



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño e implementación de un control PID IMC para planta piloto de refrigeración

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Laura Carrasco Jiménez

Asesor:
Dr. Ing. William Ipanaqué Alama

Piura, mayo de 2020





Gracias a mis padres, Pedro y Brenda, por ser mis incansables consejeros.

Gracias a mis hermanas, Natalia, Celinda y Brenda, por su grata compañía y apoyo incondicional.



Resumen Analítico-Informativo

Diseño e implementación de un control PID IMC para planta piloto de refrigeración

Laura Carrasco Jiménez

Asesor(es): Dr. Ing. William Ipanaqué Alama

Tesis.

Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Mayo de 2020

Palabras claves: Identificación de Sistemas / Modelación empírica / Control PID / Estructura IMC / Refrigeración.

Introducción: El presente estudio se ha realizado en la planta piloto de refrigeración industrial de la Universidad de Piura. Como otras plantas de refrigeración industrial, esta también se opera con un sistema de control de Encendido/Apagado (ON/OFF), el cual genera uno de los mayores gastos en cualquier planta de empaquetado de frutas (en este caso se trata del banano orgánico), debido al consumo de energía de los equipos, como el motor del compresor. Por lo tanto, es importante diseñar e implementar un control avanzado en esta planta de refrigeración industrial, lo cual contribuirá en que se logren ahorros en el consumo de energía.

Metodología: Para alcanzar el objetivo de la tesis, se tuvo que abordar la modelación del sistema de refrigeración, el diseño e implementación de la parte de control automático. Se realizaron tres experimentos; el objetivo del primer experimento con entrada escalón es determinar el intervalo de trabajo de las frecuencias del motor del compresor para llegar a un valor deseado de temperatura de dicho túnel. Se consideraron las siguientes variables: frecuencia del motor del compresor, temperatura del túnel de refrigeración, la temperatura del ambiente y la potencia del motor del compresor. El segundo experimento se realizó con señales de entrada de pulso binario (en inglés *Pseudo-Random Binary Sequence* “PRBS”) y el tercer experimento se realizó con señales de entrada de pulso aleatorio (en inglés *Pseudo Random Sequence* “PRS”). Con los datos obtenidos de los experimentos se obtuvo un modelo utilizando el *System Identification Toolbox* en MATLAB, para representar el sistema a controlar. Con la elección del modelo y en base a una estructura de modelo de control interno (IMC) mediante *Simulink* en MATLAB se pudo diseñar el control proporcional, integral, derivativo (PID).

Resultados: Se logró el diseño y la implementación de un PID IMC en un lazo cerrado de control. Obtener ahorro de energía con el uso de este control del orden de un 20% con respecto a todo el sistema. Presentar una metodología para el diseño de un PID IMC. Controlar la temperatura del túnel de refrigeración de la planta piloto con la implementación del PID IMC.

Conclusiones: Se logró implementar el PID IMC en la planta piloto de refrigeración industrial de la UDEP. El controlador demostró versatilidad en su sencilla implementación utilizando el software LabView. Así como, buena robustez por su buen desempeño en alcanzar el *set point* con error nulo y se evaluó su buen comportamiento frente a cambios en dicha temperatura de túnel estacionaria en °C. Se evaluó con un modelo lineal y también se obtuvieron buenos resultados por el tolerable rango de trabajo del dispositivo (25 Hz - 70Hz, 12°C - 14°C).

Fecha de elaboración del resumen: 3 de Mayo de 2020

Analytical-Informative Summary

Diseño e implementación de un control PID IMC para planta piloto de refrigeración

Laura Carrasco Jiménez

Asesor(es): Dr. Ing . William Ipanaqué Alama.

Tesis

Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Mayo de 2020

Keywords: System Identification / Empirical modeling / PID Controller / IMC Structure / Refrigeration.

Introduction: This study has been carried out at the industrial refrigeration pilot plant of the University of Piura. Like other industrial refrigeration plants, it is also operated with an ON/OFF control system, which generates one of the highest expenses in any fruit packaging plant (in this case it is the organic banana), due to the energy consumption of the equipment, such as the compressor motor. Therefore, it is important to design and implement advanced control in this industrial refrigeration plant, which will contribute to savings in energy consumption.

Methodology: To achieve the objective of the thesis, the modeling of the cooling system, the design and implementation of the automatic control part had to be addressed. Three experiments were performed. The objective of the first experiment with step frequency input is to determine the working range of the compressor motor frequencies to reach a desired temperature value of the tunnel. The following variables were considered: frequency of the compressor motor, temperature of the cooling tunnel, ambient temperature and the power of the compressor motor. The second experiment was performed with Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS) input signals and the third experiment was performed with Pseudo Random Sequence (PRS) input signals. With the data obtained from the experiments, a model was obtained using the System Identification Toolbox in MATLAB, to represent the system to be controlled. By choosing the model and based on an internal control model (IMC) structure using Simulink in MATLAB, it was possible to design proportional, integral, and derivative (PID) control.

Results: The design and implementation of a PID IMC was achieved in a closed control loop. Energy savings were obtained by using this control of the order of 20% with respect to the entire system. Present a methodology for the design of a PID IMC. Control the temperature of the cooling tunnel of the pilot plant with the implementation of the PID IMC.

Conclusions: The IMC PID was successfully implemented at the UDEP industrial refrigeration pilot plant. The controller demonstrated versatility in its simple implementation using LabView software. As well as, good robustness due to its good performance in reaching the set point with zero error and its good behavior against changes in the stationary tunnel temperature in °C. It was evaluated with a linear model and good results were also obtained due to the tolerable working range of the device (25Hz - 70Hz, 12 °C - 14 °C). For controllers with a greater working range, it is suggested in successive investigations and experiments to use another type of controller that includes the nonlinear model, such as predictive controls, a Wiener-Hammerstein approach or other alternatives that are in the literature.

Summary date: May 3rd 2020.

Prefacio

El presente tema de investigación “Diseño e implementación de un control PID IMC para planta piloto de refrigeración industrial”, se eligió como parte de un proyecto de innovación sobre las cámaras de conservación de frutas; para lo cual se ha usado un sistema de refrigeración industrial en una planta piloto dentro de la zona de investigación y experimentación en la Universidad de Piura.

Dicha planta piloto tiene un sistema de refrigeración construido para realizar experimentos con frutas, lo cual es de gran importancia debido a la contribución de resultados experimentales que pueden ser de aplicación en el medio agroindustrial.

El uso de controladores de temperatura genera un ahorro en el consumo energético; sin embargo, la mayoría de las agroindustrias que cuentan con sistemas de frío a nivel nacional aún siguen manteniendo un sistema de refrigeración convencional; por tener accionamientos *ON/OFF*, lo cual representa un mayor consumo de energía mensual, por lo que se requiere diseñar, modelar e implementar un control avanzado que produzca cambios significativos en el ahorro energético.

Por ello se planteó el diseño y la implementación de un control PID IMC en la planta piloto de refrigeración industrial, el cual aporta una alternativa de automatización para mejorar los accionamientos del proceso de control de temperatura y además de influir en la calidad del producto a procesar en la planta. La estrategia de control desarrollada ha dado buenos resultados a nivel de simulación y en su fase experimental. Esto fue respaldado por los resultados experimentales obtenidos al implementar el controlador diseñado en la planta piloto de refrigeración, en donde se puede comprobar un ahorro del 50% en el consumo de energía del motor del compresor y un ahorro del 20% a nivel general.

Quisiera mencionar que el desarrollo de esta tesis me ayudó a mejorar mis competencias prácticas en investigación e innovación, la información que pude obtener de la lectura de

artículos indexados fue buena. Creo que ha ayudado a mi formación como profesional en esta rama de la ingeniería.

Se brinda un especial agradecimiento a mi asesor el Dr. Ing. William Ipanaqué Alama. Así también a los ingenieros José Manrique, Jayro Paiva y Manuel Merino, por su apoyo en la realización de este proyecto. De igual manera, a la Universidad de Piura por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en estos años.



