



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de modelación matemática y diseño de
estrategia de control avanzado para túnel de enfriamiento
empleado en el sector de conservación de productos
agroindustriales**

Tesis para optar el Grado de
Máster en Ingeniería Mecánico -Eléctrica con mención en Sistemas Energéticos y
Mantenimiento

Iván Ramírez Vega

**Asesor(es):
Mgr. Ing. José José Manrique Silupú**

Piura, septiembre de 2019





*Gracias a mi familia y
compañeros de la universidad*



Resumen Analítico-Informativo

Desarrollo de modelación matemática y diseño de estrategia de control avanzado para túnel de enfriamiento empleado en el sector de conservación de productos agroindustriales

Iván Ramírez Vega

Asesor(es): Mgtr. Ing. José José Manrique Silupú

Tesis.

Máster en Ingeniería Mecánico -Eléctrica con mención en Sistemas Energéticos y Mantenimiento

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Setiembre de 2019

Palabras claves: control predictivo, agroindustria, mango, GPC, PID, ON OFF

Introducción: Los sistemas de refrigeración industrial para enfriamiento y conservación de frutas en el sector Agroexportador, utilizan tecnología tradicional simple para su funcionamiento (encendido/apagado), lo que conlleva a un alto consumo de energía eléctrica. Según datos recogidos en las empresas, este costo oscila entre el 40% y 50% del consumo total eléctrico. Añadido a esto, se carece de un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros más importantes. La ingeniería y, la academia están dedicando esfuerzos para poder abordar el problema mencionado anteriormente. Es así, que el estudio e implementación de un sistema de control automático, se presenta como una alternativa para ello.

Metodología: Se han realizado experimentos de recolección de datos, para conocer el proceso, es así que se ha diseñado señales tipo escalón y de tipo PRBS (Ruido Binario Pseudo Aleatorio), para la señal de la frecuencia del compresor. Por otro lado se ha recogido como señal de salida, la Temperatura del aire en la planta piloto. Dicha información ha sido procesada en el software MATLAB, para la obtención del modelo matemático

Resultados: Los resultados del modelo matemático han sido validados con la data de funcionamiento de la planta piloto, cuyo resultado fue favorable. En base a esto se ha diseñado tres tipos de estrategias de control: el controlador tradicional ON/OFF; el controlador Proporcional, Integral y Derivativo PID y, el controlador Predictivo Basado en Modelo GPC.

Conclusiones: Los diseños de control han sido aplicados y analizados en el modelo matemático obtenido; de las técnicas de control mencionadas, la de mejor prestaciones es la estrategia de control basado en modelo GPC, con tiempo de establecimiento conveniente y oscilaciones mínimas. Se espera, con este estudio incentivar la investigación por la familia de controladores predictivos basados en modelos y, pueda motivar la implementación de estos reguladores en la planta piloto de enfriamiento que se tiene en la Universidad de Piura.

Fecha de elaboración del resumen: 13 de agosto de 2019

Analytical-Informative Summary

Desarrollo de modelación matemática y diseño de estrategia de control avanzado para túnel de enfriamiento empleado en el sector de conservación de productos agroindustriales

Iván Ramírez Vega

Advisor: Mgtr. Eng. José José Manrique Silupú

Thesis

Máster en Ingeniería Mecánico -Eléctrica con mención en Sistemas Energéticos y Mantenimiento

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, September 2019

Keywords: predictive control, agroindustry, mango, GPC, PID, ON-OFF

Introduction The industrial refrigeration systems for cooling and preserving fruit in the Agro-export sector use simple traditional technology for their operation (on/off), which leads to a high consumption of electricity. According to data collected in the companies, this cost oscillates between 40% and 50% of the total electrical consumption. Added to this, it lacks a real-time monitoring system of the most important parameters. Engineering and academia are devoting efforts to address the problem mentioned above. Thus, the study and implementation of an automatic control system is presented as an alternative.

Methodology: Data collection experiments have been carried out in order to know the process. Thus, step type and PRBS (Pseudo Random Binary Noise) signals have been designed for the compressor frequency signal. On the other hand, the air temperature in the pilot plant has been collected as an output signal. This information has been processed in the MATLAB software to obtain the mathematical model.

Results: The results of the mathematical model have been validated with the operating data of the pilot plant, whose result was favorable. Based on this, three types of control strategies have been designed: the traditional ON/OFF controller; the Proportional, Integral and Derivative PID controller; and the Predictive Controller Based on GPC Model.

Conclusions The control designs have been applied and analyzed in the mathematical model obtained; of the control techniques mentioned, the one with the best performance is the control strategy based on the GPC model, with convenient establishment time and minimum oscillations. It is hoped that this study will encourage research into the family of predictive controllers based on models and may motivate the implementation of these regulators in the pilot cooling plant at the University of Piura.

Summary date: August 13th, 2019

Prefacio

La exportación de productos agrícolas en el Perú está creciendo notablemente, por lo que se hace meritorio prestarle importancia a su cadena de producción, debido a su impacto positivo en la economía, porque beneficia a la población a través de asociaciones y, también en el ámbito empresarial. Dentro de este panorama, es muy importante tener en cuenta el proceso de frío que se le otorga a los productos en el sector agroexportación.

Es la literatura científica quien ha demostrado que un adecuado enfriamiento y conservación de las productos de los cultivos (una vez cosechados), genera mayor tiempo de vida al producto, permitiendo llegar en buenas condiciones fitosanitarias a lugares más lejanos.

Actualmente, nuevas investigaciones colaboran con el perfeccionamiento de los sistemas de refrigeración industrial, es por ello que el uso de estrategias de Control Avanzado, para sistemas de frío tiene mucho realce. El Ciclo de refrigeración más utilizado en la Industria, es el Ciclo por Compresión de Vapor. El Departamento de Electrónica y Automática de la Universidad de Piura, cuenta con una planta piloto de enfriamiento, para una capacidad de dos toneladas. Su control basado en un adecuado modelo de identificación, se presenta en este estudio.

La investigación desarrollada, tiene como propósito servir como soporte para futuros trabajos de implementación de un sistema de Control Avanzado tipo Control Predictivo Basado en Modelos., que mejore el funcionamiento del sistema de refrigeración.

De esta forma, se presenta la modelación matemática obtenida por Identificación, esta data ha sido obtenida a partir de datos reales de enfriamiento en la Planta Piloto de UDEP (Campus Piura), cabe mencionar que se ha trabajado con mango. El modelo obtenido ha sido luego empleado para el diseño de tres tipos de reguladores: Control ON/OFF, Control PID y Control Predictivo GPC. La comparación de estos controladores, muestra las bondades del Control Predictivo.

Este trabajo ha sido realizado gracias al Proyecto “Control Avanzado para mejorar uso de consumo energético en sistemas de refrigeración”, Contrato 005-2016, el cual ha sido financiado por el FONDECYT-PERU.



Tabla de contenido

Capítulo 1 Agroexportación	3
1. Agroexportación en Perú	3
2. Agroexportación en Piura	6
3. Producto seleccionado: Mango.....	8
Capítulo 2 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor	11
1. Ciclo de Carnot	11
2. Ciclo ideal simple de refrigeración por compresión de vapor	12
3. Ciclo real simple de refrigeración por compresión de vapor.....	14
4. Componentes principales de un sistema de refrigeración industrial.....	16
4.1. Compresor.....	16
4.1.1. Compresores alternativos.....	16
4.1.2. Compresores rotativos.....	16
4.2. Evaporador.....	17
4.3. Condensador.....	18
4.4. Dispositivos de expansión.....	18
5. Refrigerantes en la industria	18
6. Túnel de enfriamiento.....	20
6.1. Tipos de túnel de enfriamiento.....	20
6.1.1. Túnel Californiano.....	20
6.1.2. Túnel Vertical.....	21
Capítulo 3 Planta Piloto de Túnel de Enfriamiento	23
1. Ubicación de la planta piloto	23
2. Distribución y dimensiones	23
3. Sistema de Refrigeración.....	25
3.1. Túnel de enfriamiento.....	25

3.2. Zona exterior.....	25
3.3. Sala de control.	27
4. Tipos de señales y comunicación	27
4.1. <i>Software SCADA LabView.</i>	28
4.2. <i>Software ECOSTAR</i>	29
4.3. <i>Software LODAM MULTITOOL LMT 100</i>	30
4.4. <i>Software SITRAD</i>	33
Capítulo 4 Identificación y Aplicación de Control Avanzado.....	35
1. Identificación de planta de refrigeración	35
1.1. Experimento: Prueba PRBS con carga.....	35
1.1. Ajuste y error.....	39
2. Diseño del control avanzado: Generalized Predictive Control (GPC)	40
2.1. Teoría de control avanzado: Control GPC.	40
2.2. Discretización.....	41
2.3. Cálculo del modelo CARIMA del sistema de refrigeración.....	43
2.4. Implementación del modelo en <i>SIMULINK</i>	43
2.5. Implementación de Controlador GPC.	44
3. Control ON OFF.....	45
4. Control PID.....	47
4.1. Controlador PID con desacople de parte derivativa.....	49
4.2. Sintonización de controlador PI.	50
4.3. Simulación de control PID.	51
5. Análisis de los controladores	51
Conclusiones	53
Referencias.....	55

Lista de figuras

Figura 1. Agroexportación de costa peruana. 4

Figura 2. Comportamiento de dólares FOB de la agroexportación peruana 4

Figura 3. Precio promedio de clientes comercial e industrial 6

Figura 4. Evolución de las exportaciones en la Región Piura 6

Figura 5. Superficie cosechada (ha) en Piura 7

Figura 6. Exportación de mango en Perú 9

Figura 7. Diagrama P-V de un ciclo de Carnot 11

Figura 8. Esquema de un refrigerador de Carnot y diagrama T-s del ciclo invertido de Carnot. 12

Figura 9. Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor. 13

Figura 10. Diagrama P-h de un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.. 14

Figura 11. Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor y diagrama T-s 15

Figura 12. Compresor alternativo. 16

Figura 13. Compresor rotativo de tornillo 17

Figura 14. Evaporador de tubo con aletas..... 18

Figura 15. Túnel de enfriamiento 20

Figura 16. Túnel californiano 21

Figura 17. Túnel por lotes estilo vertical. 22

Figura 18. Planta piloto de túnel..... 23

Figura 19. Distribución de la planta de refrigeración. 24

Figura 20. Plano de planta piloto de túnel.. 24

Figura 21. Planteamiento de desarrollo de investigación. 25

Figura 22. Condensador Bitzer y Tablero de potencia. 26

Figura 23. PC y tablero de control. 27

Figura 24. Captura de pantalla Interfaz del Software SCADA 29

Figura 25. Ventana Inicial de la Interfaz Software ECOSTAR..... 30

Figura 26. Captura interfaz *software* LMT 31

Figura 27. Captura de la base de datos Software LMT 32

Figura 28. Data log software LMT.....	32
Figura 29. Captura de pantalla Interfaz <i>Software</i> SITRAD	33
Figura 30. Prueba PRBS.....	35
Figura 31. Interfaz de System Identification de MatLab.	36
Figura 32. Configuración seleccionada para la estimación.....	37
Figura 33. Ajuste de los modelos a la data del día 15 de enero	37
Figura 34. Comparación entre valores reales y simulados del modelo.....	39
Figura 35. Error entre valores reales y valores medidos.....	39
Figura 36. Evaluación de residuos	40
Figura 37. Respuesta ante entrada escalón unitario de los modelos en función de transferencia en continuo (azul) y discreto (rojo).....	42
Figura 38. Modelo en Simulink del sistema de Refrigeración.....	43
Figura 39. Diagrama de bloques del controlador GPC	44
Figura 40. Diagrama de bloques del control GPC	44
Figura 41. Respuesta del controlador GPC.....	45
Figura 42. Esquema del controlador on/off.....	46
Figura 43. Diagrama de bloques de Estrategia de Control ON OFF	46
Figura 44. Respuesta de controlador on off	47
Figura 45. Diagrama de bloques a lazo cerrado de un controlador.....	47
Figura 46. Diagrama de bloques del controlador PID en discreto	48
Figura 47. Implementación del Controlador PID al proceso.	48
Figura 48. Diagrama de bloques a lazo cerrado de un control PID con desacople de parte derivativa.....	49
Figura 49. Respuesta del controlador PID	51
Figura 50. Respuestas de los controladores	52

Lista de tablas

Tabla 1. Características de la variedad de mango.....	9
Tabla 2. Tabla de seguridad de los refrigerantes	19





Introducción

Los sistemas de refrigeración industrial para enfriamiento y conservación de frutas en el sector Agroexportador, utilizan tecnología tradicional simple para su funcionamiento (encendido/apagado), lo que conlleva a un alto consumo de energía eléctrica. Según datos recogidos en las empresas, este costo oscila entre el 40% y 50% del consumo total eléctrico. Añadido a esto, se carece de un sistema de monitoreo en tiempo real de los parámetros más importantes.

La ingeniería y, la academia están dedicando esfuerzos para poder abordar el problema mencionado anteriormente. Es así, que el estudio e implementación de un sistema de control automático, se presenta como una alternativa para ello. Dentro de las metodologías de Control Avanzado, la familia de Controladores Predictivo Basado en Modelos, está teniendo una buena acogida, tanto en Modelos lineales como Modelos No Lineales (que es el caso del proceso de refrigeración).

La finalidad de la estrategia de control, es regular la temperatura del aire en la planta piloto y, esto como consecuencia llevará a un mejor control de la temperatura en la fruta. La variable manipulable es la frecuencia que utiliza el compresor, un buen manejo de este parámetro, me va a permitir disminuir costos en el consumo del sistema.

El trabajo se ha desarrollado en cuatro capítulos: el capítulo uno presenta la situación del sector agroexportador en el país, su evolución y la importancia en la economía del Perú. El capítulo dos muestra el funcionamiento de los sistemas de refrigeración, sus componentes, las características del ciclo de compresión por vapor y, como es la forma de trabajo en las empresas. El capítulo tres describe la planta piloto construida en la Universidad de Piura (Campus Piura), con capacidad para dos toneladas de fruta, en la cual se ha realizado el experimento por identificación para la obtención del modelo. El capítulo cuatro presenta el modelo obtenido, el diseño de los tres reguladores, la implementación en el modelo y el análisis de los resultados.

La plataforma de desarrollo del ambiente de simulación en el que se ha trabajado, es el SIMULINK-MATLAB, este software es bastante utilizado en la simulación de procesos, por sus buenas prestaciones



Capítulo 1

Agroexportación

1. Agroexportación en Perú

La agroexportación en el Perú, es un sector que está en crecimiento y que genera un aporte importante a la economía de éste país; trayendo consigo más empleo. Haciendo un poco de historia, es así, es a partir de la mitad de los noventa, el Perú inicia la diversificación de cultivos tales como el espárrago, páprika, mango, uva, pimientos, alcachofa, cebolla, tara, entre otros. Esto beneficios en el Perú, gracias a la estacionalidad y costos operacionales [13].

El hecho más importante se dio en el gobierno del Sr. Fujimori, con la aprobación de la Ley N° 273601: Ley de Promoción del Sector Agrario, que brinda incentivos fiscales para los productores y flexibilización del régimen laboral [14], y así se inicia el Boom Agroexportador Peruano, tal como lo afirma la Asociación de Agroexportadores- (ADEX).

En el 2015, el ministro de la Producción, Piero Ghezzi declaró: “Aproximadamente en 5 años, el Perú puede convertirse en la primera potencia agroexportadora mundial, dado el inmenso potencial que tiene esta actividad” [1]. Sin lugar a dudas, no se ha equivocado porque en el Perú su tasa de crecimiento agrícola se mantiene en ascenso, y según se estima, seguirá en la próxima década [2].

Según información brindada en el artículo de donde se extrajo la cita previa, el sector Agroexportación crece en una tasa promedio anual de 19%, lo que se traduce en un incremento importante. Además, las condiciones de agua, clima, sol, suelo que el Perú posee, pueden convertir a la Agroexportación en uno de los nuevos motores de la economía, asegurando el crecimiento a largo plazo.

En la **Figura 1** se puede observar a los departamentos de la costa Peruana con sus productos de exportación.

Económicamente, es decir en dólares FOB, se observa que las exportaciones del sector agropecuario han experimentado un crecimiento desde el año 1994 hasta el 2014 (**Figura 2**); solo con una muy leve caída el año 2009 debido a la crisis económica mundial que se agudizó por ese año.

PRINCIPALES PRODUCTOS DE EXPORTACION DE LA COSTA PERUANA		
N°	DEPARTAMENTO	NOMBRE DEL PRODUCTO
1	Tumbes	Banano orgánico
2	Piura	Mango, Limón, Banano orgánico, algodón pima y algarrobo.
3	Lambayeque	Limón y derivados, Frijoles (frijol castilla, canario, Zarandaja, frijol de palo en conserva y congelado). Ajies (jalapeño, tabasco), pimiento piquillo.
4	La Libertad	Palta, alcachofa, páprika, azúcar, espárrago, uvas, pimiento piquillo.
5	Ancash	Mango, flores (Ghysophyllia), alcachofas, palta, kiwicha, espárrago, páprika
6	Lima	Palta, uva, maiz morado, camote, lechugas, tangelo, mandarina, espárragos, páprika, pimiento piquillo.
7	Ica	Algodón tanguis, pallar, pasta de tomate, higo, melones, sandia, tangelo, mandarina, palta, alcachofa, espárrago, páprika, pimiento piquillo, cebolla amarilla.
8	Arequipa	Olivo (aceituna), cebolla, ajos, páprika, melón, sandia.
9	Moquegua	Palta, vainita fresca, uva pisquera.
10	Tacna	Olivo (aceituna), orégano, zapallo, cochinilla. Sandia.

Figura 1. Agroexportación de costa peruana [12].

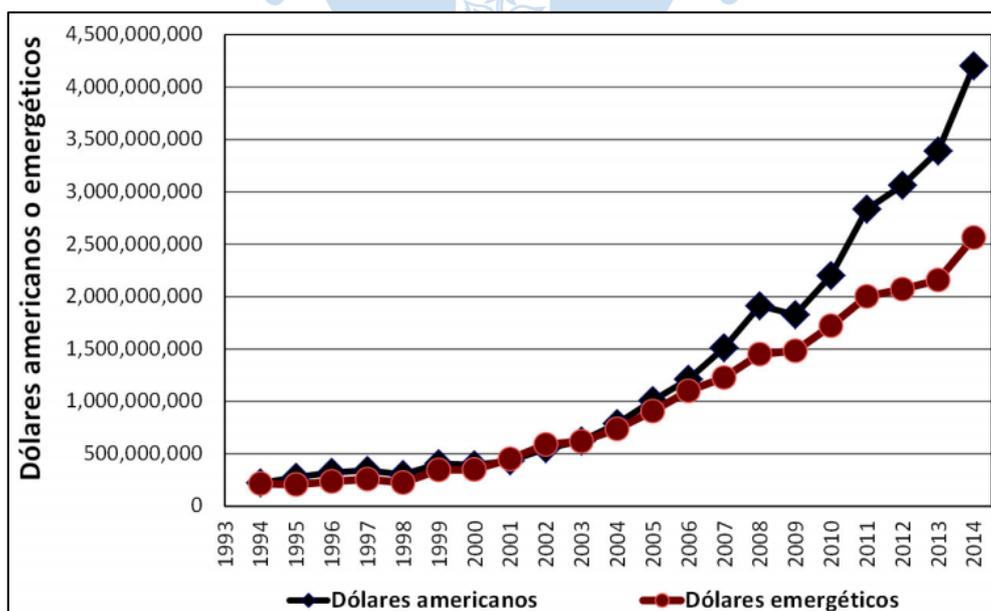


Figura 2. Comportamiento de dólares FOB de la agroexportación peruana [11]

En información más reciente se tiene, que las agroexportaciones peruanas avanzaron positivamente entre enero y noviembre 2018, registrando un crecimiento de 14% (US\$ 5,748 millones) comparado con el mismo periodo durante el año 2017 (US\$ 5,063 millones).

Según la Asociación de Gremios Productores Agrarios del Perú (AGAP), este incremento ha sido impulsado principalmente por las exportaciones de frutas y hortalizas (F&H) frescas, que registraron un crecimiento de 18%, comparado con el mismo periodo durante el 2017.

Dentro del subsector frutas, la palta Hass fue el producto que lideró la oferta exportable con US\$ 722 millones (+25%), luego aparecen la uva con US\$ 468 millones (+19%), el arándano con US\$ 448 millones (+41%), el mango con US\$ 209 millones (+41%) y el banano orgánico con US\$ 150 millones (+11%) [10].

Estados Unidos fue el país que más agroexportaciones peruanas recibió con US\$ 989 millones, seguido por Países Bajos con US\$ 694 millones, Reino Unido con US\$ 247 millones, España US\$ 197 millones y China con US\$ 94 millones.

En la comercialización de alimentos y en especial en la agroexportación, los productos sufren una serie de procesos desde la cosecha hasta su arribo al lugar de comercialización. Estos involucran etapas de empaque y transporte, enfriamiento y mantención, transporte con mantención y comercialización. De manera general, en estas etapas resalta el garantizar la calidad del producto lo cual se realiza a través de una cadena de frío. Con este mecanismo se busca preservar el alimento, por un lado, la disminución metabólica que experimenta la fruta a bajas temperaturas y por otro el aletargamiento que se produce en los microorganismos presentes en la fruta bajo condiciones de frío.

En consecuencia, es de vital importancia la primera etapa de la cadena de frío, es decir el enfriamiento rápido o pre-frío. Esta etapa, como su nombre lo indica, consiste en una disminución idealmente rápida de la temperatura (hasta 0°C) de la fruta. Existen diversas formas de enfriar la fruta cumpliendo estas condiciones, pero la más usada es el enfriamiento por aire forzado.

