no se realizan de la forma adecuada, podrían llegar a generar pérdidas económicas enormes.

El nivel de seguridad que se debe aplicar a una mercancía de origen desconocido es el Probit-9, nivel más alto para eliminación de plagas.

Las exportaciones de mango son influenciadas por las condiciones ambientales de su cosecha y por tanto son vulnerables a fenómenos como el que ocurre en la región norte peruana.

El estudio de plagas de insectos capaces de atacar una plantación es muy importante como medida preventiva. El control de pesticidas en los cultivos es otro tema muy delicado de analizar.

Los tratamientos hidrotérmicos son un método eficiente para evitar y proteger a los mangos de un posible ataque de la mosca de la fruta.

Los protocolos de exportación tanto para Japón y Estados Unidos contemplan que la fruta haya pasado por los tiempos de mortandad mínimos que aseguren un nivel probit 9 para toda la mercancía.

La unificación de pruebas para una misma canastilla de mangos asegura que la mercancía pueda viajar a puertos americanos y japoneses ya que en un mismo tratamiento han cumplidos con ambos requisito de cada país

La construcción del tanque dual ha cumplido exitosamente los fines para los que se diseñó y las mejoras que se pronostican siguen siendo parte de futuros proyectos

La parte matemática de la identificación de los sub procesos que ocurren en un tratamiento térmico normal, han ayudado a la designación de parámetros PID para el control de temperatura, presentado muy buenos ahorros de vapor en cada ensayo.

La futura implementación de instrumentación para control avanzado, será un tema de estudios que seguirá mejorando la calidad y ahorro del proceso.

Recomendaciones finales y trabajos a futuro

Como trabajo a futuro está la implantación de las válvulas de vapor iso-porcentuales capaces de ofrecer un control avanzado al proceso de tratamiento hidrotérmico.

El análisis de la transferencia de calor máxima posible para aminorar los tiempos de cada tratamiento.

Evaluar la disposición de las jabas de mango en la canastilla con el fin de que el nuevo reordenamiento favorezca la transferencia de calor hacia cada fruto.

Implementar un sistema que renueve el agua que va dejando cada tratamiento, es decir crear un sistema de limpieza de agua para no perder tiempo en el recambio del líquido que suele durar entre 2 a 3 horas por tina y que además daña al mango por tener microsolidos en suspensión.

También se plantea como trabajo de investigación los métodos de protección contra corrosión de planchas del tanque. Un estudio de protección catódica para la conservación y buen estado del tanque dual.