Tabla de Contenidos

Introducción	1
Capítulo 1 Descripción del sistema de refrigeración industrial	3
1.1 Generalidades	3
1.1.1 Motivación de la tesis.....	3
1.1.2 Metodología	5
1.2 Descripción del sistema.....	7
1.3 Estado del arte	15
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo general	19
1.4.2 Objetivos específicos.....	19
Capítulo 2 Marco teórico.....	21
2.1 Ciclo de refrigeración	21
2.2 Identificación y modelamiento de sistemas.....	24
2.3 Estrategias de Control.....	28
2.3.1 Estrategia de control PID	28
2.3.2 Estrategia de control <i>ON/OFF</i>	38
Capítulo 3 Diseño y desarrollo del modelo y del controlador del proyecto.....	39
3.1 Pruebas en la planta piloto con banano.....	39
3.1.1 Experimento N°1: Entrada escalón	40
3.1.2 Experimento N°2: Señal de entrada PRBS	41
3.1.3 Experimento N°3: Señal de entrada PRS	42

3.2	Identificación y Modelamiento del sistema	44
3.2.1	Modelo con la prueba PRBS	45
3.2.2	Modelo con la prueba PRS.....	53
3.3	Diseño del control PID IMC.....	62
3.4	Implementación del Control PID IMC	67
Capítulo 4 Interpretación de resultados.....		73
4.1	Análisis de los experimentos con entrada escalón.....	73
4.2	Análisis de los experimentos con señales de entrada PRBS.....	75
4.2.1	Primer conjunto	75
4.2.2	Segundo conjunto.....	80
4.2.3	Tercer conjunto.....	83
4.3	Análisis de los experimentos con señales de entrada PRS	89
4.3.1	Primer conjunto.....	89
4.3.2	Segundo conjunto.....	93
4.3.3	Tercer conjunto.....	97
4.4	Análisis del diseño del controlador PID IMC.....	104
4.5	Análisis de los resultados de la implementación del controlador PID IMC	107
4.5.1	Consumo de energía	109
Conclusiones		113
Recomendaciones.....		117
Referencias bibliográficas		119
Apéndices		121
Apéndice A. Códigos en MATLAB.....		122
Apéndice B. Mediciones de temperatura de los experimentos		123
Apéndice C. Guía de operación del sistema.....		127
Apéndice D. Diagrama de bloques en SIMULINK – MATLAB.....		139
Apéndice E. Diagramas de bloques en LABVIEW		140

Apéndice F. Panel Frontal N°1 del diagrama de bloques en LABVIEW	141
Apéndice G. Panel Frontal N°2 del diagrama de bloques en LABVIEW.....	142





Lista de Figuras

Figura 1. Distribución porcentual de las 6500 hectáreas certificadas de Banano Orgánico en el año 2014.	4
Figura 2. Exportación del banano orgánico. Datos más recientes de noviembre 2019.	4
Figura 3. Diagrama del experimento con entrada escalón.	5
Figura 4. Detalle del Experimento con señales de entrada PRBS.	6
Figura 5. Detalle de los experimentos con señales de entrada PRS.	7
Figura 6. Vista de Planta del Sistema. Todas las unidades están en mm.	8
Figura 7. Distribución de la Sala de Control. Dos escritorios, dos sillas, un aire acondicionado propio y un monitor con teclado, mouse y CPU.	8
Figura 8. Distribución Interna del tablero. Todas las medidas están en mm.	9
Figura 9. Ethernet Basic PLC.	10
Figura 10. Características del modelo del PLC.	10
Figura 11. Módulo CO-01AC.	11
Figura 12. Características de las fuentes de energía del PLC.	11
Figura 13. Módulo CO-04RTD.	12
Figura 14. Características de las entradas analógicas del PLC.	12
Figura 15. Módulo CO-4AD2DA-2.	13
Figura 16. Características de los módulos de entradas y salidas analógicas del PLC.	13
Figura 17. Vista de la plataforma de monitoreo de Sitrad.	15
Figura 18. Esquema de un ciclo de refrigeración ideal por compresión de vapor.	22
Figura 19. Diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.	23
Figura 20. Diagrama T-s para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor.	23
Figura 21. Señal <i>Pseudo-Random Binary Sequence</i>	25
Figura 22. Señal PRS.	25
Figura 23. Ventana de trabajo de “ <i>System Identification Toolbox™</i> ”.	26

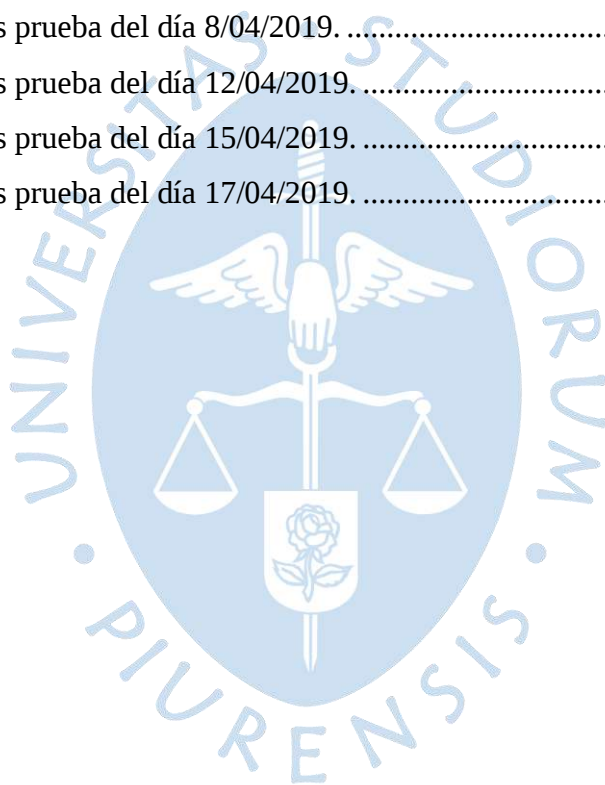
Figura 24. Diagrama de flujo para la identificación.....	28
Figura 25. Esquema de control a lazo cerrado.	29
Figura 26. Comportamiento del actuador de un controlador proporcional.	30
Figura 27. Esquema del lazo cerrado con controlador PID.....	31
Figura 28. Diagrama de bloques de un PID.	32
Figura 29. Deducción de la función de transferencia de un proceso de primer orden con respuesta a entrada escalón.....	34
Figura 30. Estructura de control PID IMC.	35
Figura 31. Respuesta de la variable del proceso frente a un controlador <i>ON/OFF</i>	38
Figura 32. Banano Orgánico dentro del túnel de enfriamiento.	40
Figura 33. Esquema de control a lazo cerrado.	44
Figura 34. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	45
Figura 35. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	45
Figura 36. Ajuste de modelos experimentales.	45
Figura 37. Análisis de residuos.	45
Figura 38. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	46
Figura 39. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	46
Figura 40. Ajuste de modelos experimentales.	46
Figura 41. Análisis de residuos.	46
Figura 42. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	47
Figura 43. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	47
Figura 44. Ajuste de modelos experimentales.	47
Figura 45. Análisis de residuos.	47
Figura 46. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	48
Figura 47. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	48
Figura 48. Ajuste de modelos experimentales.	48
Figura 49. Análisis de residuos.	48
Figura 50. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	49
Figura 51. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	49

Figura 52. Ajuste de modelos experimentales.	49
Figura 53. Análisis de residuos.	49
Figura 54. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	50
Figura 55. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	50
Figura 56. Ajuste de modelos experimentales.	50
Figura 57. Análisis de residuos.	50
Figura 58. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	51
Figura 59. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	51
Figura 60. Ajuste de modelos experimentales.	51
Figura 61. Análisis de residuos.	51
Figura 62. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	52
Figura 63. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	52
Figura 64. Ajuste de modelos experimentales.	52
Figura 65. Análisis de residuos.	52
Figura 66. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.....	53
Figura 67. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	53
Figura 68. Ajuste de modelos experimentales.	53
Figura 69. Análisis de residuos.	53
Figura 70. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	54
Figura 71. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	54
Figura 72. Ajuste de modelos experimentales.	54
Figura 73. Análisis de residuos.	54
Figura 74. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	55
Figura 75. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	55
Figura 76. Ajuste de modelos experimentales.	55
Figura 77. Análisis de residuos.	55
Figura 78. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	56