Durante el proceso de conservación de los alimentos, estos normalmente pasan por 2 etapas: enfriamiento, que se lleva a cabo en el túnel de enfriamiento y tiene por función reducir la temperatura ambiente a una temperatura de frío adecuada; posteriormente, viene la etapa de conservación, donde los productos son mantenidos a la temperatura de frío alcanzada en la etapa previa.

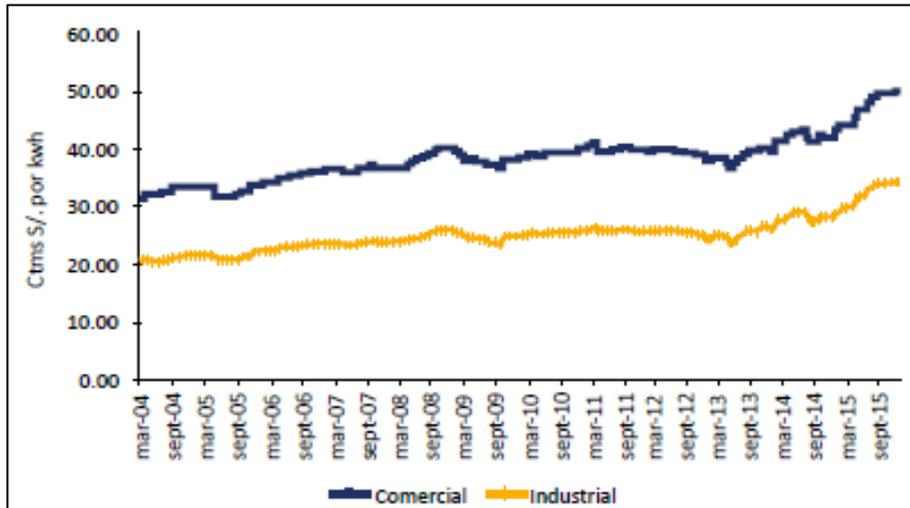


Figura 3. Precio promedio de clientes comercial e industrial [3].

Vale la pena mencionar que la cadena de frío en las agroexportadoras, representa al 40% del gasto total de energía eléctrica en la empresa. Por otro lado, el costo del consumo eléctrico también ha ido en aumento, los costos promedios que asumen los clientes comerciales e industriales, se han incrementado de 31.5 y 20.65 ctms S/. Por kWh en marzo de 2004 a 49.9 y 34.3 en diciembre de 2015 (**Figura 3**).

2. Agroexportación en Piura

Dentro del crecimiento del sector agroindustrial se encuentra Piura, siendo una de las regiones agroindustriales que más ha crecido en este sector.

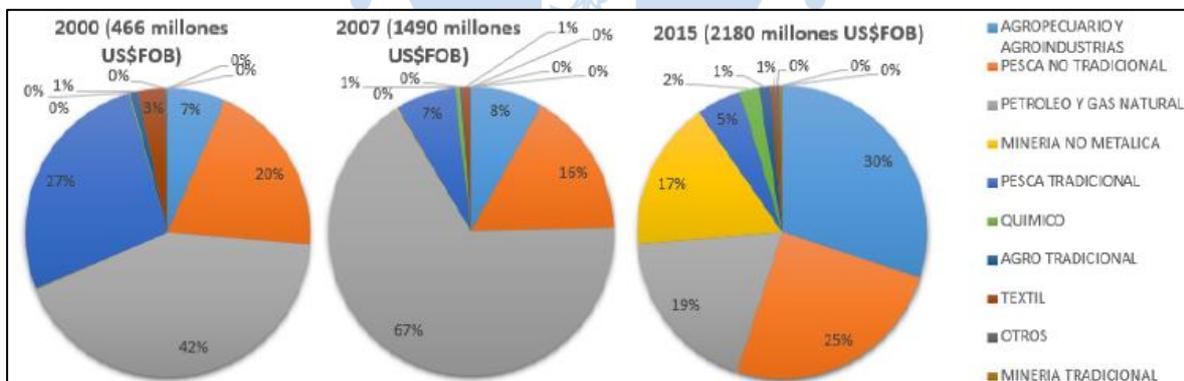


Figura 4. Evolución de las exportaciones en la Región Piura [16].

Es así como la Asociación de Exportadores (ADEX) destaca que a diferencia de las exportaciones nacionales, Piura experimentó un crecimiento de 67% entre el 2010 y el 2014 [17]. Las exportaciones de la región Piura (**Figura 4**) hasta el 2014 han logrado una diversificación tal que se han convertido en un modelo a seguir para el resto del país (Eduardo Amorrortu, presidente de ADEX).

Los productos más representativos de esta zona, junto al mango, plátano, limón, arroz. La superficie cosechada de cada sembrío se puede ver a continuación, en la **Figura 5**.

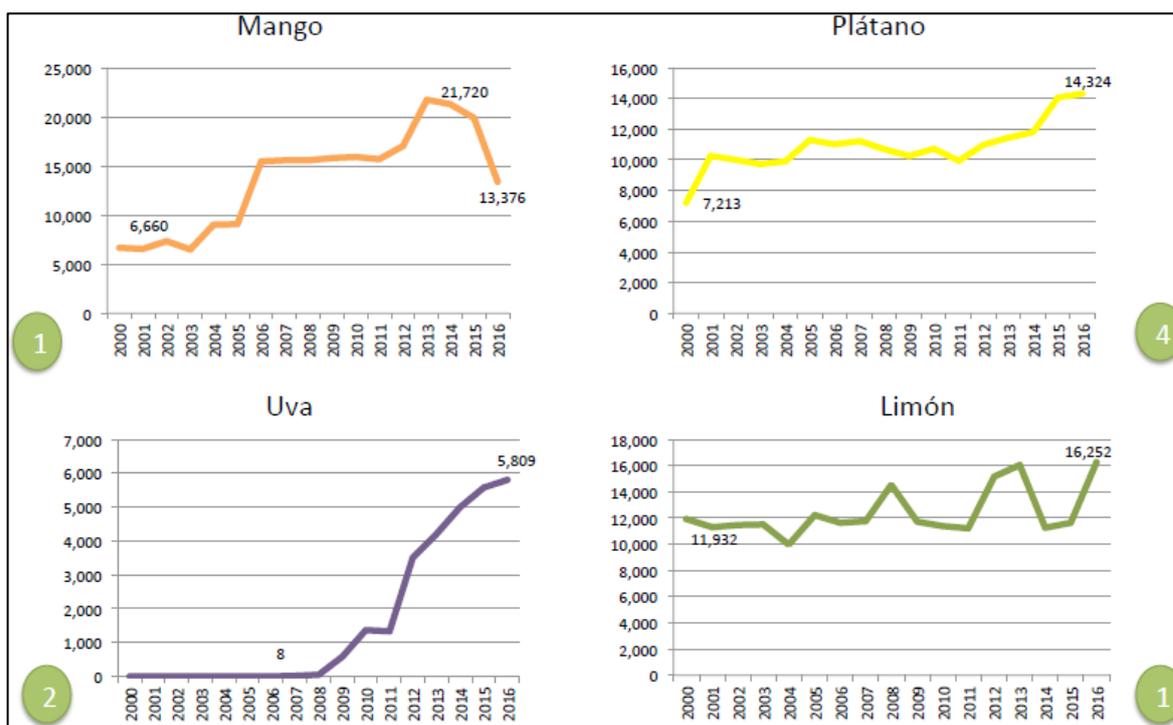


Figura 5. Superficie cosechada (ha) en Piura [16].

Para el año 2015, según la información de ADEX, las exportaciones de Piura sumaron US\$ 2,166 millones en el 2015, que representa una caída de 27% respecto del resultado del 2014 en que se logró exportar US\$ 2,968 millones.

La Región Piura tiene en su sector no tradicional al mayor impulso exportador, y logró resultados positivos con un crecimiento de 14.6%, con un monto exportado de US\$ 650 millones, gracias al incremento de la demanda en el exterior de los mangos y plátanos de la región. La minería no metálica, también logró crecer en 9.6% en el 2015, influenciado por las mayores ventas de fosfatos [17]. En el agro no tradicional destacaron las uvas frescas, los mangos y los plátanos frescos. El número de agroexportadoras piuranas se ha ido incrementando del 2014 al 2015 en 28 compañías.

En Piura, en el periodo 2004-2014, la pobreza se redujo de 60% a 34%, casi 30 puntos porcentuales; y según la consultora Arellano Marketing sostiene que la clase media en Piura representa el 34% de la población. Este periodo de tiempo coincide con el despertar de la agroexportación según [18]. Por otro lado, Piura también representa el 13% del total de las agroexportaciones del país; superada solo por Ica, con más del 20%.

Según el BCR, se estima que en la Región Piura el sueldo promedio de un trabajador calificado en el agro moderno es mayor a la remuneración mínima vital (S/. 750). Si se hace una comparación, en el 2007 el jornal de un trabajador en el agro era entre S/. 15 y S/. 22, y ahora varía entre S/. 35 y S/. 40.

La región Piura contribuye con el 5% del Producto Bruto Interno del país, y la agroexportación es una de sus principales actividades económicas, que se ha convertido en uno de los ejes de su impresionante desarrollo económico de los últimos diez años. Esta información la difundió el ministro de Agricultura de aquella época José Hernández.

Sin embargo, vale la pena mencionar, que se cuenta con un inconveniente para el máximo provecho de las tierras en Piura y, es, el estado de la represa Poechos. Esta construcción tiene una capacidad de almacenamiento de 800 millones de metros cúbicos de agua. Y permite irrigar a más de 60,000 hectáreas, pero por acumulación de sedimentos sólo trabaja a la mitad de su carga. Por esto es importante tener que los políticos de la región (gobernador, congresistas, etc.), puedan actuar, de lo contrario la agroexportación se vería amenazada. Según las autoridades locales, esta actividad de la represa costaría S/. 623 millones.

3. Producto seleccionado: Mango

El mango tiene gran recepción internacional debido a su buen sabor, atractiva coloración y por su aporte nutricional en vitaminas como la A y C. Por otro lado este cultivo es muy resistente a las lluvias.

Las exportaciones del mango orgánico se han ido incrementando a partir del año 2006, que coincide con los inicios de conversión de mango convencional a mango orgánico, lo que muestra un crecimiento de 218.856 kilogramos en el año 2006 a 1.825.325 kilogramos al 2011, tal como muestra a continuación.

El mango peruano se produce principalmente en la costa norte del Perú, con un total de 39.000 hectáreas sembradas (MINAGRI, 2013), en los departamentos de Piura, Lambayeque y La Libertad. Hay hasta tres variedades de exportación: Haden, Kent y Tommy Atkins. De acuerdo a PROMPERÚ (2015), son muchas las empresas exportadoras de mango, siendo las más importantes Sunshine Export (14%), Camposol (6%), Agrícola Mochica (5%) y Solís Cáceres (3%); siendo Piura el departamento destacado por el gran número de productores certificados.

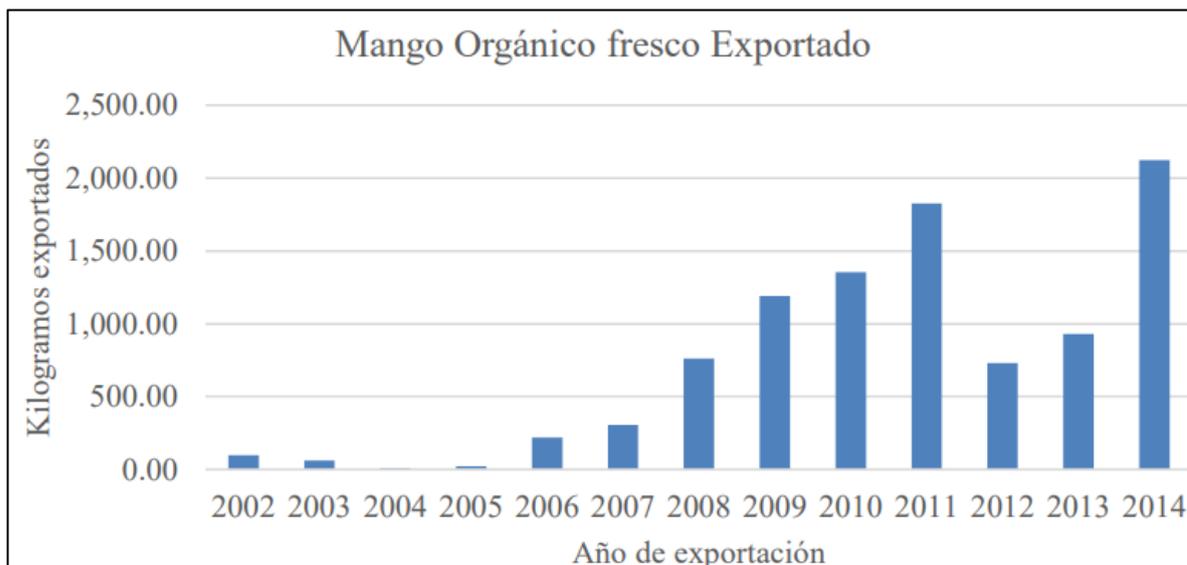


Figura 6. Exportación de mango en Perú [12].

Piura tiene a su cargo el 79% de la agroexportación total del mango en el Perú y tercer mayor exportador de mangos en el mundo. Las características y variedades se muestran a continuación:

Tabla 1. Características de la variedad de mango [19].

Variedad	Características		Periodo de cosecha
Kent	500-700 gr.	Color amarillo-naranja. Poco fibroso, excelente calidad y resistente en el traslado.	Diciembre-Febrero.
Haden	300-600 gr.	Color rojo-amarillo. Pulpa jugosa.	Diciembre-Febrero.
Criollo	180-220 gr.	Frutos pequeños, color amarillo, fibrosos, de pulpa dulce. Usados mayormente para extractos y concentrados.	Enero-Marzo.
Keitt	500 gr- 1kg	Color amarillo-naranja. Poco fibroso. Excelente calidad y resistente en el traslado.	Diciembre-Febrero.

La variedad Kent, tiene mejores prestaciones para el viaje, es muy idónea para el envío a China (vía aérea). Los valles donde se sitúan las variedades con fines de exportación son San Lorenzo, Chira, Medio Piura y Alto Piura, Lambayeque y Casma

El Gerente de la Asociación de Productores y Exportadores de Mango (APEM), Juan Carlos Rivera confirma que el 2018 hubo un buen desempeño en la campaña de mango, esto gracias al nivel de la floración tras el Fenómeno El Niño. Rivera explica que exporta en el mes de enero, es muy favorable porque Piura se encuentra sólo en el mercado internacional.

Posteriormente, cuando decrece la producción en Piura comienza en Lambayeque y, posteriormente, la producción de mangos se concentra en Casma. [20].

Las etapas de empaque son:

- Ingreso de la fruta a la Planta de *packing*.
- Clasificación de peso y calibre.
- Actividad de encerado, para disminuir la producción de etileno.
- Según el mercado de destino (Europa, Estados Unidos, Japón); se realiza el proceso de tratamiento hidrotérmico.
- Envasado en cajas, que a la vez formas pallets.
- Enfriamiento.
- Conservación.
- Despacho a contenedor.

Las condiciones de temperatura para evitar daño por frío y minimizar deshidratación son: temperatura óptima para almacenar mangos debe estar entre 12-14 °C para mangos verdes y 8-12 °C para mangos parcialmente maduros. La humedad relativa óptima oscila entre 85 a 95 % para todos los estados de madurez. Cuando la exposición de mangos es a temperaturas más bajas que las mencionadas ocasionan daño por frío que se vuelve más visible después de la transición de las frutas a temperaturas más altas [4]. Los síntomas del mango por golpe de frío son el pardeamiento en la cáscara con un gris, picado de la superficie, maduración dispareja, poco desarrollo de color y sabor.

Con el presente estudio se pretende estudiar estrategias de automatización con el objetivo de optimizar el consumo eléctrico en el sector agroexportación, mediante aplicación de control avanzado en el sistema de refrigeración, utilizado en el enfriamiento de uno de los productos más representativos de la región, como es el mango de exportación.

Capítulo 2

Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

1. Ciclo de Carnot

En la literatura [5], a las máquinas térmicas se les identifica como mecanismos que funcionan en un ciclo y su fluido de trabajo vuelve a su estado inicial al finalizar el ciclo.

Dentro de un ciclo se hace trabajo sobre el fluido y el fluido realiza un trabajo, y la diferencia entre los dos es el trabajo neto que entrega la máquina térmica. La eficiencia del ciclo se puede optimizar si es que los procesos requieren la menor cantidad de trabajo y entregan lo más posible; en otras palabras, si es que son procesos reversibles.

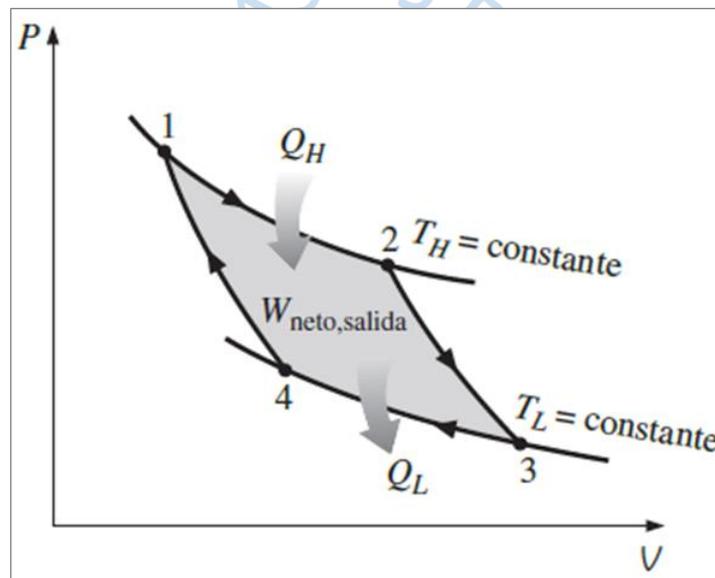


Figura 7. Diagrama P-V de un ciclo de Carnot [5].

Uno de los ciclos reversibles más conocidos es el ciclo de Carnot. El ciclo en el cual opera la máquina térmica teórica de Carnot (proceso en el cual el sistema no intercambia calor con los alrededores), se compone de cuatro procesos reversibles: dos isotérmicos y dos adiabáticos. Este ciclo puede llevarse a cabo en un sistema cerrado o de flujo estacionario.

Los cuatro procesos reversibles del ciclo de Carnot, extraídos de [5] son:

- Expansión isotérmica reversible (1-2)
- Expansión adiabática reversible (2-3)
- Compresión isotérmica reversible (3-4)
- Compresión adiabática reversible (4-1)

Dado que es un ciclo reversible, los procesos que comprenden el ciclo de Carnot pueden invertirse dando como resultado el ciclo invertido de Carnot. Un refrigerador que trabaja con el ciclo invertido de Carnot es definido como un refrigerador de Carnot, cuyo diagrama térmico se puede observar en la **Figura 8**.

El coeficiente de desempeño (COP) de un refrigerador de Carnot se define de la siguiente manera:

$$COP_{R,Carnot} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

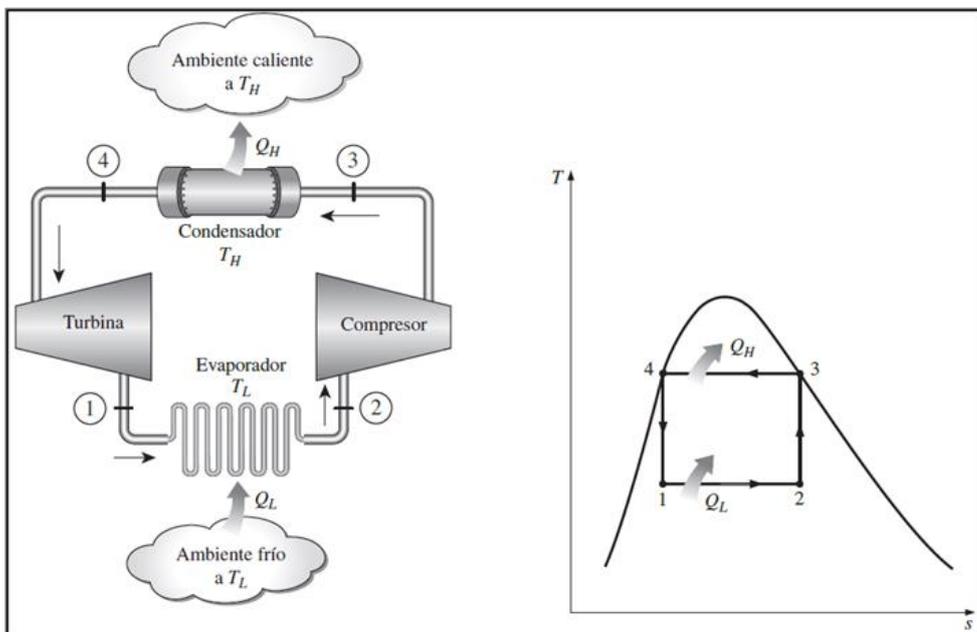


Figura 8. Esquema de un refrigerador de Carnot y diagrama T-s del ciclo invertido de Carnot [5].