Referencias Bibliográficas

- Castilla, L. T. (2010). Análisis económico del cambio climático en la agricultura de la región Piura- Perú. *Principales Productos Agroexportables*. Piura: CIES - Consorcio de investigación económica y social.
- Couey, H., & Hayes, C. (1986). *Quarantine procedure for Hawaiian papaya using fruit selection and a two-stage hot water immersion*. *Journal of Economic Entomology*.
- Española, Real Academia. (s.f.). Diccionario de la lengua española. Versión electrónica contenido de la 22.^a edición.
- Gazit, Y., Rossler, Y., Wang, S., & Tang, J. (2004). *Thermal death kinetics of egg and third-instar Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata**. *Journal of economic entomology*.
- González P. (2007). *Introducción al riego y drenaje*. Cuba: Instituto de investigaciones del riego y drenaje.
- Gutarra Castillo, P. (2016). *Modelación y control de un sistema de cuatro tanques acoplados*. Piura.
- Hansen, J. D. (1992). *heating curve models of quarantine treatments against insect pest*. *Journal of Economic Entomology* 85.
- Hansen, J., & Johnson, J. (2007). *Heat Treatments for postharvest pest control*. Cromwell Press.
- Hansen, J., Wang, S., & Tang, J. (2004). Acumulated lethal time model to evaluate efficacy of heat treatments for codling moth *Cydia pomonella* in cherries.
- Hernández, M. R. (2013). Comparación de diferentes métodos para el tratamiento de vinazas de la industria de etanol utilizando LCA. *Seminario Internacional sobre energías renovables*. Argentina.
- Israelsen, O. (1981). *Irrigation Principles and Practices (4^a ed)*. EE.UU.: Jhon Wiley & Sons Inc.
- Lurie, S. (1998). Postharvest heat treatments. En *Postharvest Biology and Technology* (págs. 257-269).
- McLaren, G., Fraser, J., & McDonald, R. (1997). *The feasibility of hot water desinfestations of summerfruit*. Proceedings of the New Zealand Plant Protection Conference.
- Miller, W., McDonald, R., & Sharp, J. (1991). *Quality changes during storage and ripening of "Tommy Atkins" mangoes treated with heated forced air*. HortScience.
- Mitcham, E., & McDonald, R. (1993). *Respiration rate, internal atmosphere, and ethanol and acetaldehyde accumulation in heat treated mango fruit*. *Postharvest Biology and Technology* 3.
- Mohsenin, N. (1980). *Thermal Properties of food and other agricultural materials*. New York: Gordon and Breach Science Publishers.
- Neven, L. (1998). Respiratory response of fifth-instar codling moth to rapidly changing temperatures. *Journal of Economic Entomology*.
- Oquelis Cabredo, J. E. (1997). *Metodología para la integración de sistemas heterogéneos de comunicaciones de campo en entornos industriales*. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de las Palmas de Gran Canaria E.T.S.I. Telecomunicaciones.
- Prusky, D., Fuchs, Y., Kobilier, I., Roth, I., Weksler, A., Shalom, Y., . . . Artes, L. (1999). *Effect of hot water brushing, prochloraz treatment and waxing on the incidence of black spot decay caused by *Alternaria alternata* in mango fruits*. *Postharvest Biology and technology*.
- Sharp, J. (1986). *Hot-water treatment for control of *Anastrepha suspense* (Diptera: Tephritidae) in mangoes*. *Journal of Economic Entomology*.

- Sharp, J., & Hallman, G. (1994). *Hot water immersion. Quarantine treatments for Pest of Food Plants*. Colorado: Westview Press, Boulder.
- Sharp, J., & Picho-Martinez, H. (1990). *Hot-water quarantine treatment to control fruit flies in mangoes imported into the USA from Peru*. *Journal of Economic Entomology*.
- Sharp, J., Ouye, M., Hart, W., Ingle, S., & Chew, V. (1989). *Immersion of Florida mangoes in hot water as a quarantine treatment for Caribbean fruit fly (Diptera: Tephritidae)*. *Journal of economic Entomology*.
- Sharp, J., Ouye, M., Ingle, S., & Hart, W. (1989). *Hot-water quarantine treatment for mangoes from Mexico infested with Mexican fruit fly and West Indian fruit fly (Diptera: Tephritidae)*. *Journal of Economic Entomology*.
- Sharp, J., Ouye, M., Ingle, S., Hart, W., Enkerlin, H., Celedonio, H., . . . Schwarz, A. (1989). *Hot-water quarantine treatment for mangoes from the state of Chiapas, Mexico, infested with Mediterranean fruit fly and Anastrepha serpentine (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae)*. *Journal of Economic Entomology*.
- Sharp, J., Ouye, M., Thalman, R., Hart, W., Ingle, S., & Chew, V. (1988). *Submersion of 'Francis' mango in hot water as a quarantine treatment for the West Indian fruit fly and the Caribbean fruit fly (Diptera: Tephritidae) in mangoes*. *Journal of Economic Entomology*.
- Tang, J., & Wang, S. (2007). *Fundamental Heat Transfer Theory for Thermal Treatments*. En *Heat Treatments for Postharvest Pest Control* (págs. 27-51). Washington State.
- USA Department of Agriculture. (2005). *USDA-Animal and Plant Health Inspection Service-Plan Protection and Quarantine Manual: Regulating the Importation of Fresh Fruit and Vegetables*. Maryland.
- Zhou, S., Criddle, R., & Mitcham, E. (2000). *Metabolic response of Platynota stultana pupae to controlled atmospheres and its relation to insect mortality response*. *Journal of Insect Physiology* 46.