Figura 79. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	56
Figura 80. Ajuste de modelos experimentales.	56
Figura 81. Análisis de residuos.	56
Figura 82. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	57
Figura 83. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	57
Figura 84. Ajuste de modelos experimentales.	57
Figura 85. Análisis de residuos – Modelos del primer experimento con PRS.....	57
Figura 86. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	58
Figura 87. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	58
Figura 88. Ajuste de modelos experimentales.	58
Figura 89. Análisis de residuos.	58
Figura 90. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	59
Figura 91. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	59
Figura 92. Ajuste de modelos experimentales.	59
Figura 93. Análisis de residuos.	59
Figura 94. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	60
Figura 95. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	60
Figura 96. Ajuste de modelos experimentales.	60
Figura 97. Análisis de residuos.	60
Figura 98. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	61
Figura 99. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	61
Figura 100. Ajuste de modelos experimentales.....	61
Figura 101. Análisis de residuos.	61
Figura 102. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.....	62
Figura 103. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.	62
Figura 104. Ajuste de modelos experimentales.....	62
Figura 105. Análisis de residuos.	62
Figura 106. Diagrama de bloques de la estructura interna de control del modelo.	63

Figura 107. Funciones de transferencia que se agrupan para crear un subsistema en Simulink.	64
Figura 108. Subsistema del proceso en Simulink.	64
Figura 109. Diagrama de Bloques de la Estructura de Control PID-IMC en Simulink con el proceso como subsistema.	64
Figura 110. Resultados de la simulación con PID-IMC utilizando <i>PID Tuner</i> para la sintonización del controlador.	65
Figura 111. Resultados de la simulación con PID-IMC con $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos.	66
Figura 112. Resultados de la simulación con PID-IMC con $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980$ segundos.	66
Figura 113. Resultados de la simulación con PID-IMC con $K_p = -4.61$ y $T_i = 1980$ segundos.	67
Figura 114. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 23/01/2020, $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980$ segundos. <i>Set Point</i> = 12 °C.	68
Figura 115. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 24/01/2020, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos. <i>Set Point</i> = 12 °C.	68
Figura 116. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 03/02/2020.	69
Figura 117. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 12/02/2020.	69
Figura 118. Resultados prueba PID IMC con carga de banano del día 28/02/2020, $K_p = -13.836$, $T_i = 1980$ segundos, <i>Set Point</i> = 14 °C.	70
Figura 119. Resultados prueba PID IMC con carga de banano del día 2/03/2020, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos, <i>Set Point</i> = 12 °C.	70
Figura 120. Resultados prueba ON OFF con carga de banano del día 26/02/2020. <i>Set Point</i> = 12 °C.	71
Figura 121. Resultados prueba ON OFF con carga de banano del día 27/02/2020. <i>Set Point</i> = 14 °C.	71
Figura 122. Temperatura Estacionaria del Túnel vs Frecuencia del motor del compresor.	74
Figura 123. Ganancia Estática vs Frecuencia del motor del compresor.	74
Figura 124. Constante de Tiempo vs Frecuencia del motor del compresor.	74
Figura 125. Temperatura del Exterior vs Frecuencia del motor del compresor.	74
Figura 126. Ajuste de modelos experimentales.	104
Figura 127. Análisis de residuos.	104
Figura 128. Salida del controlador del sistema – Frecuencia del compresor (Hz).	105

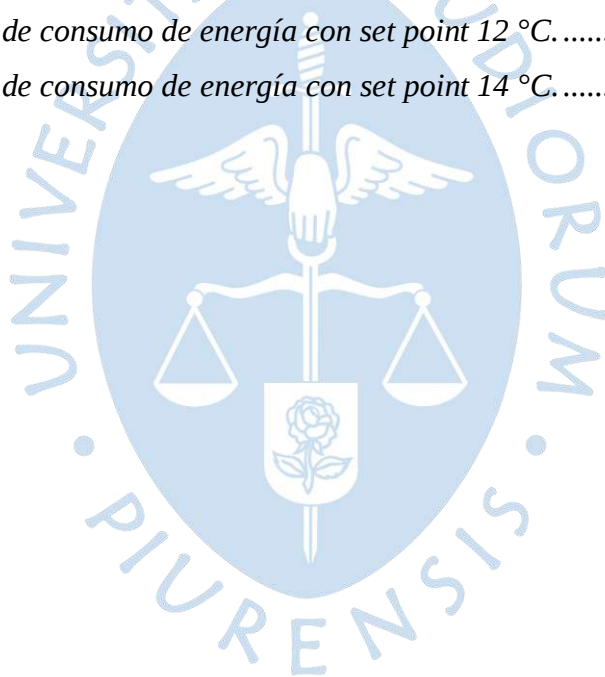
Figura 129. Error del sistema (°C). Diferencia entre la respuesta del sistema y el <i>set point</i> .	106
Figura 130. Respuesta del sistema – Temperatura del Túnel (°C).....	106
Figura 131. Potencia consumida en el compresor. En línea azul prueba con <i>ON/OFF</i> . En línea naranja prueba con PID IMC. <i>Set point</i> : 12 °C	110
Figura 132. Potencia consumida en el compresor. En línea azul prueba con <i>ON/OFF</i> . En línea naranja prueba con PID IMC. <i>Set point</i> : 14 °C	111
Figura 133. Resultados prueba del día 2/04/2019.	123
Figura 134. Resultados prueba del día 3/04/2019.	123
Figura 135. Resultados prueba del día 4/04/2019.	124
Figura 136. Resultados prueba del día 5/04/2019.	124
Figura 137. Resultados prueba del día 8/04/2019.	125
Figura 138. Resultados prueba del día 12/04/2019.	125
Figura 139. Resultados prueba del día 15/04/2019.	126
Figura 140. Resultados prueba del día 17/04/2019.	126



Lista de Tablas

Tabla 1. Datos de placa de la unidad Ecostar.	14
Tabla 2. Datos de placa del refrigerante R404 en la unidad Ecostar.....	14
Tabla 3. Comandos para la estimación offline.	27
Tabla 4. Sintonización de ZN a lazo cerrado.	32
Tabla 5. Método CHR frente a overshoot de 0%.	33
Tabla 6. Método CHR frente a disturbios 0%.	33
Tabla 7. Parámetros de sintonización del método de Cohen-Coon.....	34
Tabla 8. Resultados de los experimentos con señales PRBS.....	42
Tabla 9. Características de la señal PRS.	43
Tabla 10. Resultados de los experimentos con señales PRS.	43
Tabla 11. Resultados pruebas de entrada escalón a lazo abierto.....	74
Tabla 12. Gráficas de los resultados de los experimentos a entrada escalón.	74
Tabla 13. Datos de los modelos con el primer grupo de identificación.....	76
Tabla 14. Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación.	77
Tabla 15. Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación.....	78
Tabla 16. Datos de los modelos con el primer grupo de identificación.....	80
Tabla 17. Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación.....	81
Tabla 18. Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación.....	83
Tabla 19. Datos de los modelos con el primer grupo de identificación.....	84
Tabla 20. Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación.....	85
Tabla 21. Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación.....	87
Tabla 22. Datos de los modelos con el primer grupo de identificación.....	90
Tabla 23. Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación.....	91
Tabla 24. Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación.....	92
Tabla 25. Datos de los modelos con el primer grupo de identificación.....	94

Tabla 26. <i>Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación</i>	95
Tabla 27. <i>Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación</i>	96
Tabla 28. <i>Datos de los modelos con el primer grupo de identificación</i>	98
Tabla 29. <i>Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación</i>	99
Tabla 30. <i>Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación</i>	100
Tabla 31. <i>Valor de los parámetros de control por la variación del filtro τ_f</i>	105
Tabla 32. <i>Comparación de datos característicos de las pruebas con la implementación de PID IMC en vacío</i>	107
Tabla 33. <i>Comparación de datos característicos de las pruebas con la implementación de PID IMC con carga</i>	108
Tabla 34. <i>Controlador ON/OFF vs PID IMC. Set point: 12 °C</i>	109
Tabla 35. <i>Controlador ON/OFF vs PID IMC. Set point: 14 °C</i>	110
Tabla 36. <i>Evaluación de consumo de energía con set point 12 °C</i>	111
Tabla 37. <i>Evaluación de consumo de energía con set point 14 °C</i>	112



Introducción

Actualmente las industrias exportadoras de banano orgánico cuentan con sistemas de refrigeración convencionales, los cuales representan el mayor consumo de energía eléctrica en sus compañías, en su mayor parte son reguladores *ON/OFF*, por ello la conveniencia de experimentar metodologías alternativas que puedan reducir esos costos, buscando usar un equipo que exista en el mercado industrial.