2. Ciclo ideal simple de refrigeración por compresión de vapor

Este ciclo resulta luego de ejecutar las siguientes modificaciones a la **Figura 8**: evaporar el refrigerante por completo antes de que sea comprimido y reemplazar la turbina con una válvula de expansión. Los procesos que componen este ciclo son:

- Compresión isentrópica
- Rechazo de calor a presión constante (condensador)
- Expansión (válvula de expansión)
- Absorción de calor a presión constante (evaporador)

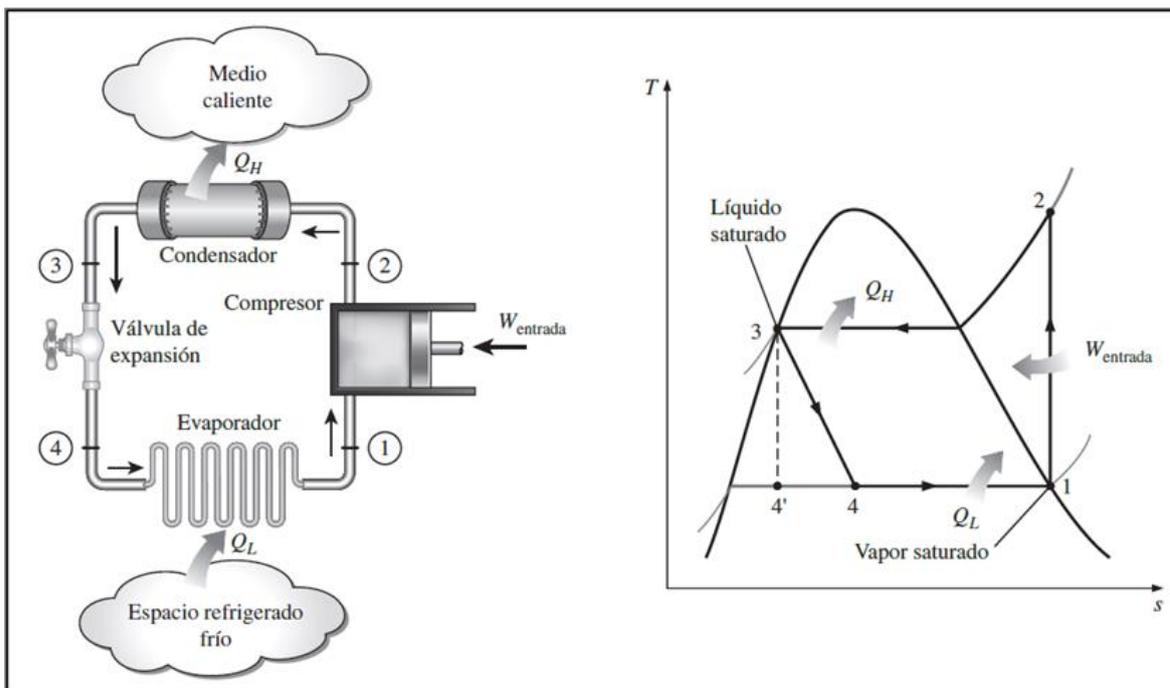


Figura 9. Esquema y diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor [5].

En el ciclo ideal, el refrigerante ingresa al compresor como vapor saturado y se comprime isentrópicamente hasta la presión del condensador, la temperatura del refrigerante aumenta durante el proceso de compresión isentrópica hasta un valor mayor que el de la temperatura del ambiente circundante.

El refrigerante entra al condensador como vapor sobrecalentado y sale como líquido saturado como resultado del rechazo de calor hacia los alrededores; la temperatura del refrigerante en el estado de líquido saturado se mantendrá por encima de la temperatura de los alrededores.

El refrigerante líquido saturado se estrangula hasta la presión del evaporador al pasarlo por una válvula de expansión (tubo capilar); la temperatura del refrigerante disminuye por debajo de la temperatura del espacio refrigerado durante el proceso. El refrigerante entra al evaporador como un vapor húmedo de baja calidad y se evapora por completo al absorber calor del espacio refrigerado. El refrigerante sale del evaporador como vapor saturado y vuelve a entrar al compresor. El diagrama P-h se muestra a continuación:

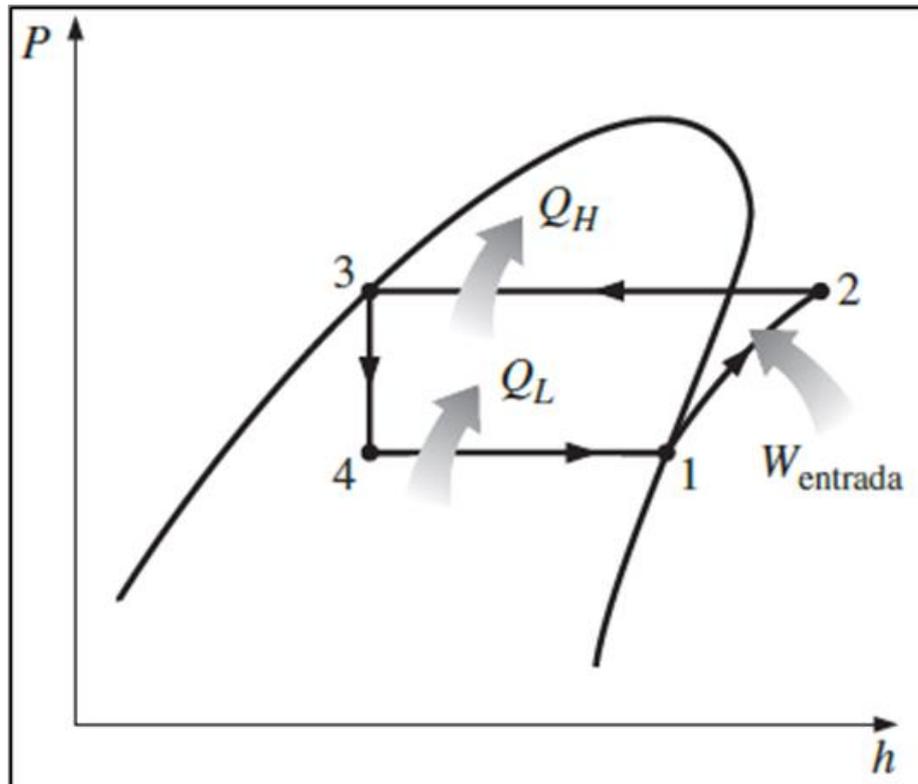


Figura 10. Diagrama P-h de un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor [5].

El condensador y el evaporador no implican ningún trabajo y el compresor puede asumirse como adiabático. Por lo tanto, el coeficiente de desempeño del refrigerador que operan en el ciclo ideal se define de la siguiente manera:

$$COP = \frac{q_L}{w_{neto,entrada}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

3. Ciclo real simple de refrigeración por compresión de vapor

Una diferencia entre el ciclo real y el ideal es la irreversibilidad que se presenta en varios componentes, como por ejemplo la fricción del fluido, que causa caídas de presión y, la transferencia de calor hacia o desde su entorno.

En el ciclo ideal, se asumió vapor saturado para el refrigerante al salir del evaporador, sin embargo, realmente no es posible controlar el estado del refrigerante con tanta precisión. Por ello, se diseña un sistema para sobrecalentar ligeramente al refrigerante en la entrada del compresor, y asegurar que el fluido de trabajo se evapore totalmente cuando entra al compresor. Por otro lado, en la realidad existen caídas de presiones significativas entre el condensador y el evaporador ocasionado por la fricción del fluido y la transferencia de calor entre el refrigerante y los alrededores durante su recorrido por la línea, la cual suele ser larga.

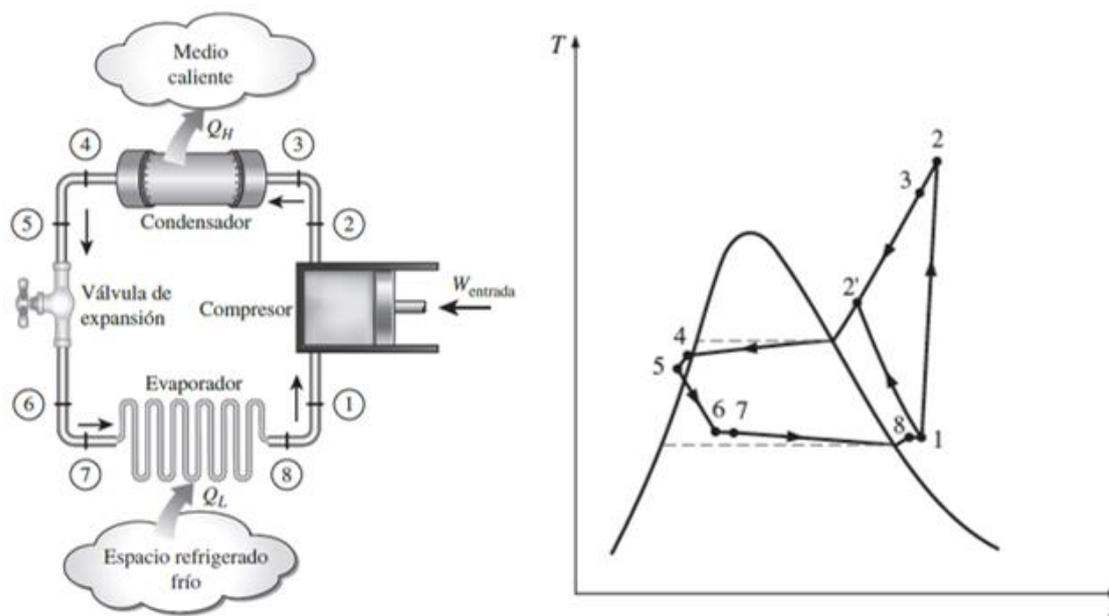


Figura 11. Ciclo real de refrigeración por compresión de vapor y diagrama T-s [5].

Todo lo anterior mencionado, se manifiestan en un incremento del volumen específico. En consecuencia, se requiere una entrada de potencia al compresor mayor debido a que el trabajo de flujo estacionario es proporcional al volumen específico.

Observando la **Figura 11**, se puede deducir que durante el proceso de compresión se aumenta la entropía (1-2) o disminuye (1-2'); esto depende del predominio de los efectos. Debido a lo comentado en el anterior párrafo, lo deseable sería que se siga el proceso 1-2' porque el requerimiento de entrada de trabajo disminuirían.

En el caso real, es inevitable tener cierta caída de presión en el condensador, así como en las líneas que lo conectan con el compresor y la válvula de expansión. Además, es complicado llevar a cabo la condensación con precisión para que el refrigerante sea un líquido saturado al final, y no es deseable que el refrigerante ingrese a la válvula de expansión antes de que se condense totalmente. En consecuencia, el refrigerante debe ser subenfriado antes que entre a la válvula de expansión. Cabe señalar que la válvula de expansión y el evaporador se encuentran uno muy cerca del otro, dado que así se puede disminuir la caída de presión en ese tramo. En otras palabras, el refrigerante entra al evaporador con una entalpía inferior y por ello puede absorber más calor del espacio refrigerado.

4. Componentes principales de un sistema de refrigeración industrial.

4.1. Compresor. El compresor es el elemento encargado de llevar el refrigerante desde la presión de evaporación, a la presión de condensación. Esto requiere aporte de trabajo. El tipo de compresor depende del refrigerante a usar. Existen los siguientes:

4.1.1. Compresores alternativos. Son máquinas de desplazamiento positivo, la cual el gas es comprimido por medio de émbolos. El funcionamiento es el siguiente:

- Posición 1: El pistón alcanza su Punto Muerto Superior (PMS).
- Posición 2: Carrera descendente. Se abre la válvula de admisión, el pistón continúa su carrera descendente, con lo cual se aspira vapor según un proceso isobárico.
- Posición 3: El pistón alcanza su PMI.
- Posición 4: Carrera ascendente. Cuando el pistón inicia su carrera ascendente, se cierra la válvula de admisión, debido a un incremento de la presión en el interior del cilindro sobre el valor de la presión de aspiración.

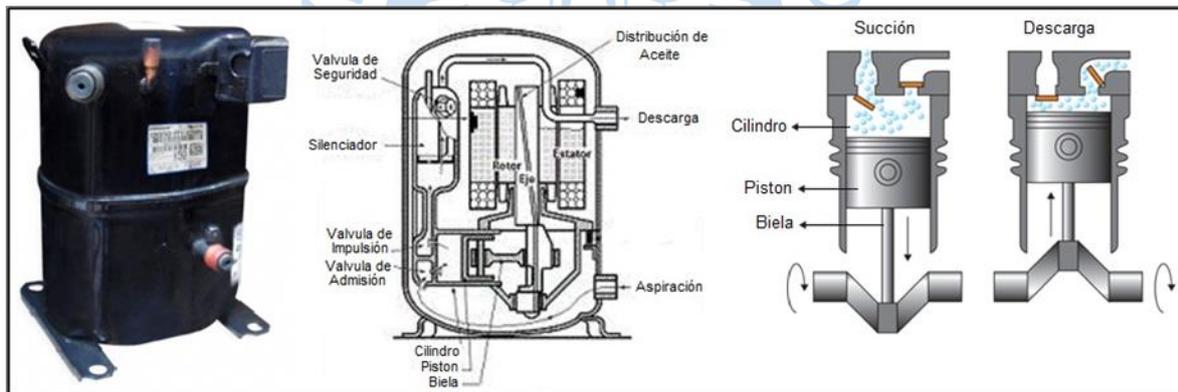


Figura 12. Compresor alternativo [6].

4.1.2. Compresores rotativos. Los compresores rotativos son adecuados para aplicaciones en las cuales se requiera un desplazamiento volumétrico elevado a presiones de operación moderadas. Se constituyen básicamente de: estator y rotor.

Entre el estator y el rotor existe una cámara en la que el refrigerante aspirado se comprime de forma que el movimiento del rotor lo confina en dicha cámara eliminando el nexo con la línea de aspiración. Posteriormente, el desplazamiento del rotor pone en comunicación la cámara con la línea de impulso y, al existir en ésta una presión mayor, se produce la entrada de fluido impulsado en la cámara que comprime el vapor. Produciéndose una compresión por reflujo. Finalmente, el movimiento del rotor expulsa todo el refrigerante de la cámara, obligándolo a pasar a la línea de impulsión.

Se logran encontrar 3 ventajas de un compresor rotativo frente a un alternativo:

- La ausencia de desplazamientos alternativos reduce las vibraciones.
- El flujo másico de gas es continuo.
- Disminuye la importancia de la presencia de líquido al final de la compresión.

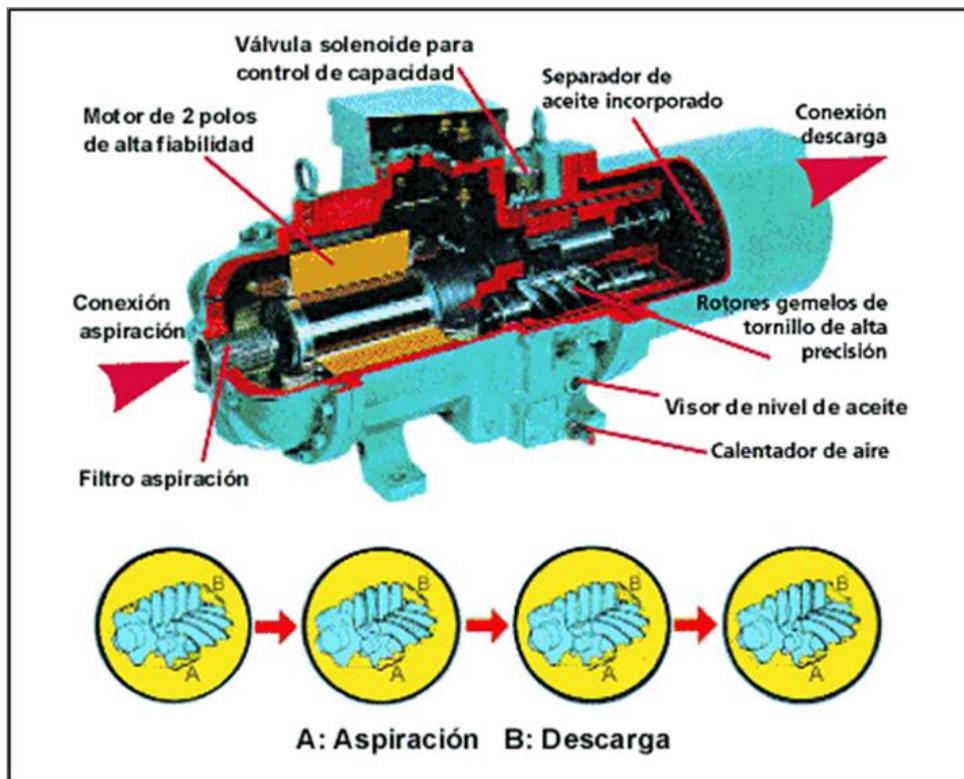


Figura 13. Compresor rotativo de tornillo [7].

4.2. Evaporador. Es un intercambiador de calor donde ocurre la evaporación del refrigerante absorbiendo calor del espacio a refrigerar. Se produce la ebullición del refrigerante a baja presión, lo que origina la extracción de calor del lugar a acondicionar. En la industria se utiliza el de tipo “enfriamiento de aire”.

En el interior del evaporador se encuentra fluyendo el refrigerante, mientras que en el exterior fluye aire a través de los tubos y/o aletas. El aire tiene una cierta cantidad de agua calculable. En el interior del evaporador, el agua condensa y, si la temperatura en el interior es inferior a cero grados, el agua condensada se congela formando hielo o escarcha, al aumentar éste, hace disminuir la velocidad del aire y se pierde potencia de refrigeración, porque ahora lo aísla. Para evitar esto, se aporta calor que permita la fusión del hielo, de forma manual, aire, agua, eléctrico, con refrigerante cálido y por inversión de ciclo.

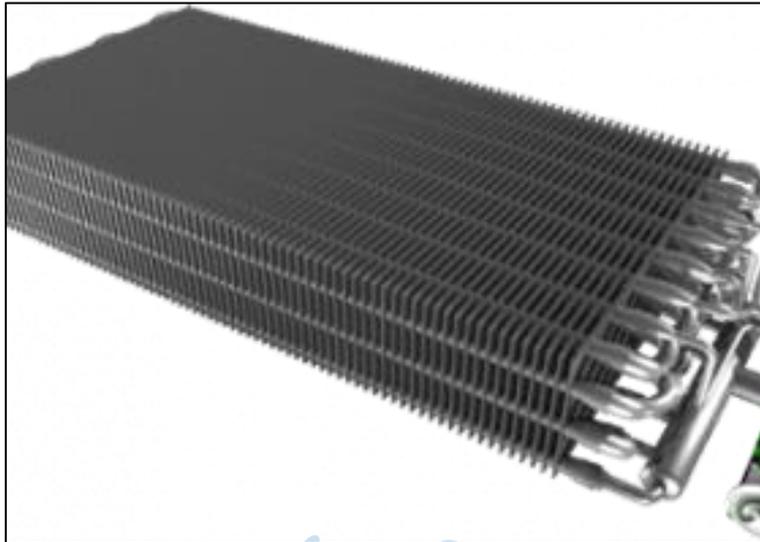


Figura 14. Evaporador de tubo con aletas [8].

4.3. Condensador. Es un intercambiador de calor cuyo objetivo es llevar al estado líquido el refrigerante para que sea utilizado nuevamente en el proceso de refrigeración del túnel de enfriamiento. El refrigerante llega al condensador como vapor saturado o sobrecalentado.

4.4. Dispositivos de expansión. Su finalidad es reducir la presión y temperatura del refrigerante, regular el caudal del refrigerante, alimentar líquido a baja presión al evaporador y mantener un sobrecalentamiento constante a la salida del evaporador. Existen los siguientes tipos de dispositivos de expansión: Tubo capilar, válvula de expansión manual, Válvula de expansión termostática, Válvula de expansión automática o presostática, Válvula de flotador de alta y baja presión, Válvula electrónica

5. Refrigerantes en la industria

Para poder seleccionar un refrigerante es necesario tener en cuenta tanto el impacto ambiental que éste pueda generar, como su eficiencia. Dentro de las características medioambientales de los refrigerantes tenemos el ODP (*Ozone Depletion Potential* o Potencial de Reducción de Ozono) y GWP (*Global Warming Potential* o Potencial de Calentamiento Global).

El índice ODP es la medida de la capacidad que tiene un material para destruir la capa de ozono. Esta medida es un valor relativo al R-11, cuyo valor es 1 (el máximo). El ODP suele medirse en base a un horizonte de tiempo, llamado ITH (*Integration Time Horizon*). Usualmente se usan 100 años como ITH para propósitos reguladores.

El índice GWP de un gas de efecto invernadero, es una medida que describe la capacidad de éste para atrapar la energía de radiación comparándola con “unidades” de CO_2 (R-744), el cual tiene un tiempo de vida muy prolongado. Todas las medidas del impacto climático se dan en valores equivalentes en CO_2 .

Finalmente, se tiene el TEWI (Impacto equivalente total del calentamiento) del sistema, el cual es la suma de las emisiones directas de los refrigerantes e indirectas del uso de la energía del sistema a lo largo del proceso, medidas en unidades de CO_2 . Además, se tiene el LCCP (Desempeño climático del ciclo de vida), el cual incluye al TEWI y añade los efectos indirectos de las emisiones de CO_2 al fabricar el refrigerante y su posterior uso [9].

La ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) presenta la norma Standard 34-2007 en la cual se refiere a los refrigerantes mediante un sistema de letras y números, tanto en su composición como en su nivel de seguridad.

En la **Tabla 2** se muestra la nomenclatura de los refrigerantes según su clasificación de acuerdo a los riesgos anteriormente mencionados.

Tabla 2. Tabla de seguridad de los refrigerantes

		Toxicidad		Ejemplos
		Baja	Alta	
Inflamabilidad	No inflamable	A1	B1	A1: R-22, R-134a B1: R-123
	Baja	A2	B2	A2: R-412b, R-152 B2: R-717
	Alta	A3	B3	A3: R-290, R-600 B3: Cloruro de Vinilo

La designación del dióxido de carbono, según la norma, es R-744. Para elegir correctamente un refrigerante hay que tener en cuenta: Alto calor latente de vaporización, (permite reducir el caudal másico circulante de refrigerante); Bajo volumen específico del vapor en la aspiración (permite reducir el tamaño del equipo compresor y las tuberías); Presiones de trabajo moderadas (la presión de condensación debe ser mucho menor a la

presión crítica y la presión de evaporación debe ser mayor a la presión atmosférica; lo primero permite que el ciclo de refrigeración tenga recorrido y lo segundo evita la entrada de humedad); Temperatura de descarga moderada (para evitar la descomposición del lubricante y daño para el compresor); Punto de congelación bajo; Que no existan efectos secundarios para las personas y materiales; Disponible en el mercado; Bajo costo; Ambientalmente amigable (basándose en los índices ODP y GWP).

6. Túnel de enfriamiento

Un túnel de enfriamiento es un sistema de refrigeración que asegura un descenso rápido de la temperatura del producto (frutas, verduras, chocolates, etc.) sin llegar a dañarlo o disminuir su calidad.

Los túneles de enfriamiento tienen diversas aplicaciones en procesos de la industria farmacéutica, cosmética, o alimentaria. Entre sus aplicaciones destacan: enfriamiento de desodorante en barra, enfriamiento de ungüentos, enfriamiento de pan, enfriamiento de bizcochos rellenos, enfriamiento de granola a granel, túnel de enfriamiento para granola en barra, túnel de enfriamiento para chocolate, enfriamiento de cubiertas, enfriamiento de pastas, enfriamiento de mermeladas. Generalmente estos productos requieren enfriamiento previo al empaque del producto final, evitando cuellos de botella y la exposición a contaminantes.



Figura 15. Túnel de enfriamiento [21].

6.1. Tipos de túnel de enfriamiento. En la industria del frío existen 2 tipos de túneles de enfriamiento que son profusamente utilizados:

6.1.1. Túnel Californiano. En este túnel el aire atraviesa las filas de pallets por los costados. Para asegurarse de que el aire no ingrese por la parte superior o por el frente de los

pallets los túneles poseen una lona que cubre por encima las dos filas y el pasillo central y cae por delante.

El ciclo que sigue el aire es el siguiente: primero es impulsado por los ventiladores a través del evaporador, donde se enfría. Luego ingresa por los costados de las respectivas filas de pallets donde pierde presión. Cuando abandona las cajas llega al pasillo de baja presión (que se encuentra entre las filas de pallets) y es succionado nuevamente por el ventilador. En la **Figura 16** se muestra un túnel californiano en el cual se indica el sentido del flujo.

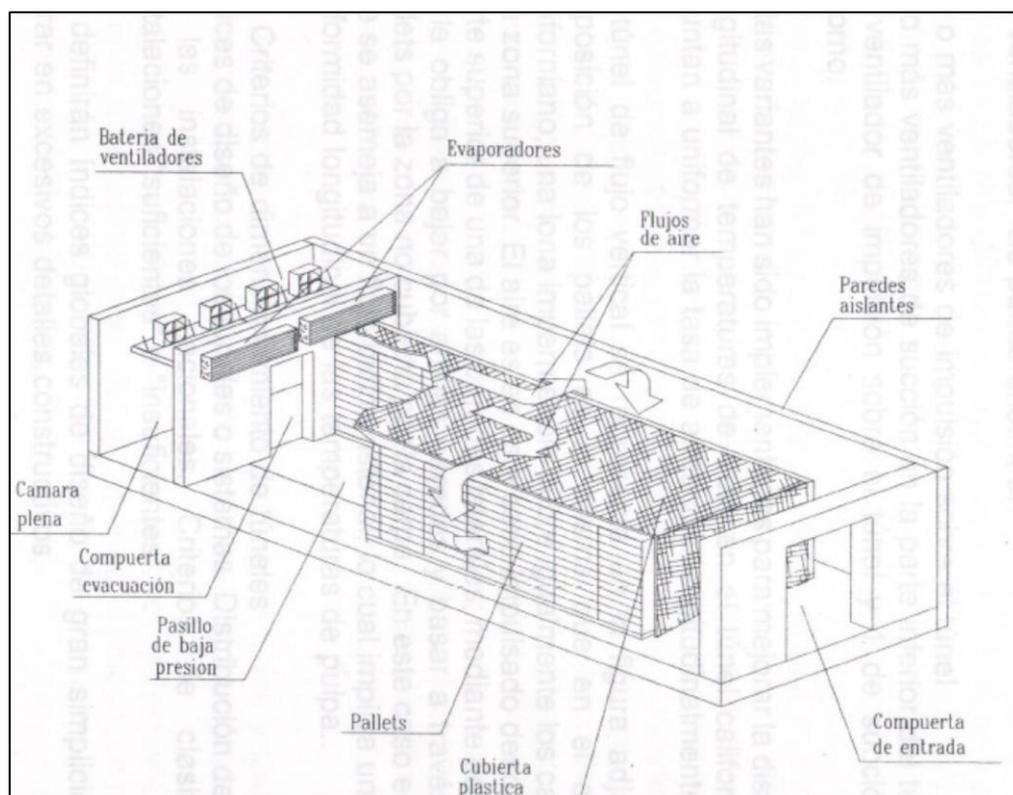


Figura 16. Túnel californiano [22].

6.1.2. Túnel Vertical. El túnel vertical es similar al californiano, la diferencia radica en el sentido del flujo del aire y en la disposición de los equipos. A diferencia de un túnel californiano los ventiladores y evaporadores se encuentran en un costado del túnel (**Figura 17**), lo cual tiene la ventaja de que toda la fruta ubicada a lo largo de la fila se enfría de manera uniforme. En un túnel vertical, al igual que en californiano, el aire ingresa a las filas de pallets por los costados, pero una vez que atraviesa las cajas es succionado por unas rejillas en el piso del pasillo de baja presión. El aire pasa por un ducto ubicado bajo el túnel

y es liberado por un costado del túnel donde se encuentran los ventiladores y los evaporadores.

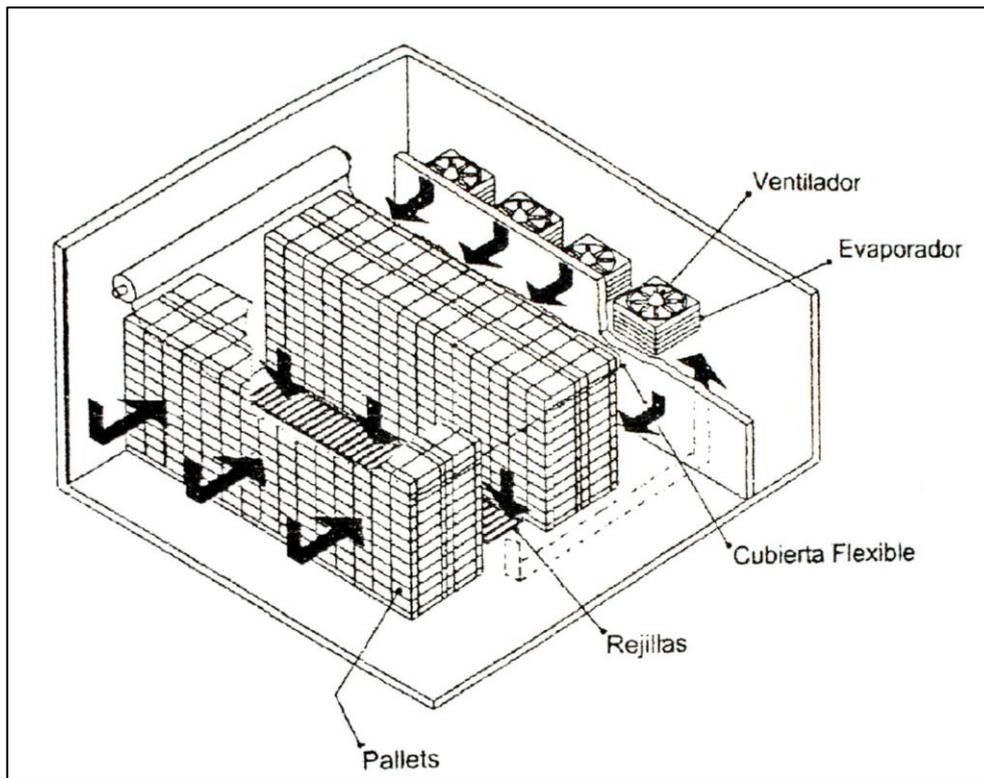


Figura 17. Túnel por lotes estilo vertical [22].

Capítulo 3

Planta Piloto de Túnel de Enfriamiento

1. Ubicación de la planta piloto

La planta piloto está ubicada dentro del Campus Piura de la Universidad de Piura, cerca al radar de la Universidad De Piura y del Centro Médico Universitario, tal como se muestra en la **Figura 18**.

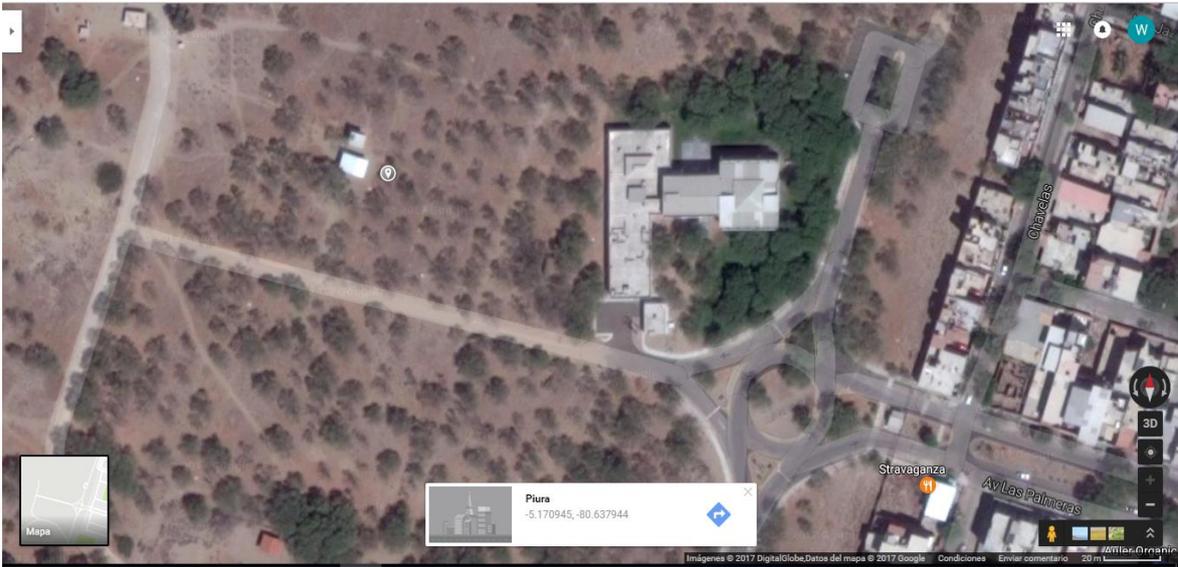


Figura 18. Planta piloto de túnel. [Google Maps].

2. Distribución y dimensiones

La estructura de la Planta Piloto Túnel de Enfriamiento está inspirada en los túneles estándares locales, mientras los equipos de refrigeración han sido seleccionados para posibilitar la implementación de controladores avanzados. La planta cuenta con dos ambientes: Sala de control y Túnel de enfriamiento propiamente dicho.

La sala de control tiene unas dimensiones de 3m x 2.5m, espacio planificado para un aforo de 3 personas con computadora. Las paredes son de *Drywall*, con una altura de 2.6m y una sola puerta de madera. Aquí se ubica la computadora de escritorio del proyecto, el tablero de control para el PLC y sus componentes.

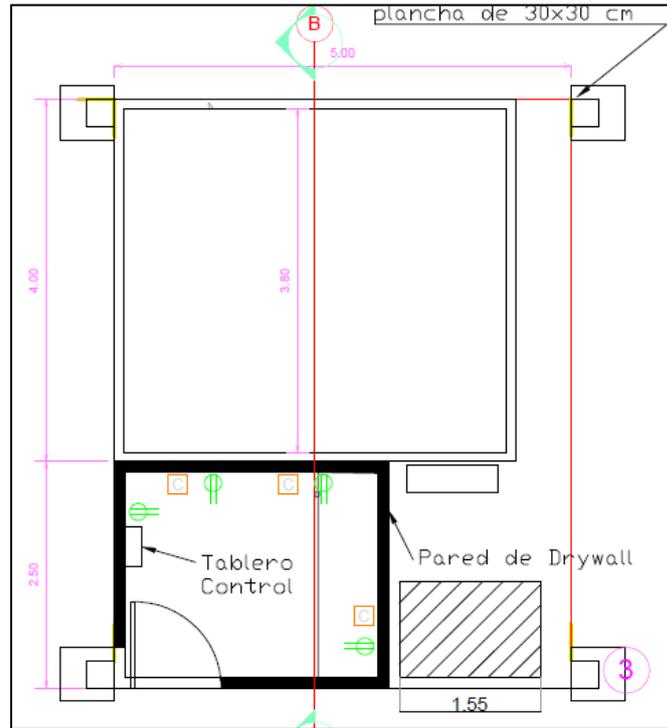


Figura 19. Distribución de la planta de refrigeración.

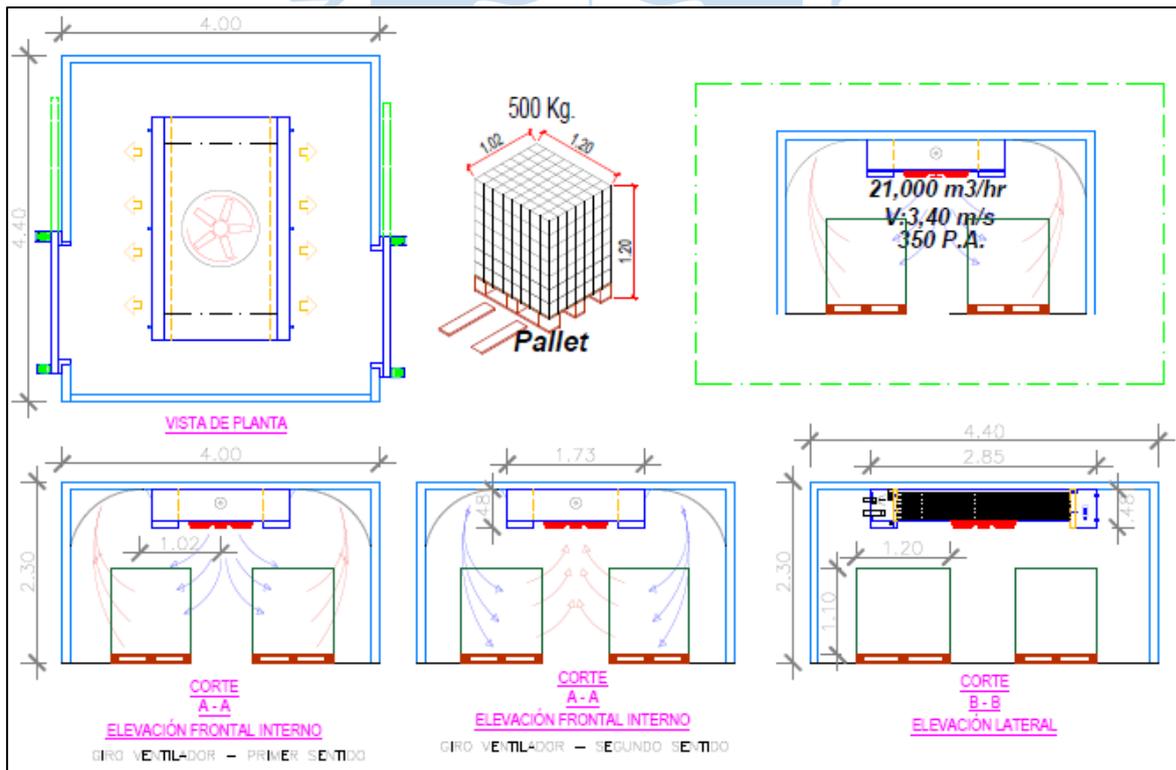


Figura 20. Plano de planta piloto de túnel. [Fuente propia].

3. Sistema de Refrigeración

3.1. Túnel de enfriamiento. En su interior, colgando de la estructura metálica, atravesando el techo, se encuentra el evaporador INTERCAL, de más de 300 kg, quien se encarga de extraer el calor del túnel mediante convección forzada sobre los pallets.



Figura 21. Planteamiento de desarrollo de investigación.

El túnel también está equipado con sensores de todo tipo: 5 sensores de temperatura en el interior del cuarto, y sensores de temperatura en cada uno de los puntos del ciclo de refrigeración.

3.2. Zona exterior. Se ubican el Condensador/Compresor *Bitzer* y el tablero de potencia. El equipo *Bitzer* consta de un compresor de velocidad variable, y el condensador, cuyo ventilador también varía su velocidad. El tablero de potencia recibe de la red una tensión trifásica en baja tensión, y se encarga de repartir la tensión a toda la planta. Aquí se ubica un medidor de potencia *Schneider Electric PM5340*.

La unidad compresora tiene los siguientes datos:

- Compresor: 4FES-5Y-4PS
- Marca: Bitzer
- Escalones de Capacidad: 33% al 100% con variador.

- Potencia Frigorífica: 9.34 kW
- Potencia absorbida: 4.09 kW
- Corriente máxima: 18A
- Voltaje Rango: 380V-420V
- Condensador media V: 13.42 kW

Además, la unidad está equipada con los siguientes accesorios:

- Recipiente de succión.
- Separador de aceite.
- Control electrónico de presión de líneas en succión y descarga.
- Ventilador EC con control.
- Variador de frecuencia Bitzer.
- Tablero eléctrico incorporado con controlador de temperatura y sistema de giro para ventilador de evaporador.
- Líneas de Refrigeración.
- Control de Refrigeración.



Figura 22. Condensador Bitzer y Tablero de potencia. [Fuente propia].

La unidad Condensadora *Bitzer* es una unidad tecnológica por lo cual posee una gran cantidad de sensores que miden diversos parámetros que tienen importancia para conocer el estado de su funcionamiento y la eficiencia del proceso.

Entre las medidas que toma podemos mencionar la temperatura en la succión del evaporador, la temperatura del ambiente refrigerado, temperatura ambiente (temperatura medida del aire circundante a la unidad condensadora), temperatura del gas descargado, temperatura del gas super calentado, la frecuencia del compresor, la corriente del compresor, el número de horas de funcionamiento y la capacidad de los ventiladores de la unidad condensadora. Mucha de esta información será útil para la investigación realizada, es necesario extraer esta información para su posterior análisis y control, por lo cual la unidad Condensadora *Bitzer* posee diferentes protocolos de comunicación, cada uno con distintas facilidades, pero con un tipo diferente de conexión. En este apartado hablaremos de los protocolos que se emplean en este momento para la adquisición de datos durante las pruebas realizadas al túnel de enfriamiento.

3.3. Sala de control. En este espacio se va a visualizar las señales de ingreso y de salida del túnel de enfriamiento; y se ubica la desktop y tablero.



Figura 23. PC y tablero de control [Fuente Propia].

4. Tipos de señales y comunicación

En la planta piloto se tienen diversos tipos de sensores instalados, por ejemplo, se encuentran los sensores de temperatura PT100 que se usaran para medir la variación de temperatura en

la pulpa de la fruta que se desea enfriar y tenemos el sensor de consumo Schneider ambos deben ser leídos para asegurar que el control instalado cumpla con la función de asegurar la calidad de producto refrigerado con el máximo ahorro energético posible pero cada uno de estos se comunica en un protocolo. Se mencionarán los sensores que tenemos a disposición para ser leídos y por qué protocolo de comunicación usan.

- Sensores PT100 y sensor NTC, miden la temperatura de la pulpa de la fruta que se desean enfriar, pero además pueden ser usados para medir la temperatura del aire al interior del túnel de enfriamiento estos sensores están conectados a un conversor de señal de marca SITRAD que comunica las temperaturas en protocolo serial por conexión USB al computador instalado en la sala de control. Esto facilita la conexión ya que podemos leer varios sensores con solo una conexión USB hasta el momento estamos leyendo la temperatura de 5 sensores, 4 de estos son PT100 y solo hay un sensor NTC.
- Sensor de Consumo *Schneider*, el sensor Schneider tiene un protocolo de conexión Modbus RTU por medio de un cable RJ45 el cual está conectado al Router de la red local de la sala de monitoreo, cualquier equipo que esté conectado a la red local puede acceder a la información que este sensor lee aunque se hace necesario el uso de un OPC para definir las direcciones por las cuales llegan cada dato.

4.1. Software SCADA LabView. Este *software* se programó con la función de ser la interfaz humana para la adquisición y almacenamiento de los datos medidos por el sensor de consumo *Schneider*. El software permite seleccionar la ubicación del archivo donde se guardará los datos medidos, para lograr comunicar los datos desde el medidor hasta la computadora se hizo necesario el uso del servidor OPC donde especificamos el protocolo MODBUS TCP/IP donde se hicieron las respectivas comunicaciones.

El SCADA tienen acceso a la información del sensor *Schneider* a través del servidor OPC que extrae los datos ya no por protocolo, sino que da la información en una clase de variable dada por ejemplo las mediciones del sensor las cuales son voltaje, corriente, potencia y energía activa son todas variables del tipo flotante ya que poseen parte decimal.

El SCADA permitirá guardar la información del consumo para su posterior análisis con el objetivo de mejorar el consumo energético del túnel de enfriamiento. También permite la

visualización de los datos en tiempo real mediante gráficas y medidores en la computadora de la sala de control.