Este trabajo de investigación propone el diseño de un controlador proporcional, integral, derivativo en base a una estructura de modelo de control interno (PID IMC), tomando como sistema una planta piloto de refrigeración industrial ubicada en la zona de investigación de la Universidad de Piura (UDEP). Los equipos e instrumentos usados son industriales.

En el primer capítulo se describen las generalidades del proyecto, la metodología a seguir para su realización y culminación; asimismo, se presentan los equipos e instrumentos presentes en el sistema y finalmente, se plantean los objetivos general y específicos del proyecto.

En el segundo capítulo se presentan las definiciones que son la base del proyecto, sobre el ciclo de refrigeración implementado, los conceptos básicos sobre identificación de sistemas, así como las estrategias de control, lo cual servirá para el desarrollo del proyecto.

El tercer capítulo se ha dividido en cuatro partes: experimentación, identificación, diseño e implementación del controlador. Se han realizado una serie de experimentos para determinar el rango de trabajo de la frecuencia del motor del compresor para llegar a la temperatura deseada en el túnel de enfriamiento; seguidamente, se realizan experimentos con señales de entrada PRBS y PRS (términos posteriormente a explicar). En base a los datos extraídos de las pruebas, se procede a la identificación y modelamiento del sistema. Posteriormente, se detalla el diseño del controlador PID IMC mediante simulación y su debida implementación en la planta piloto de refrigeración industrial.

En el cuarto capítulo se analizan los modelos obtenidos de la identificación por experimentos. Mediante la elección de uno se utiliza para el diseño del control y su posterior

implementación; de igual manera, se analizan los resultados de la implementación de dicho control.

Finalmente, se presentan las conclusiones de la tesis y las recomendaciones.

En el apéndice se adjuntan los códigos realizados en MATLAB, los resultados de las mediciones de cada uno de los experimentos, se presenta una guía de operación del sistema de control; finalmente, se muestra el diagrama de bloques en Simulink de MATLAB y el diagrama de control (SCADA) en LabView.



Capítulo 1

Descripción del sistema de refrigeración industrial

1.1 Generalidades

El uso de controladores de temperatura en las industrias de frío para refrigeración y conservación de fruta puede, con un buen diseño, contribuir en un ahorro en el consumo energético; sin embargo, en este tipo de industrias a nivel nacional aplican un sistema convencional *ON/OFF* podrían estar asumiendo un mayor consumo de energía mensual como se verá más adelante en el desarrollo de este trabajo, que ha requerido modelar, diseñar e implementar un control avanzado que produzcan cambios significativos; es decir, generen ahorro.

1.1.1 Motivación de la tesis

En el sector agroindustrial, hay empresas que cuentan con un sistema de frío, el cual genera uno de los costos importantes por el consumo de energía de sus equipos y que se afronta en los productos que van para la exportación. El presente tema de tesis estudia una alternativa del control automático que se puede aplicar a cámaras de conservación de frutas. Se ha tomado como planta piloto un sistema de refrigeración industrial que se tiene en la zona de investigación y experimentación en la Universidad de Piura.

Dicha planta tiene un sistema de refrigeración construido especialmente para realizar experimentos con frutas que posteriormente pueden ser aplicados en las industrias de frío, por lo cual tiene una gran importancia debido a la influencia que puede tener en el medio agroindustrial.

Se decidió trabajar con el banano orgánico, como fruta para refrigerar, el cual cuenta con 15,000 hectáreas, de las cuales 12,800 se encuentran en Piura, mayormente en Sullana (Fuente: Minagri).

Hasta noviembre del 2019, según la Figura 2, se han exportado un promedio de 12 millones de dólares en banano orgánico. En los Países Bajos se considera el 30% de la exportación de Banano-Plátano del 2019, le sigue Estados Unidos con un 20%.

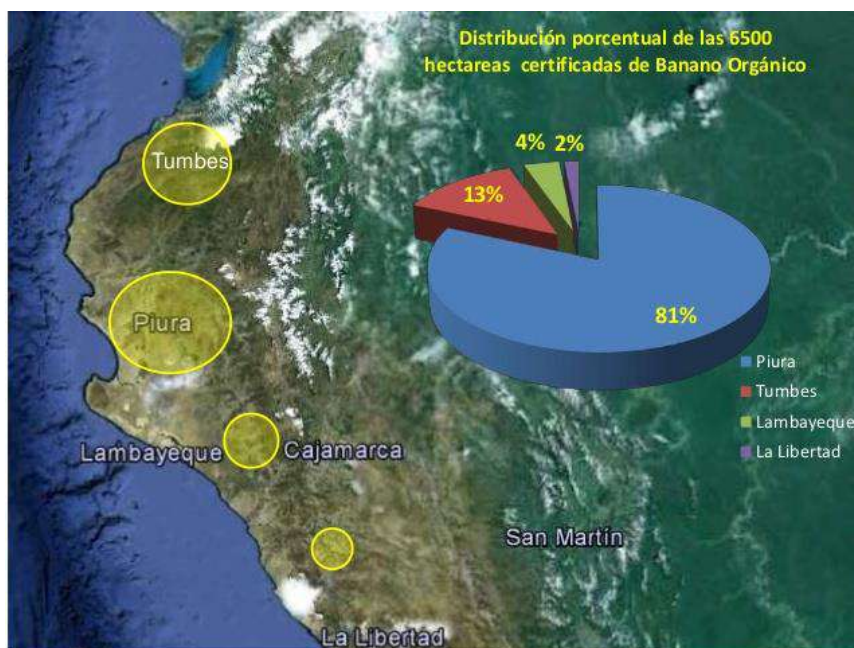


Figura 1. Distribución porcentual de las 6500 hectáreas certificadas de Banano Orgánico en el año 2014.

Fuente: Tomado de “Experiencias en el manejo agronómico del cultivo de banano orgánico de exportación en el Valle del Chira - Sullana a nivel de pequeños productores” (Dulanto B., 2014).

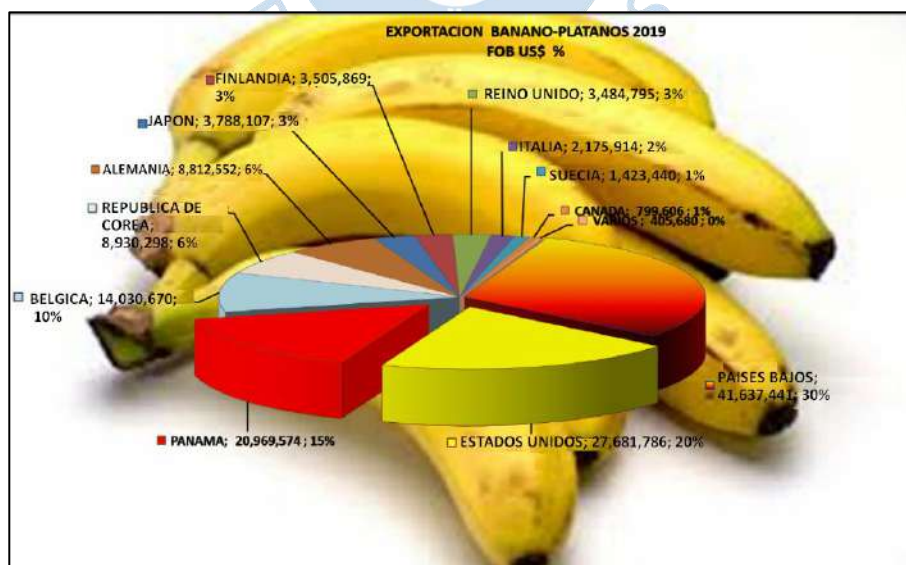


Figura 2. Exportación del banano orgánico. Datos más recientes de noviembre 2019.