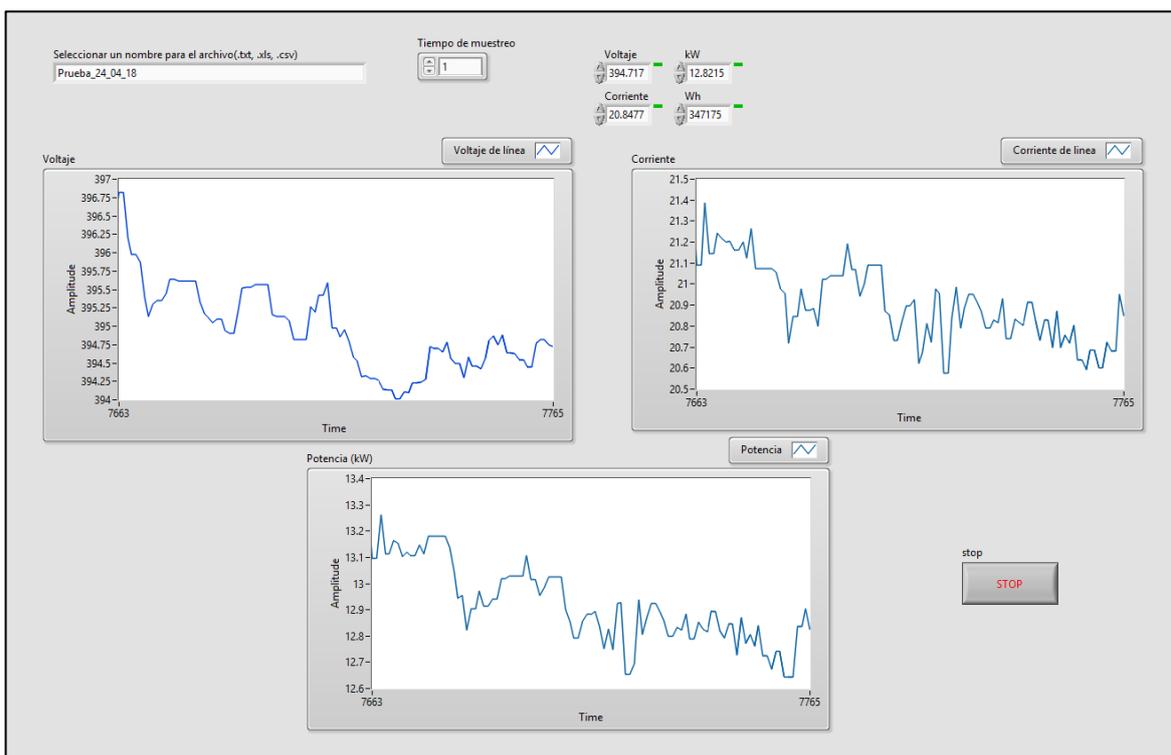


Figura 24. Captura de pantalla Interfaz del Software SCADA

4.2. Software ECOSTAR

El *software* ECOSTAR es el cual permite la visualización de los datos medidos por los sensores de la unidad condensadora BITZER y es un software propio de la marca BITZER diseñado para ser de fácil uso ya que no requiere la instalación de ningún programa, está programado mediante tecnología web, en lenguaje HTML el código de cada una de estas vistas se guardan en el controlador o tarjeta electrónica de la unidad y permite el acceso a cualquier persona con acceso a la red local a la cual esté conectado la unidad condensadora. Transmite las mediciones de los sensores en tiempo real y los presenta por medio de vista HTML en el navegador donde solo se hace necesario ingresar la dirección IP de la unidad condensadora.

El *software* ECOSTAR también permite controlar algunos parámetros como el encendido o el modo de control de la unidad condensadora desde la computadora desde la que se accedió a la dirección IP que le corresponda a la unidad condensadora.

ECOSTAR tiene un nivel de seguridad aceptable solicita el ingreso a través de un usuario y contraseña, la cual se puede configurar para cambiarse en caso sea necesario además permite gestionar permisos de acuerdo con el tipo de usuario.

Como se puede apreciar en la **Figura 25** la vista inicial me permite visualizar los valores de temperatura en cada uno de los puntos termodinámicos importantes en un proceso de control como también visualizar la velocidad de funcionamiento del compresor en Hz.

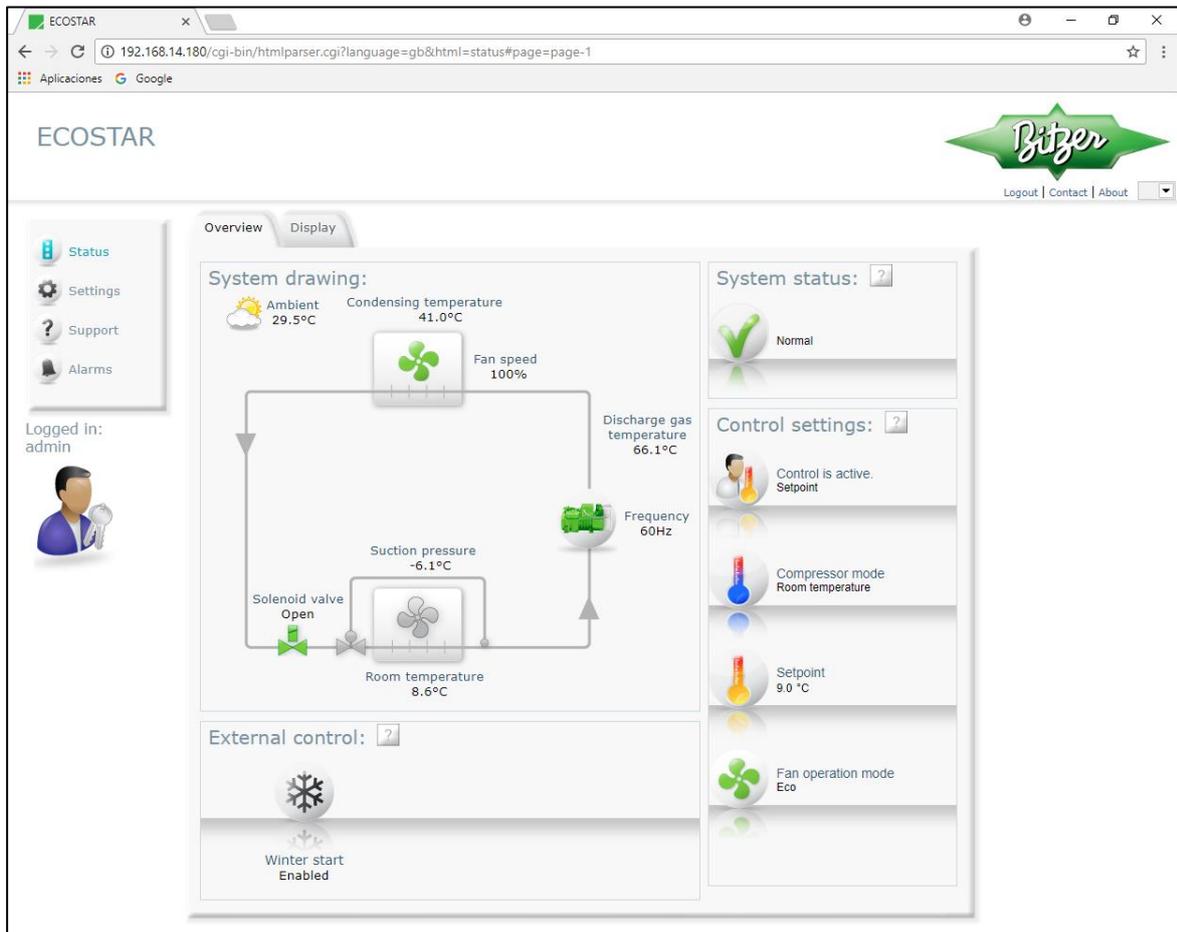


Figura 25. Ventana Inicial de la Interfaz Software ECOSTAR

4.3. Software LODAM MULTITOOL LMT 100

El software LODAM MULTI TOOL (LMT), es el programa que se instaló para lograr la comunicación mediante por puerto USB, este programa tiene una interfaz cuya primera vista se asemeja a la primera vista del software ECOSTAR, pero tiene algunas diferencias que pueden dar más ventajas en la adquisición de la información.

Permite realizar un *datalog* de datos seleccionados, podemos seleccionar cualquier dato que se guarde en la base de datos del programa. No todos tienen valores validos que se

guarden adecuadamente muchas son variables que sirven como alarmas en caso de que algún sistema haya tenido alguna falla.

La representación del sistema de enfriamiento es muy similar a la usada en el *software* ECOSTAR pero que no muestra toda la información como se veía en el display de la segunda vista de ECOSTAR. Sin embargo, también me permite encender el compresor de manera remota desde el equipo en la sala de control al igual que me permite cambiar el modo de control.

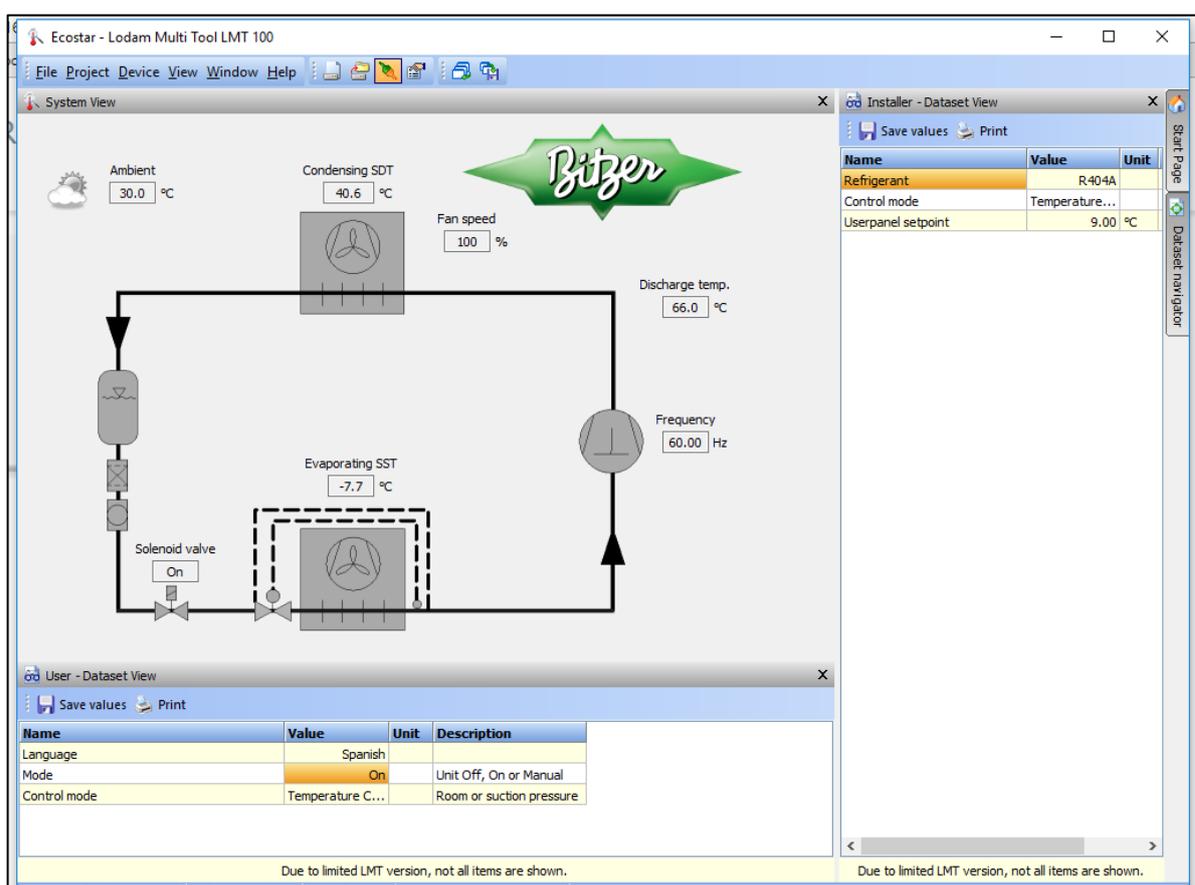


Figura 26. Captura interfaz *software* LMT

El software LMT también permite graficar los datos en tiempo real que está tomando la unidad condensadora *Bitzer*, esta es una función de *data log* el cual fue configurado para tomar las medidas de las variables más importantes que la unidad condensadora pueda mostrar.

Tag name	Name	Value	Unit	Description	Display mask	Min	Max
Info							
Customer	Info.Customer	BITZER					
Title	Info.Title	CU-ECOSTAR					
OSVersion	Info.OSVersion	1.6.0.1.525400.0.AA					
FWLVersion	Info.FWLVersion	1.6.0.1.525400.0.AA					
AppVersion	Controller LMC300 version	2.1.6.2					
Date	Info.Date	Oct 23 2014					
Checksum	Info.Checksum	N/A					
Stock	Info.Stock	6552190001					
Target	Info.Target	LMC 300-512					
Controller	Info.Controller	ARM75S12					
Serial	Info.Serial						
Copyright	Info.Copyright	(c) 2011 Lodam electronics a/s					
Authors	Info.Authors	HLA,LMJ,FS,CL,MPH,KIS,FGJ					
Notes	Info.Notes	CondUnit-ECOSTAR					
System							
Timer 100	System.Timer 100	81586				0	4294967295
Blink	System.Blink	Off				Off	On
Command	System.Command	0				0	65535
Test1	System.Test1	0				-10000	10000
Test2	System.Test2	0				-10000	10000
Test3	System.Test3	0				-10000	10000
Test4	System.Test4	0				-10000	10000
Test5	System.Test5	0				-100000	2147483647
Test6	System.Test6	0				-100000	2147483647
Test7	System.Test7	0.00				-100.00	100.00
Test8	System.Test8	0.00				-100.00	100.00
Config							
Dummy	Config.Dummy	0				0	0
Disk0							
PWRCheck	Disk0.PWRCheck	0				0	1
ErrCount	Disk0.ErrCount	0				0	65535
Com							
NodeAdr	Com.NodeAdr	1				0	255
Connected	Com.Connected	On				Off	On
MacAdr	MAC address	00:1F:79:00:34:F4					
IpAdr	IP address	192.168.14.180				0.0.0.0	255.255.255.255
IpMask	Netmask	255.255.255.0				0.0.0.0	255.255.255.255
IpGateway	Gateway	192.168.1.1				0.0.0.0	255.255.255.255
UseDHCP	Com.UseDHCP	Off				Off	On
DigIn							
DIS1	Function 1	Off				On	Off
DIS2	Function 2	Off				On	Off
DIS3	Not used	Off				On	Off
DIS4	Not used	Off				On	Off
UdpCnx	DigIn.UdpCnx	On				Off	On
DigOut							
RE1	Contactor K1	On				Off	On
RE2	Valve LHV / Oil return	On				Off	On
RE3	Crankcase heater	Off				Off	On
RE4	OLC/K / SE-8	Off				Off	On
RE5	Alarm relays	On				Off	On

Figura 27. Captura de la base de datos Software LMT

En las **Figura 28** se puede apreciar la forma en que ocurre el proceso de *data log* y la gráfica de las variables que consideramos más importantes.

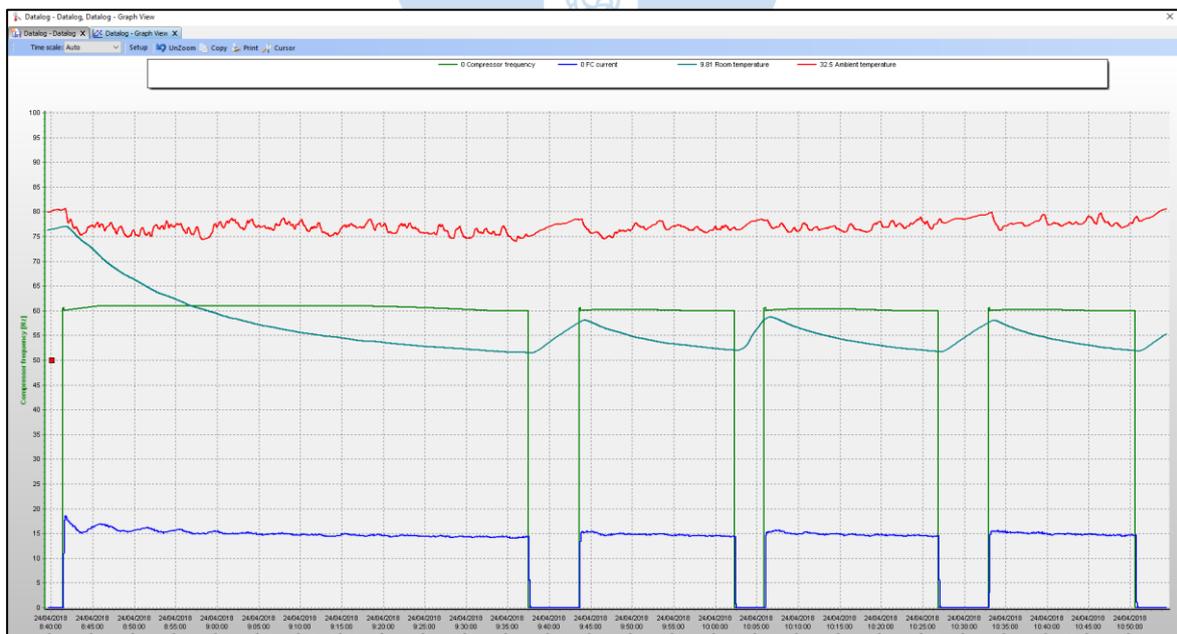


Figura 28. Data log software LMT

4.4. Software SITRAD

El *software* SITRAD es el que permite extraer los datos del conversor SITRAD que recibe las mediciones de los sensores de temperatura instalados al interior del túnel de refrigeración. Su interfaz permite visualizar las temperaturas, también guarda estas temperaturas en un base de datos mientras el *software* SITRAD se esté ejecutando si este deja de ejecutarse no se toman medidas de temperatura. Usa un tiempo de muestreo de 30 segundos y puede guardar la información en formato de texto o CSV.

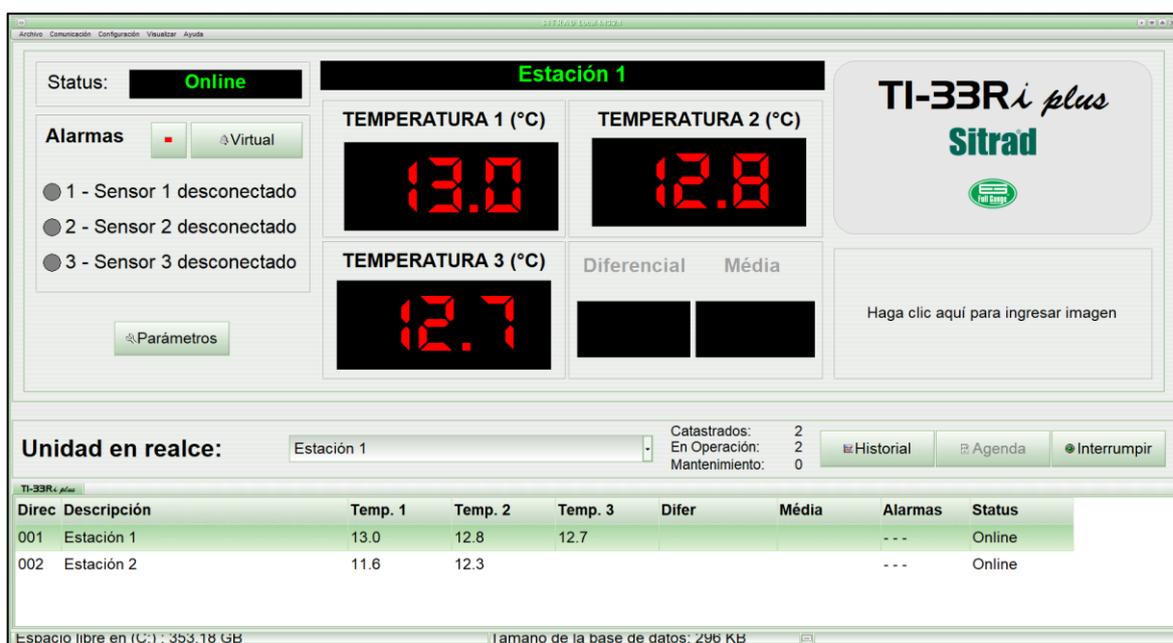


Figura 29. Captura de pantalla Interfaz *Software* SITRAD



Capítulo 4

Identificación y Aplicación de Control Avanzado

1. Identificación de planta de refrigeración

La función de transferencia del sistema fue obtenida mediante identificación de sistema, utilizando la aplicación ‘*System Identification Toolbox*’ de *MATLAB*. Se obtuvo un ajuste de 79% aproximadamente.