Fuente: Tomado de AGRODATA Perú.

1.1.2 Metodología

El presente trabajo de investigación trata sobre el control de temperatura de un túnel de enfriamiento para frutas instalado en una planta piloto de refrigeración industrial. Se realizó un estudio del proceso de refrigeración industrial; se tiene como entrada la variación de la frecuencia del motor eléctrico que acciona al compresor; es por esto que, el primer experimento fue ingresar un determinado valor de frecuencia como entrada escalón, esperar a que la temperatura se estabilice e ir aumentando en escalones de 5 Hz, hasta llegar a la temperatura deseada para la conservación del banano orgánico, fruta con la que se ha trabajado.

En primer lugar, se realizaron experimentos con entrada escalón, variando la frecuencia del motor eléctrico que acciona al compresor del compresor; de tal manera que se llegue a un valor estacionario. El objetivo de este experimento es determinar el intervalo de trabajo de las frecuencias para llegar a un valor deseado (véase la Figura 3).

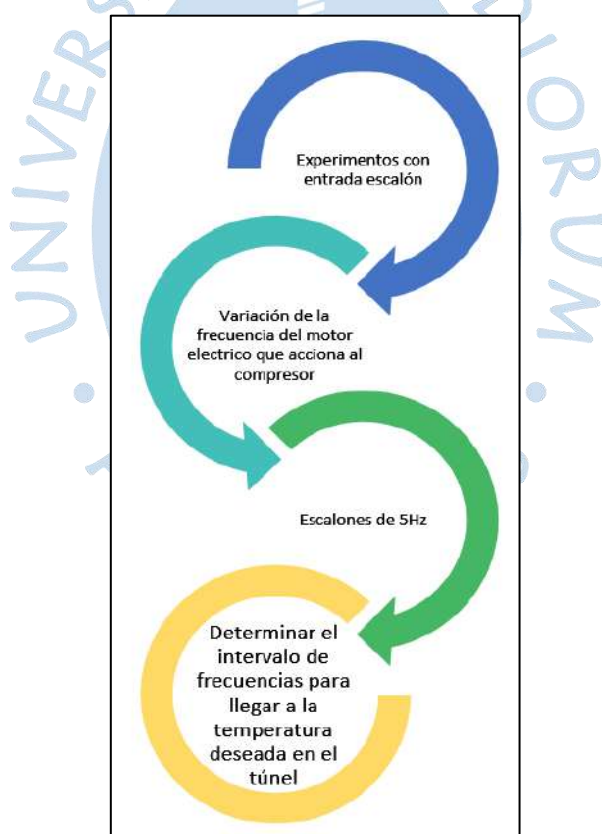


Figura 3. Diagrama del experimento con entrada escalón.

Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, se sabe con qué intervalo de frecuencias, hallado en el anterior experimento, se puede llegar a la temperatura deseada en el túnel, en el caso del banano

orgánico es de 12 a 14°C, por lo que se genera una señal PRBS mediante un código en MATLAB (véase apéndice A.1), la cual se ingresa en el SCADA del sistema para experimentos de tres días, por lo que se requieren tres señales distintas (véase apartado 1.2.1 donde se muestran los equipos e instrumentos del sistema).

Por lo tanto, según la Figura 4, con los datos obtenidos de los experimentos se pretende obtener un modelo lineal utilizando el *System Identification Toolbox* en MATLAB.

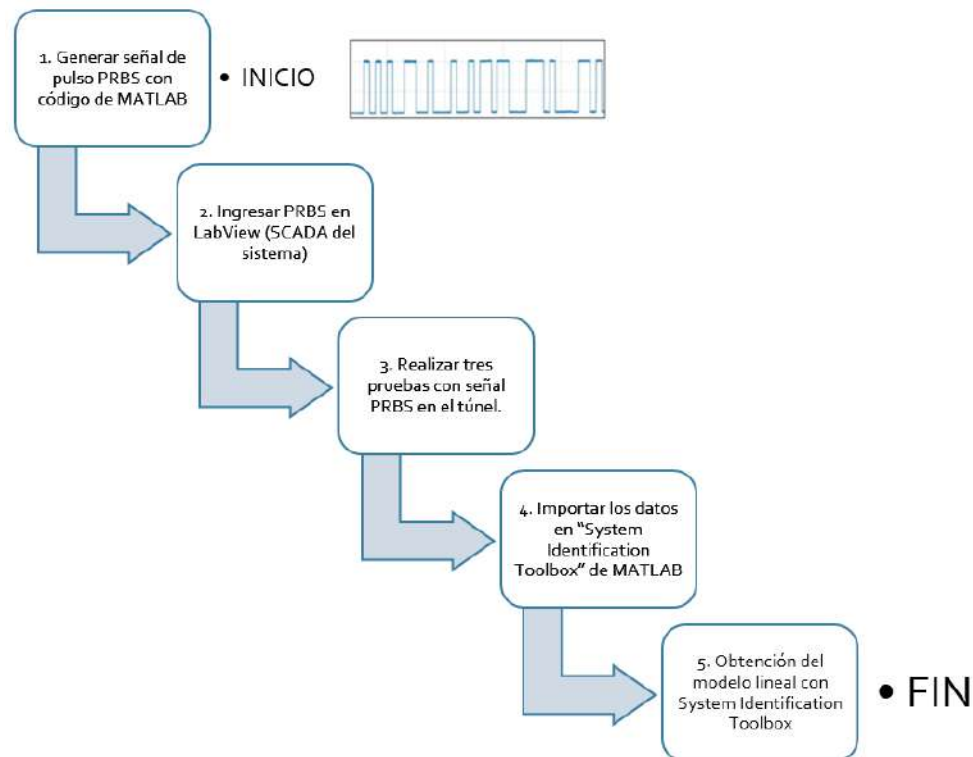


Figura 4. Detalle del Experimento con señales de entrada PRBS.

Fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, se genera una señal PRS mediante un código de MATLAB (véase apéndice A.2) con el fin de ver el comportamiento del sistema frente a una entrada de pulsos aleatorios, dentro del intervalo de frecuencias dado. Se generan tres señales distintas las cuales se ingresan en el SCADA del sistema para realizar tres pruebas con banano orgánico dentro de la planta piloto; según la Figura 5, con los datos obtenidos de los experimentos se pretende obtener un modelo no lineal utilizando el *System Identification Toolbox* en MATLAB.