- La entrada del sistema es la variación de frecuencia del compresor (ΔF), en hercios (Hz).
- La salida del sistema es la variación de temperatura del aire del túnel de frío (ΔT), en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

1.1. Experimento: Prueba PRBS con carga.

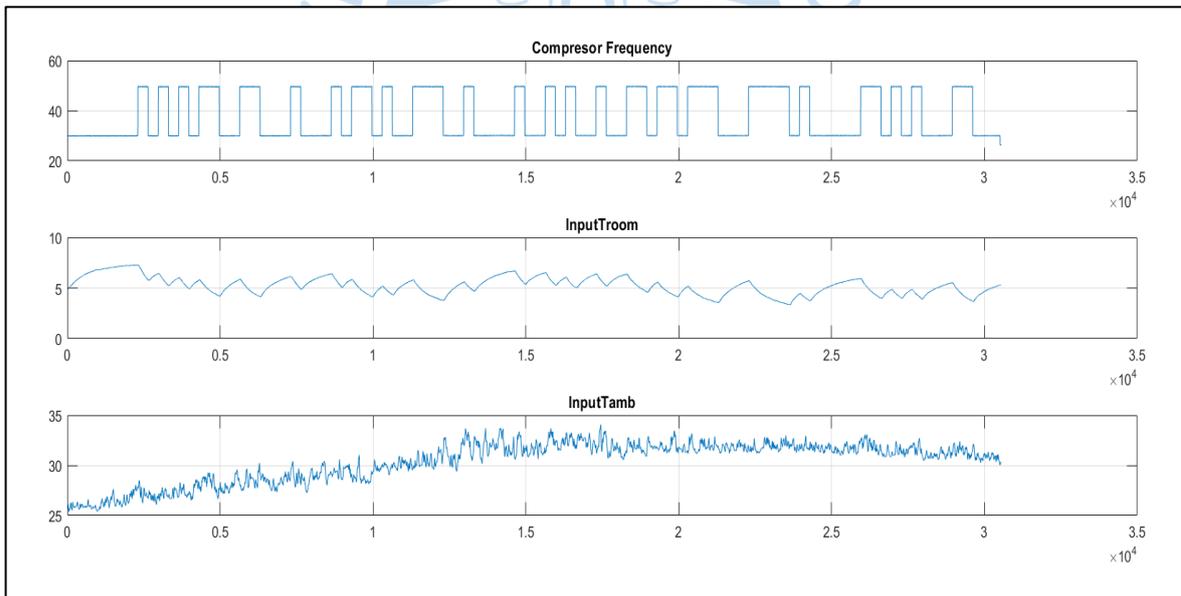


Figura 30. Prueba PRBS.

El software utilizado para la identificación es el *toolbox* de *MATLAB* llamado “*System Identification*”, presentado en la siguiente figura.

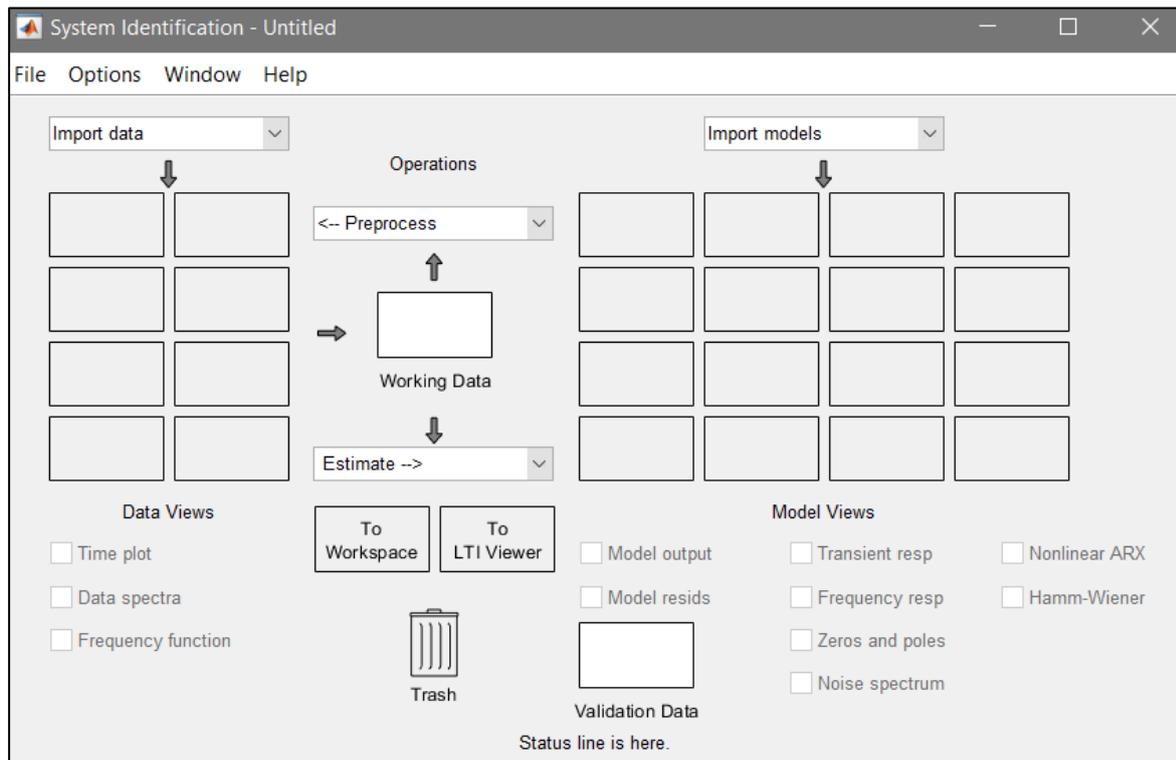


Figura 31. Interfaz de System Identification de MatLab.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se guarda la data de los experimentos en vectores, mediante “Import Data”. Los experimentos disponibles fueron 4 pruebas PRBS correspondientes a los días 15, 17, 18 y 19 de enero.
- Se filtra la señal de temperatura ambiente, pues se tomará como una entrada del sistema simulando su efecto de disturbio. Se utiliza un filtro de media móvil. Para definir la amplitud del filtro, se fue probando filtrar con una ventana deslizante hasta encontrar que el mejor resultado se obtenía con 4800 s, que equivale a 1h20min.
- Se crea un “Data Object” de cada prueba PRBS. La siguiente línea de código presenta cómo se creó el archivo del día 15 de enero:

```
PRBS1501_1 = iddata (InputRoom1501, [FCAPIFrqAct1501
InputTamb1501_1], 1, 'ExperimentName', 'Ene15');
```

- En el interfaz de System Identification, se importa los “Data Object” de cada prueba.
- El modelo que se busca encontrar corresponde a una función de transferencia, de segundo orden con retardo. Por ello, se prueba con 2 polos y variando la cantidad de

ceros. Cada modelo se estima con 50 iteraciones. En la siguiente figura, se puede observar las configuraciones seleccionadas para la identificación.

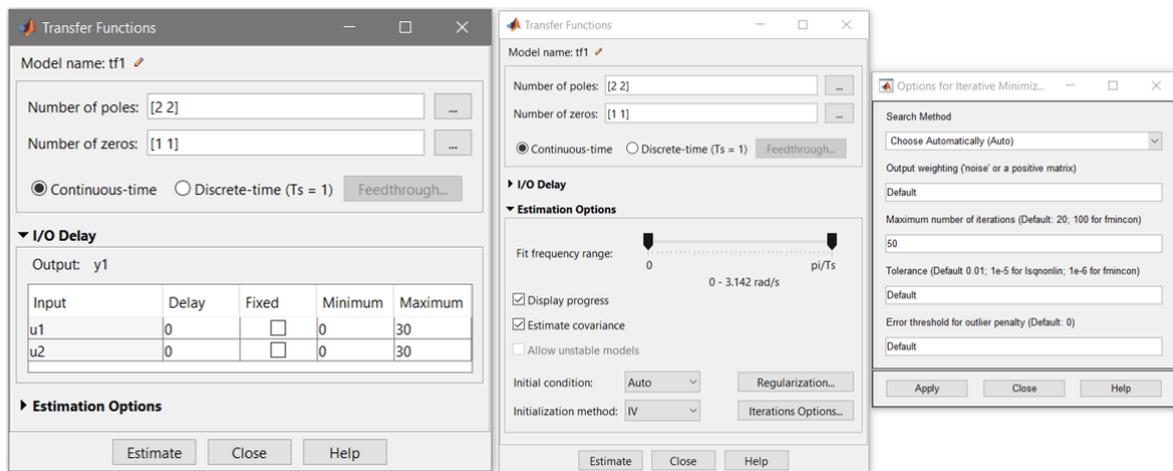


Figura 32. Configuración seleccionada para la estimación.

- Habiendo estimado modelos para cada prueba y variando cada día, se evalúa los resultados ajustando todas las pruebas a la data de cierto día, excluyendo los modelos que fueron identificados con ese mismo día.
- En la **Figura 33**, se aprecia la evaluación de ajuste tomando como data de validación al día 15 de enero. Por ello, los modelos del 15 de enero presentan un ajuste muy por encima que no se toma en cuenta, siendo el modelo de 18 de enero con 2 ceros el de mejor ajuste.

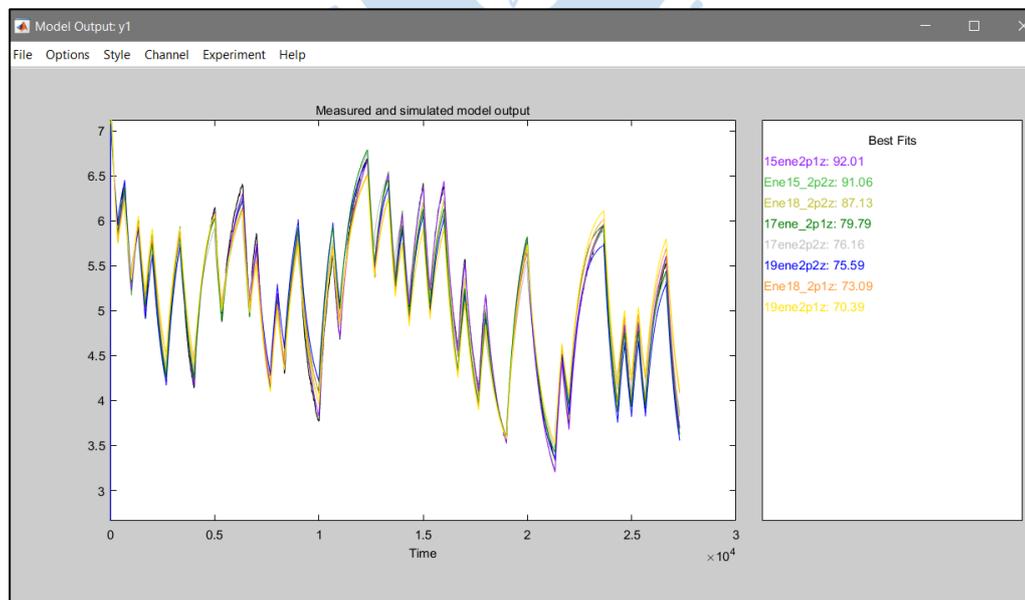


Figura 33. Ajuste de los modelos a la data del día 15 de enero

El modelo obtenido del sistema es el siguiente:

$$G(s) = \frac{-0.1683 s - 0.0000008877}{12020 s^3 + 619.7 s^2 + s} * \exp(-10.2 s)$$

Para mejorar su ajuste se consideró modelar también el disturbio externo como un término adicional, de tal manera que la salida quede de la siguiente forma:

$$y = G u + \left(\frac{C}{D}\right) e$$

Donde:

- “y” es la temperatura del cuarto en °C
- G es la función de transferencia de la planta
- u es la entrada del sistema, en Hz
- “C” y “D” son expresiones en Laplace
- e es un ruido blanco

Los valores de C y D son:

$$C(s) = s + 0.7752$$

$$D(s) = s + 0.0003766$$

Suposiciones:

- El modelo ha asumido que el modelo es lineal
- El modelo fue identificado utilizando data de una prueba PRBS con rango 30-50 Hz.
- Al ser función de transferencia, no acepta valores iniciales, los asume 0. Por lo tanto, los valores de entrada y salida deben ser ingresados de manera relativa (variaciones). Para colocar la salida de manera absoluta, se puede utilizar la estructura (u sigue siendo Δ Frecuencia):

$$y = G u + \frac{C}{D} e + T_{inicial}$$

En este capítulo, basándose en los resultados obtenidos en los ensayos BMP y semicontinuo con cáscaras de cacao, se plantea una metodología para el dimensionamiento y operatividad de un sistema de biodigestión anaerobia de cáscaras de cacao.

1.1. Ajuste y error.

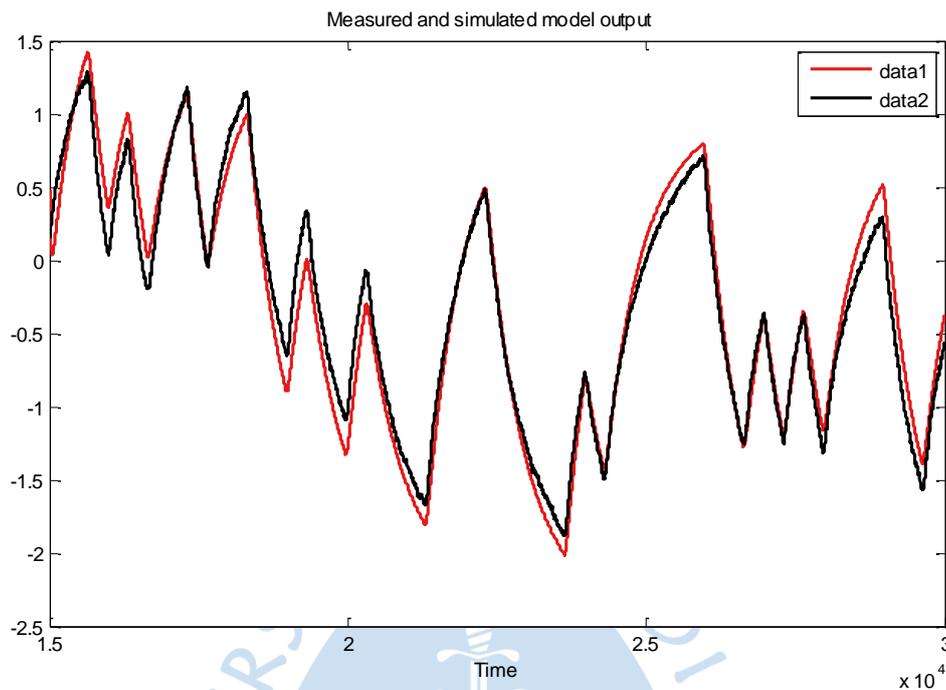


Figura 34. Comparación entre valores reales y simulados del modelo

El ajuste obtenido se puede verificar en la **Figura 34**. La línea negra son los datos medidos (data2) y la línea roja son los datos simulados (data1).

Los errores máximos obtenidos fueron de $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima y $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por debajo de la temperatura medida, como se puede apreciar en la **Figura 35**.

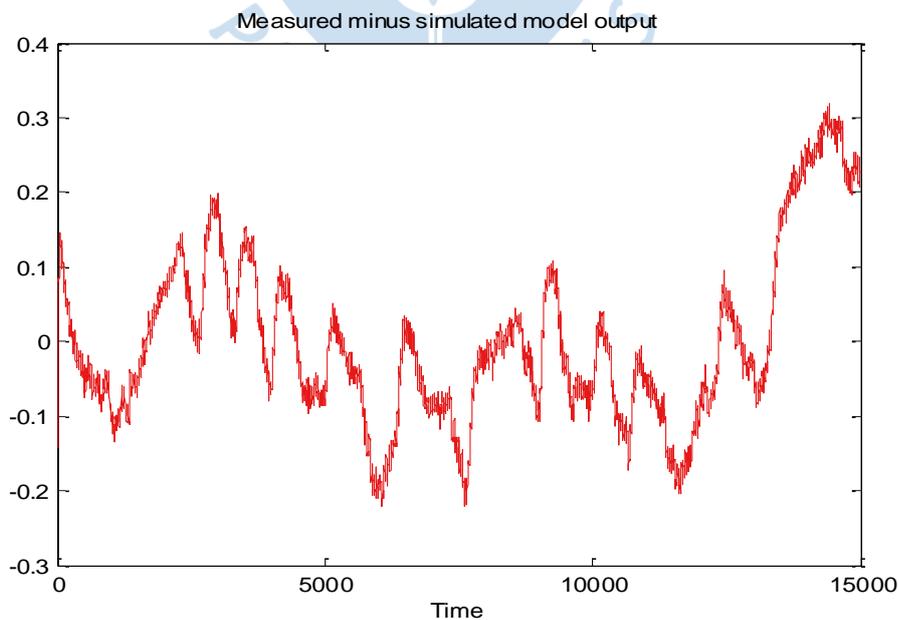


Figura 35. Error entre valores reales y valores medidos.

En la **Figura 36**, se aprecia que el modelo supera la evaluación de residuos, por lo que es un modelo válido.

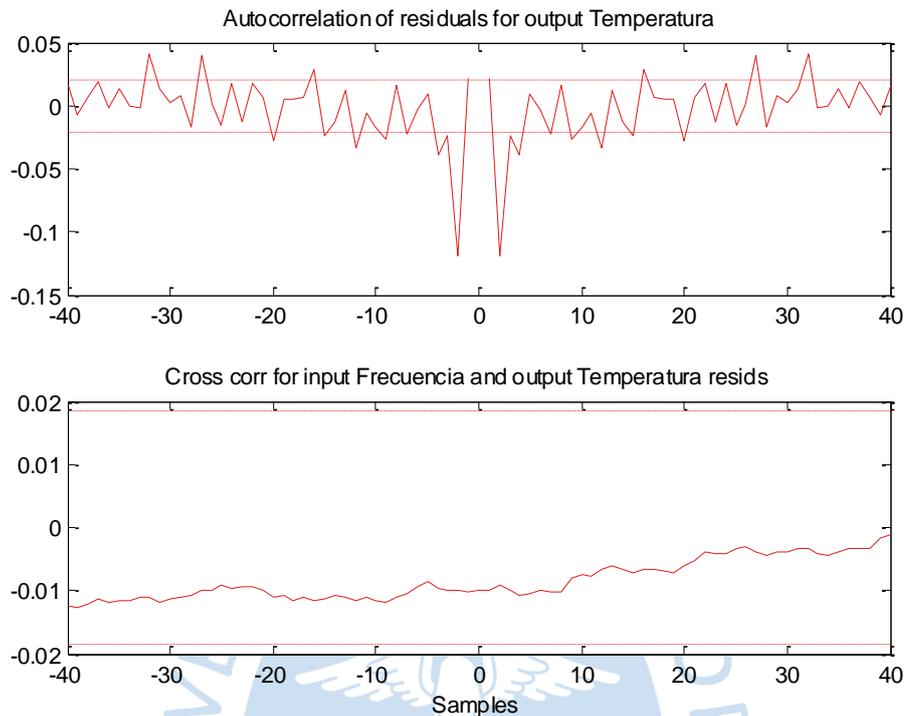


Figura 36. Evaluación de residuos

2. Diseño del control avanzado: Generalized Predictive Control (GPC)

La función de transferencia, obtenida por método de identificación es:

$$G(s) = \frac{-0.1683 s - 0.0000008877}{12020 s^3 + 619.7 s^2 + s} * \exp(-10.2 s)$$

2.1. Teoría de control avanzado: Control GPC. EL algoritmo de *Generalize Predictive Control* (GPC) fue propuesto en [28], en esta estrategia un secuencia de acciones de control son calculadas mediante la minimización de una función de costo cuadrática que por un lado pondera la diferencia entre una trayectoria de referencia y la salida predicha en un horizonte definido y, por otro lado pesa el esfuerzo de control necesario para obtener esa salida.

Teniendo un sistema de una sola entrada y una salida el modelo que usa en algoritmo GPC es de tipo *integrated controlled auto regressive moving average (CARIMA)*, cuya ecuación se muestra:

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-d}B(Z^{-1})u(t-1) + B(Z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta}$$

Donde:

$$\Delta = 1 - Z^{-1}$$

A, B y C son polinomios en con el operador de retardo $[[Z]]^{-1}$

- $y(t)$ representa la salida del proceso.
- $u(t)$ es la señal control.
- d es el retardo en el sistema y
- $e(t)$ es un ruido blanco.

La función de costo es dada por:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 A(Z^{-1})$$

Donde:

- $\hat{y}(t+j|t)$ es la predicción óptima de la salida j instantes en el futuro obtenido en el tiempo t .
- N_1 y N_2 son el horizonte de predicción mínimo y máximo respectivamente.
- N_u es el horizonte de control.
- $w(t+j)$ es la trayectoria de referencia.
- $\lambda(j)$ y $\delta(j)$ son pesos de cada sumando.

En el caso sin restricciones y considerando $\delta(j) = 1$, se obtiene la siguiente ley de control de forma matricial:

$$u(t) = [G^T G + \lambda I]^{-1} G^T (w - f)$$

Donde G es una matriz que depende del modelo, f depende del modelo y de los estados presentes y pasados y w es la referencia.

2.2. Discretización. Para determinar el tiempo de muestreo se toma en cuenta los siguientes datos:

- Se trata de un Sistema térmico por lo que el periodo de muestreo puede ser del orden de los minutos a segundos.
- La función de transferencia que determina el comportamiento del sistema, tiene una constante de tiempo de 600 segundos aproximadamente.

- Como regla practica para determinación del tiempo de muestreo, la referencia [27] dice que el tiempo de muestreo debe ser menor que un décimo de la constante de tiempo del sistema.

A partir de estos datos se determina una constante de tiempo de 30 segundos. Se procede a realizar el cálculo de la función de transferencia en discreto usando el comando c2d de MATLAB, con un tiempo de muestreo de 30 segundos y usando un retenedor de orden cero (ZOH), obteniendo la siguiente función de transferencia.

$$G_d(z) = z^{-1} \frac{-0.002003 - 0.002183z^{-1} + 0.003999z^{-1} + 0.0001861z^{-3}}{1 - 2.175z^{-1} + 1.388z^{-2} - 0.213z^{-3}}$$

En la **Figura 37** se muestra una gráfica de la respuesta escalón de las funciones de transferencia G y G_d . Donde la amplitud en la temperatura y el tiempo está en segundos. Se observa que la respuesta en discreto (en rojo) presenta un comportamiento parecido a la respuesta en continuo (en azul).