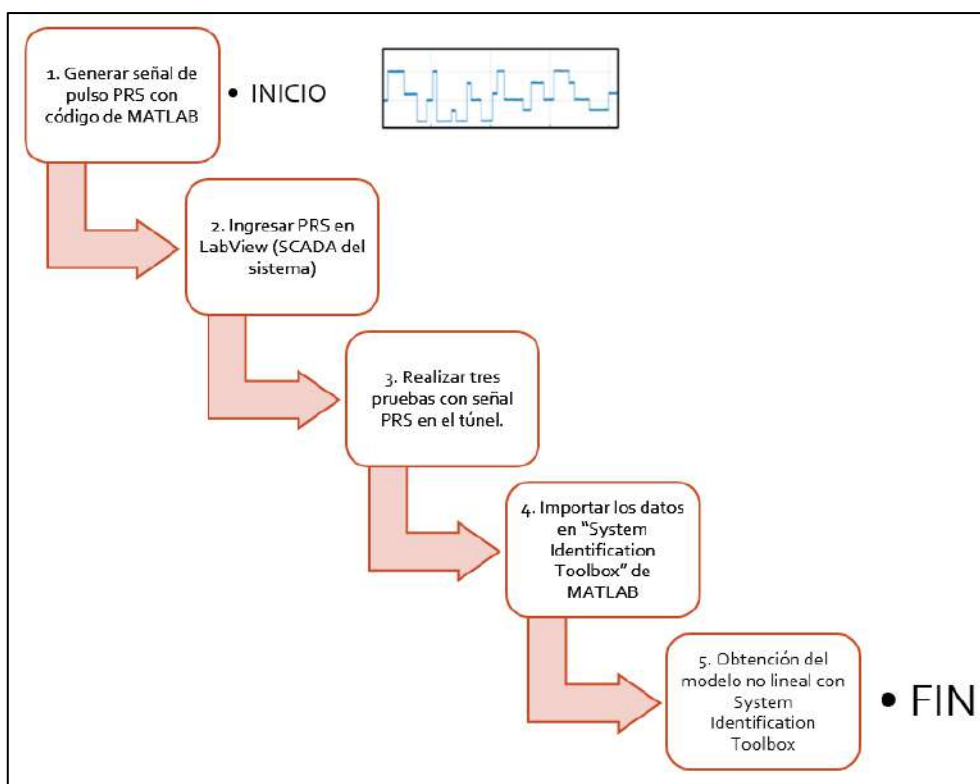


Figura 5. Detalle de los experimentos con señales de entrada PRS.

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se sigue la estructura de un modelo de control interno IMC para sintonizar un control proporcional, integral y derivativo (PID) mediante diagramas de bloques en *Simulink* de MATLAB.

Finalmente, se comprueba la funcionalidad de este controlador PID IMC mediante la implementación de este, en el túnel de enfriamiento de un sistema de refrigeración industrial.

1.2 Descripción del sistema

La planta piloto de refrigeración industrial está ubicada en la zona de investigación de la Universidad de Piura (UDEP), tiene un área de 12 m x 5 m. Esta planta fue posible gracias a un proyecto del laboratorio de sistemas automáticos de control para poder realizar la parte experimental.

En esta área se tiene una sala de control con aire acondicionado propio, dos escritorios y un monitor, en la parte exterior se encuentra la unidad condensadora más la unidad compresora y un contenedor para el túnel de frío.

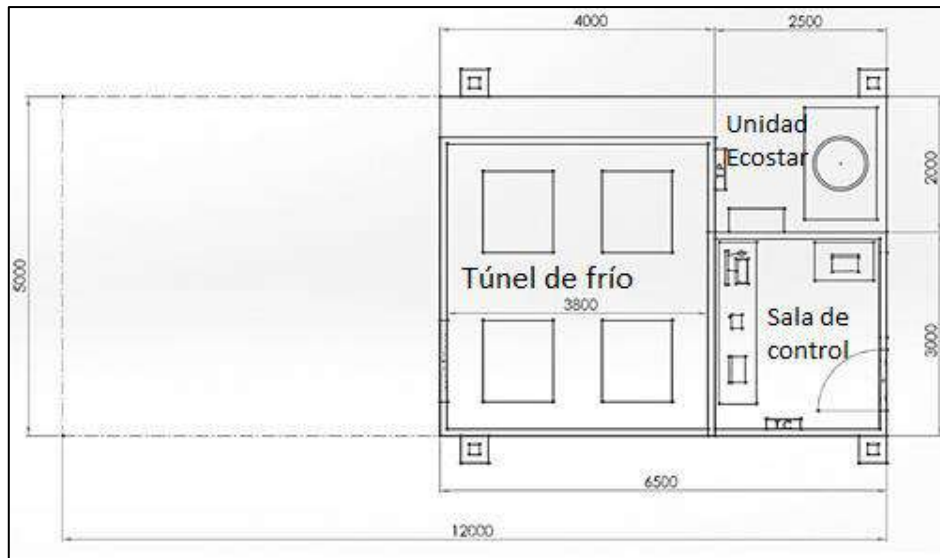


Figura 6. Vista de Planta del Sistema. Todas las unidades están en mm.

Fuente: Proyecto “Control avanzado para mejorar uso de consumo energético en sistemas de refrigeración industrial”.

En la sala de control (véase la Figura 7) se encuentra un monitor principal, donde se tienen todos los controles para enviar señales al sistema de frío. De igual manera, se tiene un tablero eléctrico donde está el PLC y un aire acondicionado residencial para refrigerar el interior de la oficina.

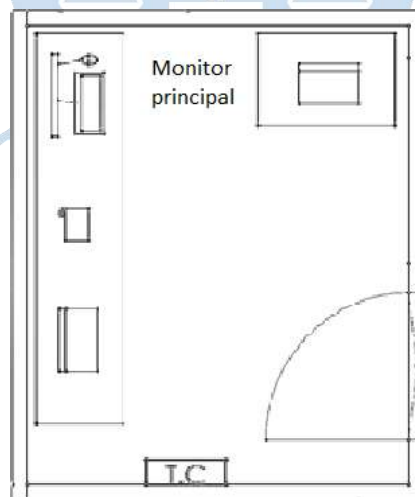


Figura 7. Distribución de la Sala de Control. Dos escritorios, dos sillas, un aire acondicionado propio y un monitor con teclado, mouse y CPU.

Fuente: Proyecto “Control avanzado para mejorar uso de consumo energético en sistemas de refrigeración industrial”.

A continuación, se muestra una imagen de la distribución interna del tablero eléctrico, donde se tienen los interruptores principales (termo magnético y diferencial), además de los módulos conectados al PLC.

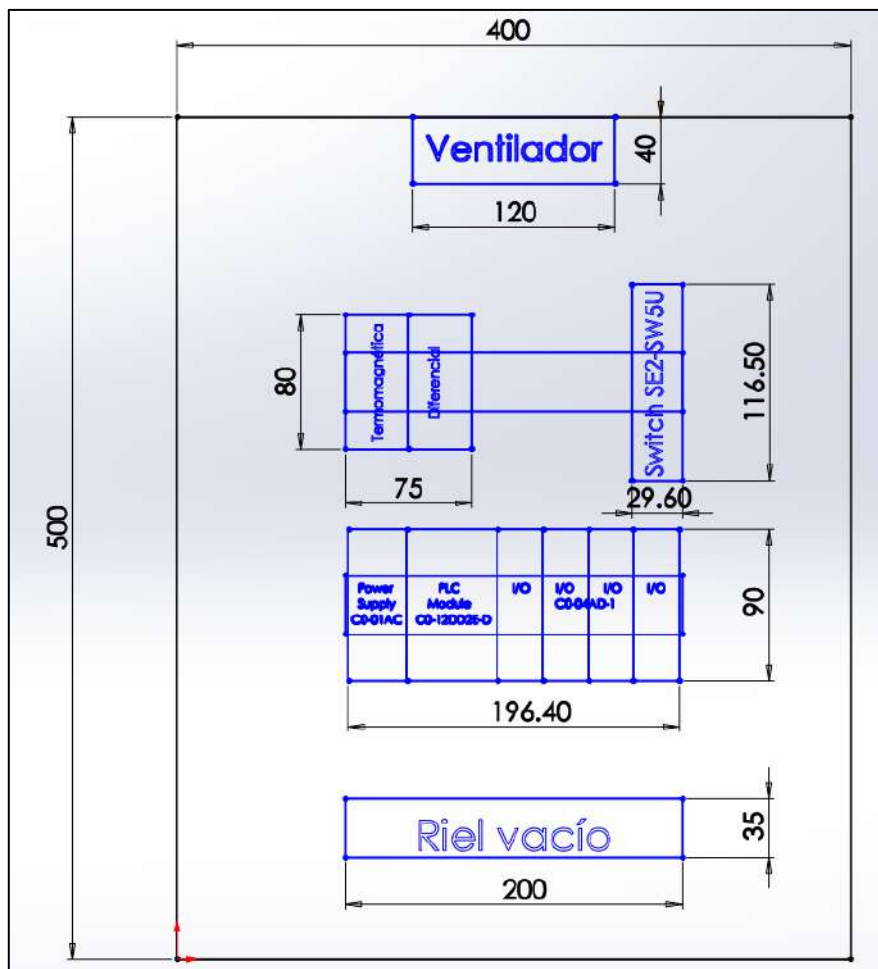


Figura 8. Distribución Interna del tablero. Todas las medidas están en mm.

Fuente: Proyecto “Control avanzado para mejorar uso de consumo energético en sistemas de refrigeración industrial”.

1.2.1 Equipos e Instrumentos

A continuación, se realiza una breve descripción de los equipos e instrumentos instalados dentro de la planta piloto de refrigeración industrial.

1.2.1.1 PLC CLICK KOYO

Es un controlador lógico programable (PLC). Comanda todos los sensores y módulos que se conectan a él, mediante un software llamado *OPC Server*. En él se conectan los módulos de temperatura, energía, potencia y voltaje.



Figura 9. Ethernet Basic PLC.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

- Marca/Fabricante: Automation Direct
- Modelo: CO-10DD1ED
- Hoja de Datos Característicos:

CLICK Ethernet Basic PLC Units			
Part Number	Inputs (8 points)	Outputs (6 points)	Price
CO-10DD1E-D	DC (24 VDC, sink/source)	DC (0.1 A, 5-27 VDC, Sink)	\$129.00
CO-10DD2E-D		DC (0.1 A, 24 VDC, Source)	\$129.00
CO-10DRE-D		Relay (1A @ 6-27 VDC/6-240 VAC)	\$129.00
CO-10ARE-D	AC (100-120 VAC)		\$139.00

Figura 10. Características del modelo del PLC.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

○ Módulos Adjuntos:

A continuación, se enlistan los módulos conectados al PLC Click.

- Energía: CO-01AC



Figura 11. Módulo CO-01AC.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

CLICK Power Supplies			
Part Number	Input Voltage	Output Current	Price
CO-00AC	85-264 VAC	0.5A @ 24 VDC	\$29.00
CO-01AC	85-264 VAC	1.3A @ 24 VDC	\$39.00

Figura 12. Características de las fuentes de energía del PLC.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

- Módulo de temperatura RTD: CO-04RTD



Figura 13. Módulo CO-04RTD.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

Analog Input Modules		
Part Number	Analog Input Types	Price
CO-04AD-1	4 channel, current (0-20 mA), 13 bit	\$89.00
CO-04AD-2	4 channel, voltage (0-10 V), 13 bit	\$89.00
CO-04RTD	4 channel RTD input (0.1 degree °C/°F resolution), or resistive input (0 - 3125Ω, 0.1Ω or 0.01Ω resolution)	\$149.00
CO-04THM	4 channel thermocouple input (0.1 degree °C/°F resolution), or voltage input (-156.25 mV to 1.25 V, 16 bit)	\$149.00

Figura 14. Características de las entradas analógicas del PLC.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

- Entradas y salidas analógicas de Voltaje: CO-4AD2DA-2



Figura 15. Módulo CO-4AD2DA-2.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

Analog Combo I/O Modules			
Part Number	Analog Input Type	Analog Output Type	Price
CO-4AD2DA-1	4 channel, current (0-20 mA), 13 bit	2 channel, current sourcing (4-20 mA), 12 bit	\$149.00
CO-4AD2DA-2	4 channel, voltage (0-10 V), 13 bit	2 channel, voltage (0-10 V), 12 bit	\$149.00

Figura 16. Características de los módulos de entradas y salidas analógicas del PLC.

Fuente: Tomado de *Programmable Logic Controllers Catalog* (Automation Direct, 2019).

1.2.1.2 Unidad ECOSTAR

Es una unidad que contiene el compresor, el condensador y su tablero de control, ubicada al exterior de la sala de control de la planta piloto. Es comandada por el software *LODAM Multitool*, sistema instalado en la computadora principal y desde la cual se pueden manejar las frecuencias del motor eléctrico que acciona al compresor.

- Marca/Fabricante: Bitzer
- Modelo: Ecostar
- Fluido de trabajo: Refrigerante R404
- Componentes internos:
 - Compresor
 - Condensador
 - Ventiladores (2)

Tabla 1.

Datos de placa de la unidad Ecostar.

Compresor Unit / Condensing Unit	
Type:	LHV6/4FES-5.F1Y-40S
Serial No:	1690805897
Fuente: Unidad Ecostar.	

Tabla 2.

Datos de placa del refrigerante R404 en la unidad Ecostar.

Type	FS128		
Serial Number	1190402651		
PED	Fluid	2	
Gruppe			
Volumen	V	13	L
Min/Max.	Ts	-10/120	°C
Temp.			
Máxima presión	Ps	33	Bar

Fuente: Unidad Ecostar.

1.2.1.3 SITRAD

Es un sistema de monitoreo de temperaturas en tiempo real. Funciona con estaciones de control, las cuales muestran el valor real registrado en los sensores ubicados dentro del túnel de enfriamiento, mediante la opción de una salida serial, el *RS-485*, que hace posible la comunicación con el software; de igual manera, se genera una base de datos.

Se han implementado cuatro sensores de temperatura de pulpa (para pinchar fruta) y un sensor NTC para medir la temperatura del túnel. En la Figura 17 se muestran los datos obtenidos de los sensores: las señales de los sensores de temperatura de pulpa están distribuidas en dos estaciones del Sitrad, denotados por “Temp. 1” y “Temp. 2”, respectivamente, y la señal del sensor de temperatura del túnel esta denotado como “Sensor de ambiente” o “Temp. 3”.



Figura 17. Vista de la plataforma de monitoreo de Sitrad.

Fuente: Sitrad.

- Modelo: TI-33Ri plus
- Fabricante: Full Gauge Control
- Sensores conectados:

Termistores NTC: cuatro sensores para la temperatura de la pulpa y uno para la temperatura del túnel.

1.3 Estado del arte

Piura, zona norte del Perú, tiene como una de sus principales actividades económicas a la exportación a cargo del sector agroindustrial, cultivando y exportando frutas como el mango, la uva, el banano orgánico, el limón, entre otros.

El banano orgánico es un producto de exportación, desarrollado por los pequeños agricultores bananeros que lograron asociarse.

Este producto alimenticio se encuentra en el tercer lugar a nivel internacional, de entre los principales productos de exportación, luego de la uva y el mango fresco.

En Piura se tienen 262 000 hectáreas de potencial agrícola bajo riego en Costa y Sierra. El banano tiene desde 7 mil hasta 14 mil hectáreas aproximadamente.¹

La calidad para exportación de este producto depende necesariamente de sus procesos de cosecha, empaque y transporte.

El principal problema que se genera en este sistema es que el precio del banano disminuya debido a la competitividad entre grandes y pequeñas empresas.¹

El proceso general de post-cosecha para el banano realizado en las empaquetadoras, es el siguiente:

1. Recepción y evaluación: La recepción la realiza la persona que trae el racimo encima de una funda y lo coloca en una viga de madera. La evaluación consiste en medir el dedo central del racimo para obtener el grosor con un calibrador fijo internacional y el largo con una cinta métrica.

2. Desmane. Consiste en extraer un dedo del racimo con un cuchillo en forma de semicírculo, el cual se parte a la mitad y se comprueba el color del interior. Si es rojiza o muy cremosa se manda todo el racimo a “descarte”, o en su mayoría a mercado nacional. Si se tiene un color uniforme en toda la superficie se divide el racimo, de cada manía (hace referencia a cada nivel del racimo) se sacan grupos de cuatro dedos llamados “cuña” y de tres dedos llamados “clavito”. Luego de estas divisiones, sobran de uno a dos dedos por manía.

De igual manera, antes de pasar al siguiente proceso, se verifica que la superficie externa del banano no presente golpes ni ralladuras.

3. Enjuague o Desleche. Consiste en colocar los grupos de banano en un estanque que contiene agua y cloro y permanecen allí durante un tiempo aproximado de 10 minutos para que se elimine el “látex o leche”, además, se van moviendo con la ayuda de una red hasta el final del depósito.