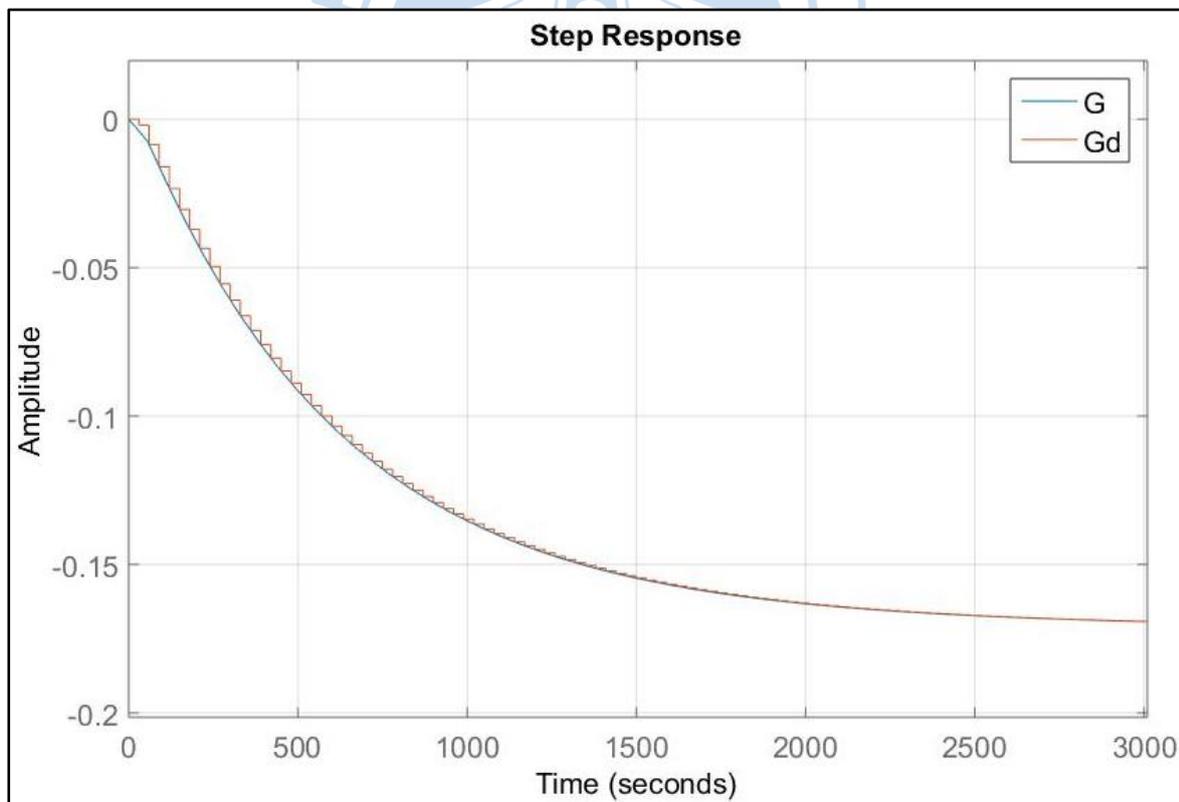


Figura 37. Respuesta ante entrada escalón unitario de los modelos en función de transferencia en continuo (azul) y discreto (rojo).

2.3. Cálculo del modelo CARIMA del sistema de refrigeración. Se asume que para el cálculo del modelo CARIMA no se tomará en cuenta el modelo del error calculado anteriormente. Se usará un modelo de ruido blanco del error según la formulación del Controlador Predictivo GPC y asumiendo el polinomio $C=1$.

De la ecuación

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-d}B(Z^{-1})u(t-1) + C(Z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta}$$

Se multiplica por Δ se obtiene:

$$\bar{A}(Z^{-1})y(t) = Z^{-d}B(Z^{-1})\Delta u(t-1) + e(t)$$

Siendo:

$$\bar{A}(Z^{-1}) = \Delta A(Z^{-1})$$

Se asume que el numerador de es $B(Z^{-1})$ y el denominador $\bar{A}(Z^{-1})$ de $G_d(z)$

$$\begin{aligned} (1 - 2.175z^{-1} + 1.388z^{-2} - 0.213z^{-3})y(t) \\ = (-0.002003 - 0.002183z^{-1} + 0.003999z^{-1} + 0.0001861z^{-3}) \\ \Delta u(t-1) + e(t) \end{aligned}$$

2.4. Implementación del modelo en SIMULINK. A continuación se muestran representadas en diagrama de bloques en la **Figura 38**. Al ser un modelo obtenido a para un cierto rango de valores de operación, a la entrada se le tiene que restar el valor nominal de entrada y a la salida el valor nominal de salida. De esta manera del modelo se obtiene la respuesta de las variaciones respecto a los valores nominales.

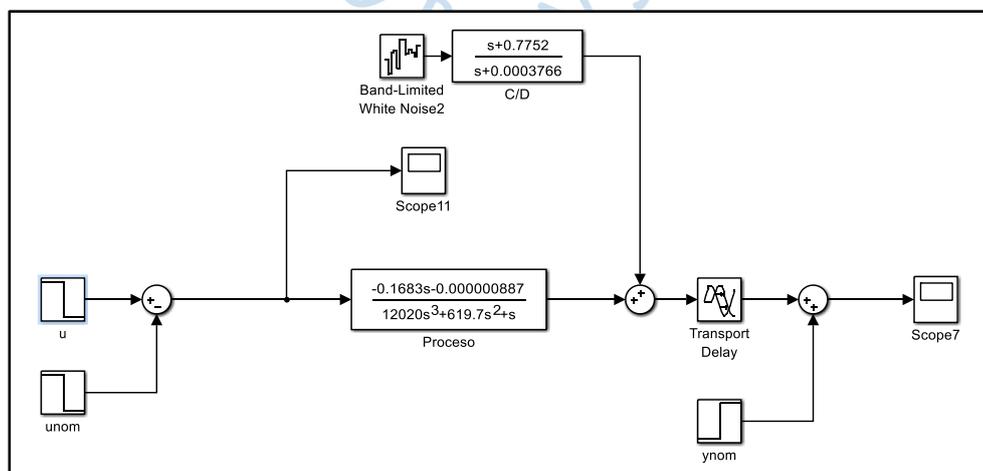


Figura 38. Modelo en Simulink del sistema de Refrigeración

Este modelo se usara como planta de pruebas para realizar las simulaciones de control a lazo cerrado con las estrategias ON-OFF, control Proporcional Integral Derivativo (PID) y *Generalized Predictive Control* (GPC).

2.5. Implementación de Controlador GPC. Se construyeron los siguientes diagramas de bloques en SIMULINK para la simulación del controlador GPC. En la **Figura 39** se muestra el controlador GPC en discreto con la estructura RST. En la **Figura 40**, se puede observar el diagrama de bloques del sistema a lazo cerrado.

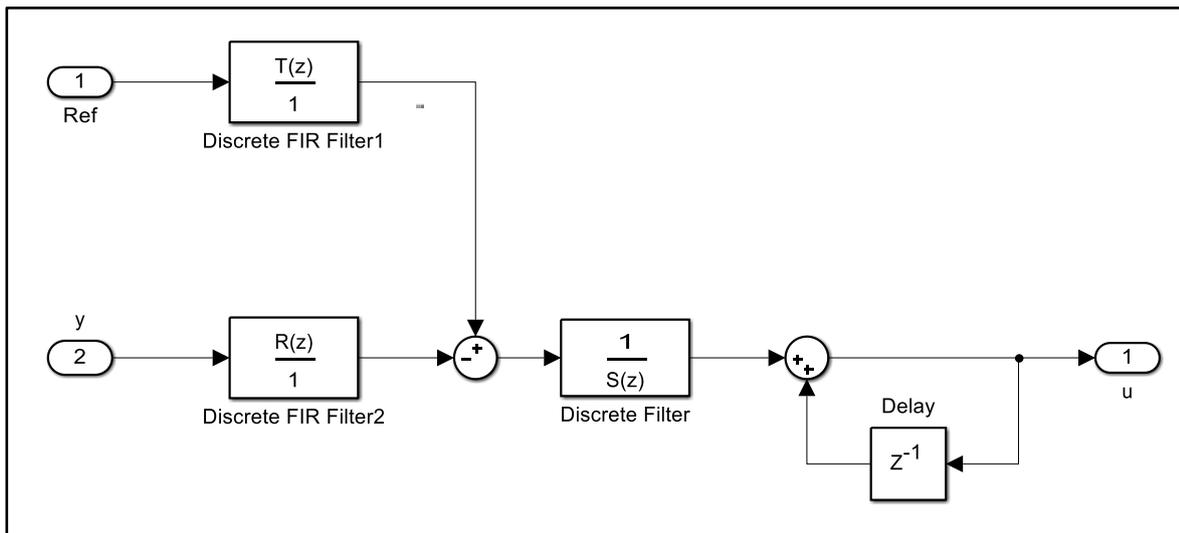


Figura 39. Diagrama de bloques del controlador GPC

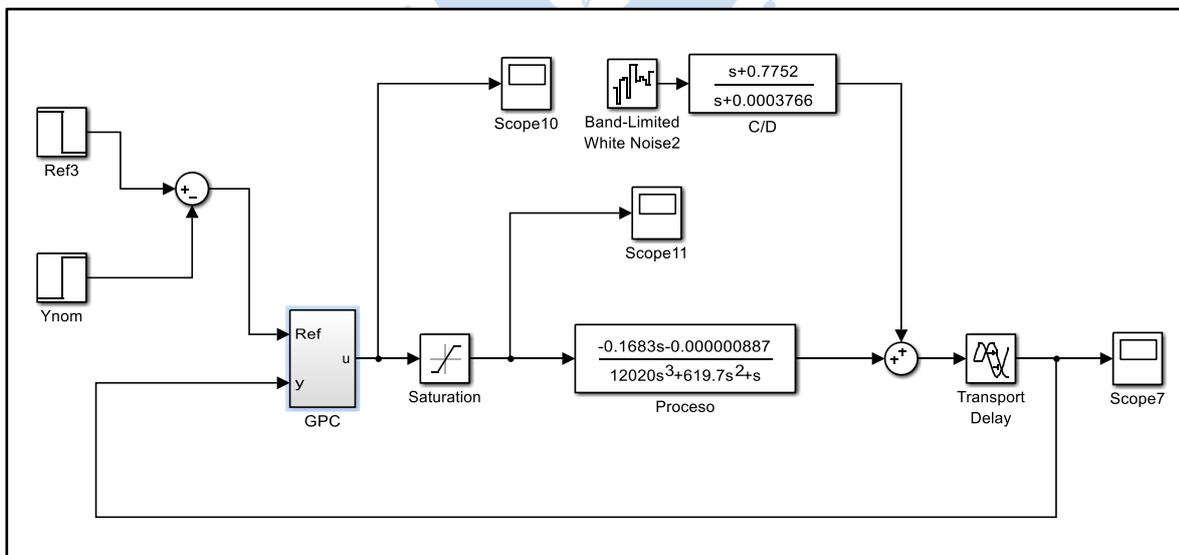


Figura 40. Diagrama de bloques del control GPC

El sistema a lazo cerrado se sintonizó, con los siguientes parámetros, horizonte de control de 3, horizonte de predicción de 10 y lambda 2, para un periodo de muestreo de 30 s, se obtuvieron los siguientes parámetros:

$$R = [1.0000 \quad -0.0058 \quad -0.0230 \quad -0.0010]$$

$$S = [-6.9020 \quad 13.5078 \quad -7.9466 \quad 1.1797]$$

$$T = -0.1610$$

En la **Figura 41** se muestra la respuesta de controlador frente a un cambio de referencia y disturbio de amplitud máxima de 0.2°C . El sistema presenta una respuesta sobre amortiguada con tiempo de establecimiento de 50 min, presenta un cambio suave de la variable manipulable frente a cambio de referencia. El disturbio genera una variación de la variable controlable de aproximadamente $\pm 0.02^\circ\text{C}$. La variable manipulable presenta un comportamiento con variación de $\pm 0.05\text{ Hz}$.

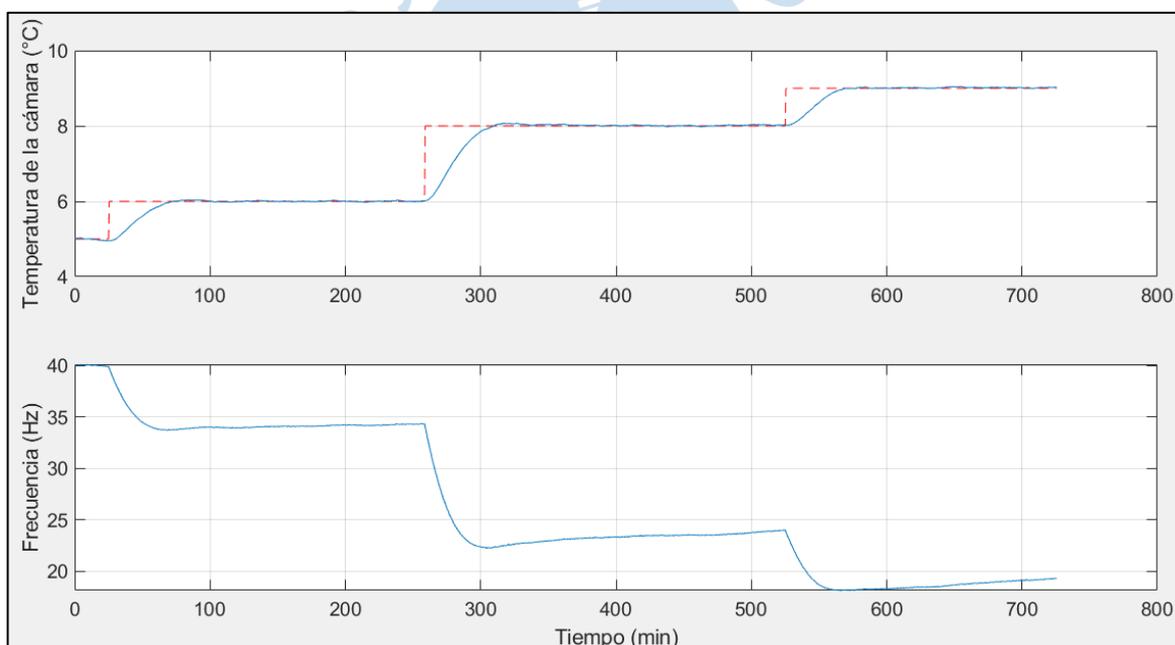


Figura 41. Respuesta del controlador GPC.

3. Control ON OFF

EL controlador *on/off* se caracteriza por tener una señal de comando en dos estados. Esto se ve en la **Figura 42** donde e es el error de control y u es la variable de entrada el proceso a controlar [25]. En sistemas con elementos no lineales de este tipo se presentan oscilaciones conocidas como ciclo límite que depende del diseño del controlador.

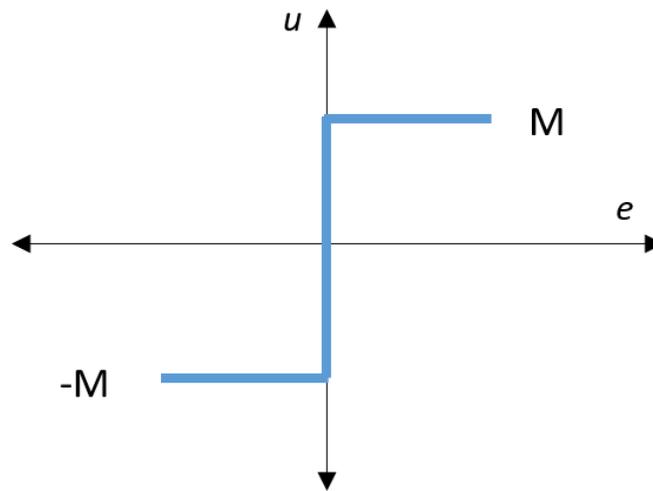


Figura 42. Esquema del controlador on/off

Matemáticamente se puede describir de la siguiente manera [25]:

$$u(t) = \begin{cases} U_{max} = M & \text{si } e(t) > 0 \\ U_{min} = -M & \text{si } e(t) < 0 \end{cases}$$

Donde U_{max} es el valor máximo de u , y U_{min} es el valor mínimo de u , que se corresponden con los valores M y $-M$ de la **Figura 42**.

Se sintoniza un controlador para una salida en un punto alto de 87 Hz y una salida en un punto bajo de 0 Hz en la velocidad de compresor que corresponde a una desviación de la variable controlable de $+0.5$ °C y -0.5 °C respectivamente. En la **Figura 43** se muestra el diagrama de bloques de controlador ON-OFF, desarrollado en Simulink.

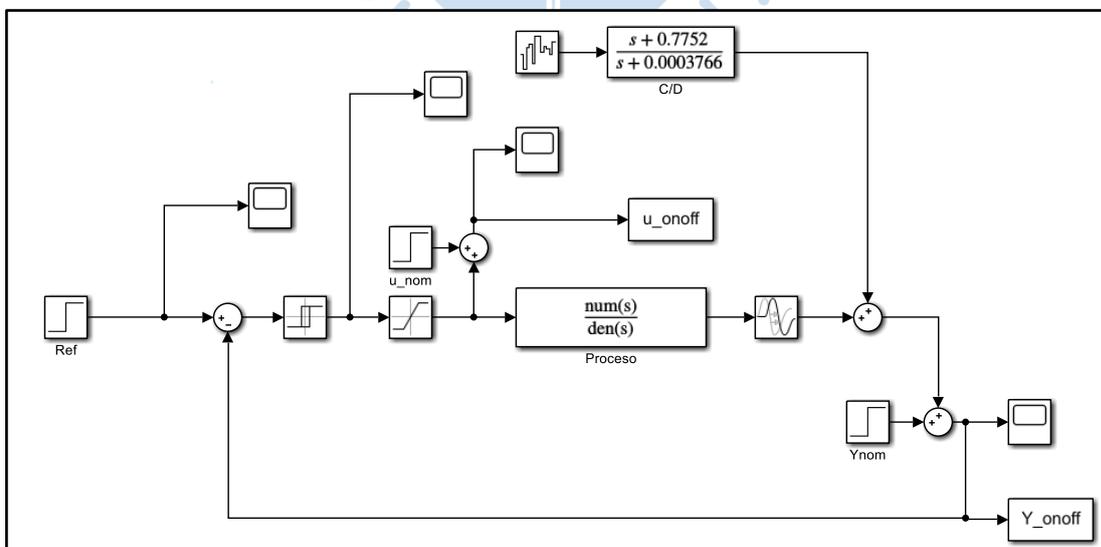


Figura 43. Diagrama de bloques de Estrategia de Control ON OFF

En la **Figura 44** se muestra la respuesta de controlador frente a un cambio de referencia y disturbo de amplitud máxima de 0.2°C , el sistema presenta una respuesta oscilatoria con un error aproximado de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. El disturbo no afecta al controlador.

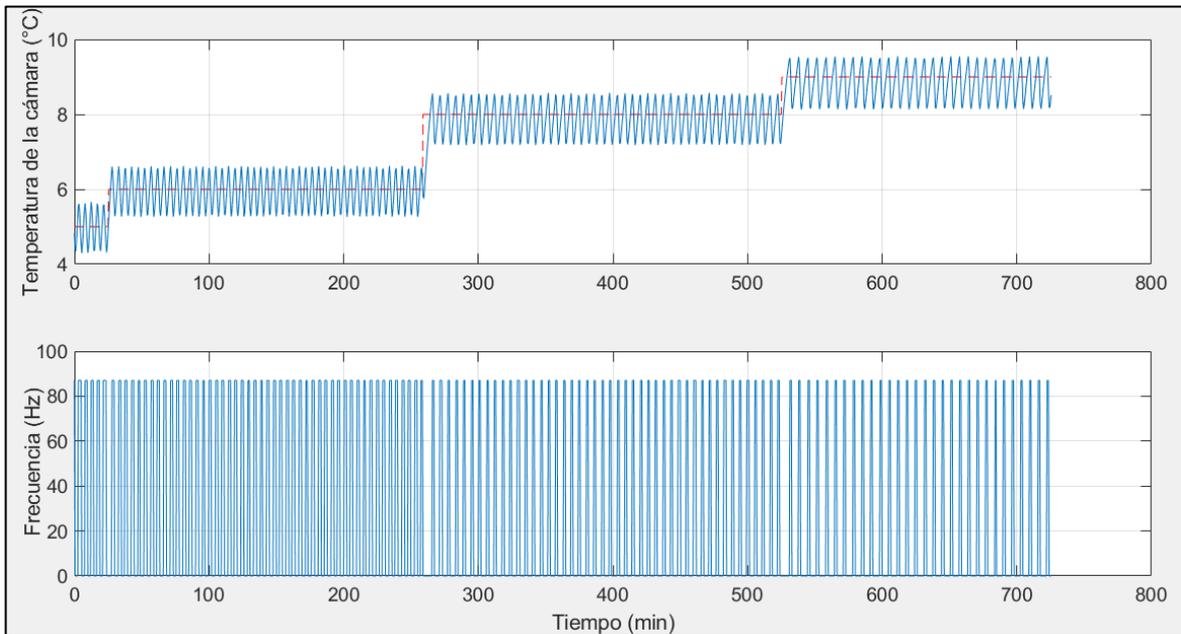


Figura 44. Respuesta de controlador on off

4. Control PID

La Estrategia de *Control Proporcional Integral Derivativo (PID)*, es uno de los controladores más ampliamente usado en la industria, más del 90 % de las aplicaciones industriales lo utilizan. La razón de esto es su fácil simplicidad, fácil diseño y buen desempeño en buena parte de los procesos. Otras ventajas son que garantiza error nulo, es robusto y sus parámetros se pueden interpretar de forma intuitiva [25].

En la **Figura 45** se muestra un esquema de control a lazo cerrado donde C representa al controlador y P al proceso. La variable r representa a la referencia, e al error, u a la variable de entrada al proceso y y a la variable de salida.

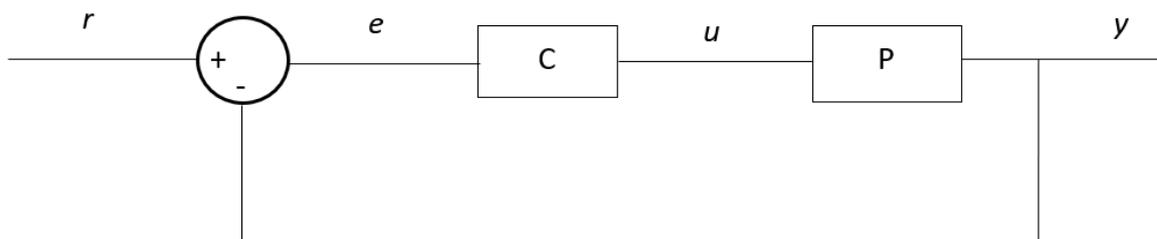


Figura 45. Diagrama de bloques a lazo cerrado de un controlador

El PID consta de tres partes principales que son: la acción proporcional, la acción integral y la acción derivativa. En la siguiente ecuación, se presenta el controlador PID más simple, en la que K , T_i y T_d son parámetros de diseño del PID.

$$u(t) = K \left[e(t) + \int_{t_0}^t \frac{e(t)}{T_i} dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

La implementación de la Estrategia de Control PID, se ha implementado mediante diagramas de bloques en SIMULINK y así, poder realizar las simulaciones respectivas.

En la **Figura 46** se muestra el controlador PID en discreto con la parte derivativa desacoplada y, en la gráfica 5.18, se puede observar el diagrama de bloques del sistema a lazo cerrado.

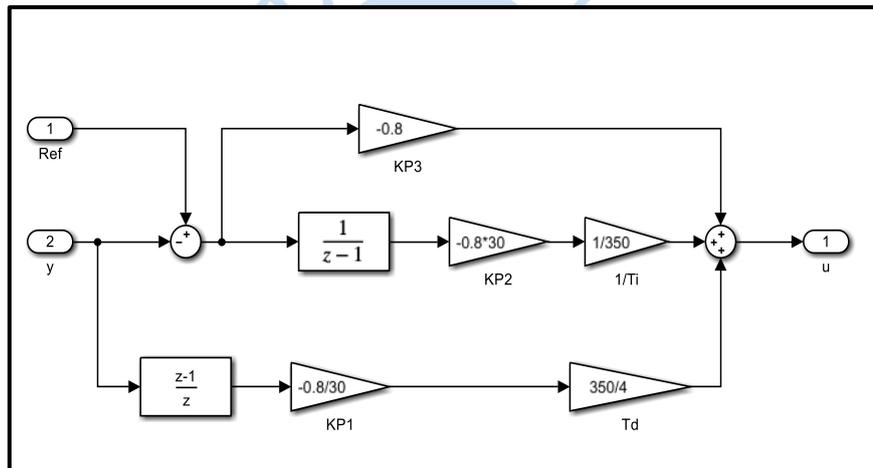


Figura 46. Diagrama de bloques del controlador PID en discreto

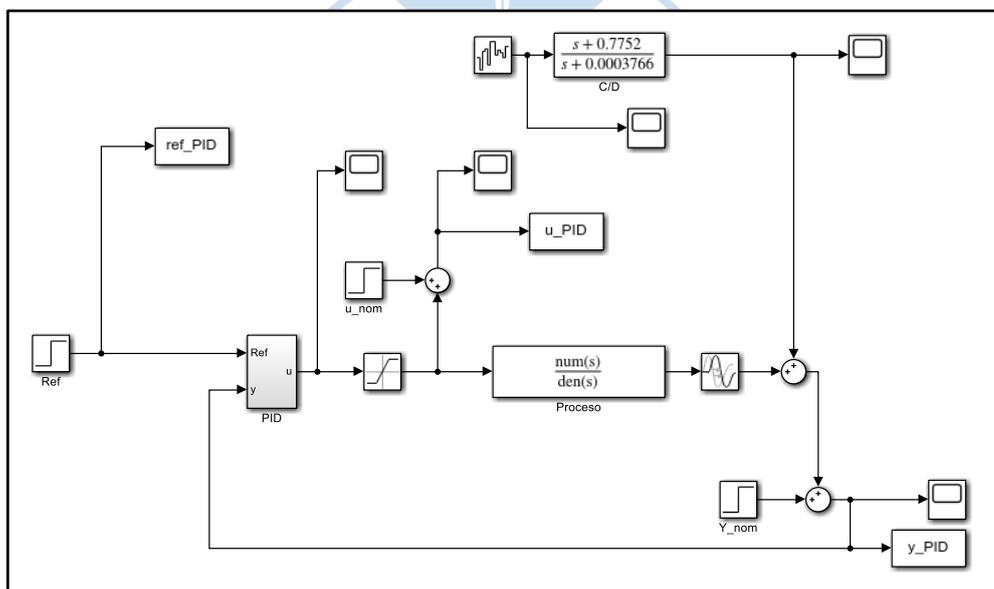


Figura 47. Implementación del Controlador PID al proceso.

4.1. Controlador PID con desacople de parte derivativa. De la literatura recogida para esta investigación, postulan que el Controlador PID, sin utilizar la parte derivativa, tiene buenas prestaciones en los procesos de refrigeración. De esta forma, en el presente estudio, se va a evaluar al Controlador PI.

Se tomó para la sintonización del proceso el sistema sin retardo, comparado con las dinámicas de proceso este representa menos del 3%. Se define la nueva función de transferencia a lazo de cerrado a partir del diagrama de bloques de la **Figura 48**. Esta es un diagrama modificado que separa la parte derivativa de controlador PID.

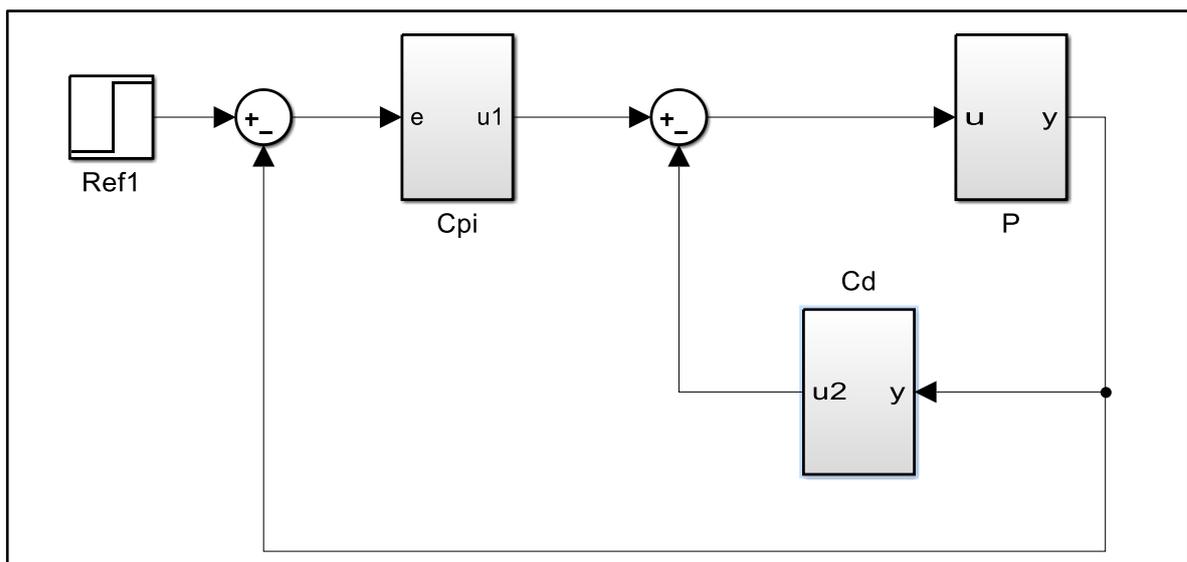


Figura 48. Diagrama de bloques a lazo cerrado de un control PID con desacople de parte derivativa

Donde $P(s)$ es el proceso:

$$C_{pi} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right)$$

$$C_d = K_p T_d s$$

Se obtiene la siguiente relación:

$$Y(s) = \left((R(s) - Y(s))C_{pi} - C_d Y(s) \right) P(s)$$

La función de transferencia a lazo cerrado queda resulta:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_{pi} P}{1 + (C_{pi} + C_d) P}$$

Siendo un controlador ideal reemplazamos:

$$C_{pid} = C_{pi} + C_d$$

Donde:

$$C_{pid} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$$

De donde podemos obtener:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_{pi}P}{1 + C_{pid}P}$$

4.2. Sintonización de controlador PI. El controlador PI se ha sintonizado por medio de la asignación de polos a lazo cerrado, el sistema puede despreciar el retardo, como se muestra en la ecuación siguiente.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-0.1683 s - 0.0000008877}{12020 s^3 + 619.7 s^2 + s}$$

Se tiene un modelo de la forma:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

La estructura del controlador PID con parte derivativa desacoplada se representa por la función de transferencia de la ecuación:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{C_{pi}P}{1 + C_{pid}P}$$

Se realizó el proceso de Discretización del controlador PID para un tiempo de muestro de 30 s, según la ecuación siguiente.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p T_s}{T_i} \frac{z}{z-1} e(t) + \frac{K_p T_d}{T_s} \frac{z-1}{z} y(t)$$

Se sintonizó el controlador para dar respuesta sobre-amortiguada con una constante de tiempo equivalente de 3000 s. no se considera una constante de tiempo más corto porque hace que la variable manipulable presente un pico ante el cambio de referencia. Este

comportamiento empeora el desempeño del controlador. Obteniéndose los siguientes parámetros:

$$K_p = -8$$

$$T_i = 350$$

$$T_d = 125$$

4.3. Simulación de control PID. En la **Figura 49** se muestra la respuesta de controlador frente a un cambio de referencia y disturbo de amplitud máxima de 0.2°C . El sistema presenta una respuesta sobre amortiguada con tiempo de establecimiento de 100 min, presenta un cambio repentino de la variable manipulable frente a cambio de referencia. El disturbo genera una variación de la variable controlable de aproximadamente $\pm 0.02^\circ\text{C}$. A pesar del disturbo la variable manipulable presenta un comportamiento suave frente a estos.

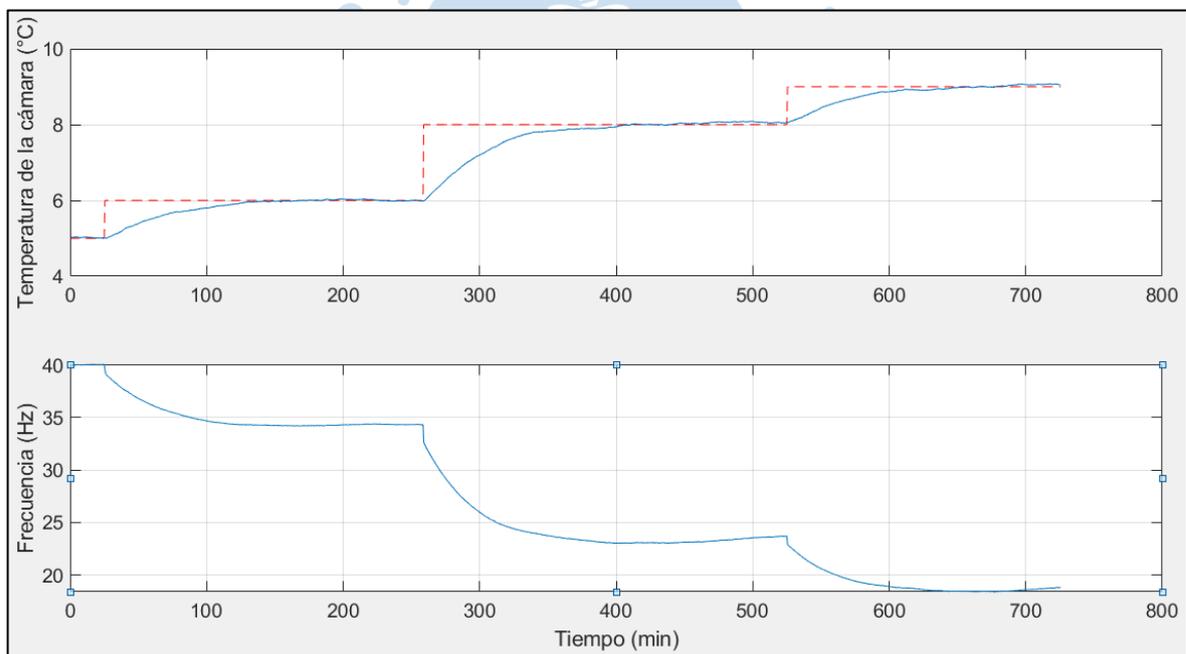


Figura 49. Respuesta del controlador PID

5. Análisis de los controladores

En la **Figura 50** se muestran la gráfica que compara los controladores, con el controlador GPC se logra un menor tiempo de establecimiento, y con una respuesta de la variable manipulable sin picos ante cambios de referencia. También tiene una respuesta adecuada frente a ruido blanco en la salida.

En controlador GPC presente el mejor desempeño frente a cambios de referencia y ruido en la salida. Logrado un tiempo de establecimiento de 50 min y una variación de $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ en la variable de control.

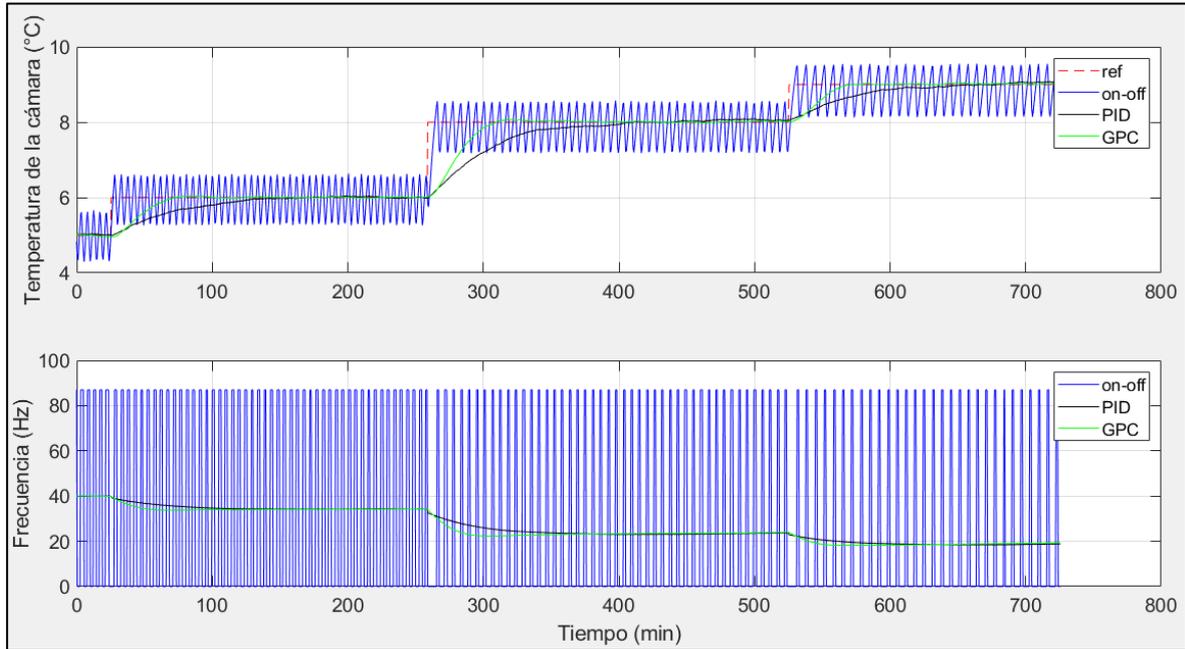


Figura 50. Respuestas de los controladores

Conclusiones

En el Perú, el sector agroexportador está en crecimiento, dentro de este campo, el área de la cadena de frío tiene alta importancia, porque, es el responsable de dilatar la maduración de la fruta hasta la llegada a su destino final.

Los sistemas de refrigeración en la Industria, utiliza un control tradicional de encendido y apagado que, provoca un consumo de energía eléctrica igual a 40%-50% del consumo total. Esto justifica, el estudio de técnicas de control automatizadas modernas.

La tesis se ha ejecutado en la data obtenida en una planta piloto, que se ha construido con características muy similares a las utilizadas en la Agroexportadoras (aislantes, evaporadores, condensadores, etc.); Dicha planta piloto tiene dos toneladas de capacidad, por lo que se garantiza cierta fiabilidad en los resultados.

Se ha utilizado la identificación del proceso, con el enfriamiento y conservación de mango de exportación, colocado en envases utilizados para la exportación.

En controlador GPC presente el mejor desempeño frente a cambios de referencia y ruido en la salida. Logrado un tiempo de establecimiento de 50 min y una variación de $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ en la variable de control.

Diseñar un controlador PID que dé respuestas a lazo cerrado con constantes de tiempo menores a 3000 segundos provoca la aparición de un pico en la variable manipulable, esto deteriora el desempeño del controlador e imposibilita su implementación.



Referencias

- [1] Y. Çengel y M. Boles, Termodinámica, 7 ed., The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011, p. 1041.
- [2] J. M. Calm y G. C. Hourahan, Physical, Safety, and Environmental Data for Current and Alternative Refrigerants, Praga, 2011, p. 22.
- [3] Diario Gestión, «Perú puede ser una potencia mundial en agroexportación en cinco años, estima ministro Ghezzi.,» Diario Gestión, 6 febrero 2015.
- [4] F. Cillóniz, Interviewee, Piura es la región agroindustrial que más crece en el país y el mundo. [Entrevista]. 9 Julio 2014.
- [5] W. Saeys, L. León Gutiérrez y S. Evain, Ripeness (6th meeting CROPS), Munich, 2013, p. 60.
- [6] W. Ipanqué Alama, Control automático de procesos, Piura: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - CONCYTEC, 2012.
- [7] D. W. Clarke, C. Mohtadi y P. S. Tuffs, «Generalized Predictive Control Part I. -The Basic Algorithm,» Automatica, vol. 23, n° 2, pp. 137-148, 1987.
- [8] DuPont, Thermodynamic thermal properties of DuPont Suva 410a refrigerant, 2004.
- [9] J. A. Barreiro y A. J. Sandoval, Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas, EQUINOCCIO, 2006.
- [10] K. K. Sørensen, M. J. Skovrup, L. M. Jessen y J. Stoustrup, «Modular modeling of a refrigeration container,» International Journal of Refrigeration, vol. 55, pp. 17-29, 2015.
- [11] A. A. Maia, R. N. Koury y L. Machado, «Development of a control algorithm employing data generated by a white box mathematical model.,» Applied Thermal Engineering, vol. 54, n° 1, pp. 120-130, 2013.
- [12] K. A. Manske, D. Reindl y S. Klein, «Evaporative Condenser Control in Industrial Refrigeration Systems,» International Journal of Refrigeration, vol. 24, n° 7, pp. 676-691, 2001.
- [13] C. Petre, M. Feidt, M. Costea y S. Petrescu, «A model for study and optimization of real-operating refrigeration machines,» International Journal of Energy Research, vol. 33, p. 173–179, 2009.
- [14] L. C. Martinho, J. V. Vargas, W. Balmant y J. C. Ordonez, «A single stage absorption refrigeration system dynamic mathematical modeling, adjustment and experimental validation,» International Journal of Refrigeration, vol. 68, pp. 130-144, 2016.
- [15] Y. Shang, A. Wu y X. Fang, «A study on the modeling of the minimal stable superheat for a variable speed refrigeration system,» International Journal of Refrigeration, vol. 59, p. 182–189, 2015.
- [16] K. K. Sørensen, J. Stoustrup y T. Bak, «Adaptive MPC for a reefer container,» Control Engineering Practice, vol. 44, pp. 55-64, 2015.

- [17] H. Li, s.-K. Jeong, J.-I. Yoon y s.-S. You, «An empirical model for independent control of variable speed refrigeration system,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1918-1924, 2008.
- [18] D. E. Andrade y C. O. Negrao, «Analysis of start-up tests of household refrigeration systems. A potential for on-line predictions of test results,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, pp. 255-263, 2013.
- [19] H. Qiao, V. Aute y R. Radermcher, «Comparison of Equation-Based and Non-Equation-Based Approaches for Transient Modeling of a Vapor Compression Cycle,» de *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, Purdue, 2012.
- [20] R. Halvgaard, N. K. Poulsen, H. Madsen y J. B. Jørgensen, «Economic Model Predictive Control for Building Climate Control in a Smart Grid,» de *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, , 2012.
- [21] C. A. Piedrahita-Velásquez, H. J. Ciro-Velásquez y M. A. Gómez-Botero, «Identification and digital control of a household refrigeration system with a variable speed compressor,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 48, pp. 178-187, 2014.
- [22] S. E. Shafiei, H. Rasmussen y J. Stoustrup, «Modeling Supermarket Refrigeration Systems for Supervisory Control in Smart Grid,» de *American Control Conference (ACC)*, 2013, 2013.
- [23] H. Rasmussen y L. F. Larsen, «Non-linear and adaptive control of a refrigeration system,» *I E T Control Theory and Applications*, vol. 5, n° 2, pp. 364-378, 2011.
- [24] R. Koury, L. Machado y K. Ismail, «Numerical simulation of a variable speed refrigeration system,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 24, pp. 192-200, 2001.
- [25] DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, AUTOMÁTICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, *Sistemas muestreados*, Madrid.