4. Desinfección y protección de las coronas. Consiste en retirar los bananos del estanque y colocarlos en recipientes, donde se les rocía una sustancia que contiene jugo de limón, alumbre de potasio y cloro y otros aditivos en pequeñas cantidades para proteger a la corona de la fruta; asimismo, se le coloca una cinta protectora a la corona. Luego se depositan los bananos en cajas con una capacidad máxima para exportación de 20 kg.

5. Pesada: Consiste en pesar las cajas de banano con una balanza controlando que tenga el peso que se necesite para su exportación al extranjero. Algunas cajas van hacia Bélgica, Alemania e Italia, entre otros países.

¹ Información extraída de la charla “Encuentro de Cooperación Internacional para la Innovación: Emilia Romagna (Unión Europea) – Piura (Latinoamérica)” realizado del 7 al 11 de setiembre del 2018 en la Universidad de Piura.

6. Finalmente, las cajas con banano orgánico se apilan y se llevan en camiones a almacenes desde donde se recogen para ser transportadas a los puertos marítimos para su traslado a los países de destino.

Este último proceso es crucial en la post-cosecha porque si no se tiene el debido tratamiento, la fruta pierde humedad, se deshidrata y pierde peso, lo cual es vital debido a que cada país de destino determina el peso con el que deben llegar; además del deterioro que trae consigo el no conservarse a una temperatura adecuada. En el caso del banano orgánico, se debe conservar entre los 12 a 15°C para almacenamiento y transporte (Barrett, Somogyi, & Ramaswamy, 2005), para maduración entre los 15 a 20°C. La humedad relativa debe estar entre 90 a 95%. (Kader, 1996).

Para el almacenamiento de frutas existen diversas empresas empaquetadoras en la región, las cuales poseen cámaras de conservación con túneles de enfriamiento, como es el caso de Don Packing, empresa piurana ubicada en Tambogrande (Piura), dedicada a empaquetar frutas como el mango y el limón. En esta planta de frío, el control utilizado es *ON/OFF*.

Asimismo, se ha instalado una cámara de conservación en el distrito de Querecotillo (Sullana, Piura) con una capacidad de 40 toneladas para banano orgánico, con el fin de favorecer las actividades del sector bananero en esta región además de bajar los costos que implicaría almacenarlos con terceros.

Actualmente, los sistemas de refrigeración industrial se operan con control *ON/OFF* a través de temporizadores. Por lo tanto, se consideró importante diseñar e implementar un control avanzado en esta planta de refrigeración industrial, a fin de evaluar el impacto en el ahorro del consumo de energía.

En cuanto al modelamiento de sistemas, (Keesman, 2011) propone diversos métodos para la identificación de sistemas; así como, (Ljung, System Identification Toolbox, 2019) ofrece una opción práctica de modelar los sistemas por medio de métodos computacionales y estadísticos en programas predeterminados.

La mayoría de los procesos industriales, debido a sus ventajas de versatilidad y facilidad de implementación, muy comúnmente utilizan la estrategia de control llamada PID, debido a sus parámetros de control: proporcional, integral y derivativo.

Los métodos de control avanzados pueden enfrentar algunos problemas con un controlador PID, Kosák muestra una estructura de los controladores más actuales, el más básico es el PID, que se puede sintonizar; es decir, hallar sus parámetros de control manualmente. Sin embargo, para procesos híbridos o procesos por lotes donde el modelado es para sistemas no lineales, se necesita la implementación de controles avanzados (Kozák, 2012).

Algunas referencias sobre este tipo de controles se muestran en (Shah, Markana, & Parikh, 2010), quienes presentan una comparación entre los métodos de ajuste y sintonización de parámetros del controlador PID de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon e IMC aplicados en una simulación de un Reactor de Tanque Estirado (CSTR), siendo el método con mejor rendimiento el PID-IMC.

En (Rivera, Morari, & Skogestad, 1985), se brinda la teoría elemental sobre controladores proporcionales, integrales y derivativos basados en un modelo de control interno; la cual se utiliza para diseñar un controlador de este tipo, PID-IMC, en control de un motor de corriente continua (Okoro & Enwerem, 2019).

(Vijaya Selvi, Radhakrishnan, & Sundaram, 2007) compara un PID convencional con un PID IMC mediante unos índices de desempeño, en donde el PID IMC presenta un comportamiento más robusto y un tiempo de establecimiento más rápido en comparación con un PID convencional.

De manera similar, (Duka, Dulau, & Oltean, 2015) muestra un método de control para un sistema de levitación magnética. Utilizan el flujo magnético producido por una bobina para mantener un objeto ferromagnético en levitación a una distancia constante, en donde se aplica un controlador PID IMC, el cual posee un solo parámetro de sintonización, la elección de un valor ideal de este parámetro presentaría una buena respuesta con un corto tiempo de establecimiento.

Se tiene un sistema de una entrada y una salida en (Zeng, y otros, 2020) controlado por un PID IMC, el cual muestra una simple estructura y un filtro pasabajo como único parámetro de sintonización para mejorar la robustez del sistema, así como un tiempo de transitorio menor que en los controladores PID convencionales.

Otra aplicación se le brinda al PID IMC en (Kumar, Prasad, Shekher Giri, & Sharan Singh, 2019), específicamente en el control de la temperatura de un biorreactor para el proceso de fermentación en la producción de etanol, el cual se evalúa mediante un modelo lineal el desempeño del PID IMC frente a cambios de *set point* y cambios de carga, siendo satisfactoriamente controlada la temperatura mediante dicho controlador.

El presente trabajo de tesis propone el diseño e implementación de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) basado en una estructura IMC para su sintonización, que considera tanto una función de transferencia del proceso, así como una función de transferencia del modelo del proceso, para controlar la temperatura deseada del túnel de frío; de tal manera que sea de utilidad para trabajos posteriores e impulse a que otros investigadores apuesten por él.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseño e implementación de un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) basado en una estructura de control con modelo interno IMC para el control de temperatura de un túnel de enfriamiento en un sistema de refrigeración industrial.

1.4.2 Objetivos específicos

- Modelamiento empírico del sistema de refrigeración utilizando como una carga, el banano orgánico, mediante el System Identification Toolbox de MATLAB.
- Diseño del control PID a partir de un modelo interno del proceso. Sintonización de un PID IMC en Simulink de MATLAB.
- Implementación del control PID basado en una estructura IMC en un túnel de enfriamiento de un sistema de refrigeración industrial.



Capítulo 2

Marco teórico

En el presente capítulo, se establecen las bases conceptuales del proyecto. Se empieza con la explicación del ciclo de refrigeración que posee la planta piloto; así como, una breve descripción a la funcionalidad de cada equipo. De igual manera, se introducen los conceptos básicos para la identificación y modelamiento de sistemas junto a la herramienta de programación a utilizar en este proyecto.

Finalmente, se agregan las definiciones y características principales de las diversas estrategias de control que se utilizarán como base teórica en posteriores capítulos.

2.1 Ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración que se utiliza con más frecuencia es por compresión de vapor, donde el refrigerante se evapora y se condensa alternadamente, para luego comprimirse en la fase de vapor (Cengel & Boles, 2015).

Los cuatro principales componentes del ciclo de refrigeración son:

- Compresor
- Condensador
- Válvula de expansión
- Evaporador

El ciclo de refrigeración ideal se divide en cuatro procesos o estados:

Estado 1: El refrigerante entra en forma de vapor saturado al compresor, se comprime con una entropía constante, a la vez que va aumentando su temperatura durante este proceso, hasta llegar a la presión del condensador.

Estado 2: El refrigerante entra en forma de vapor sobrecalentado al condensador, donde se produce un rechazo de calor hacia los alrededores (Q_H).

Estado 3: El refrigerante pasa como líquido saturado por una válvula de expansión donde se estrangula hasta obtener la presión del evaporador. Su temperatura va disminuyendo durante este proceso.

Estado 4: El refrigerante entra en forma de vapor húmedo, y se evapora por completo a la vez que absorbe calor del espacio refrigerado; se vuelve vapor saturado e ingresa nuevamente al compresor, cerrando el ciclo de refrigeración.

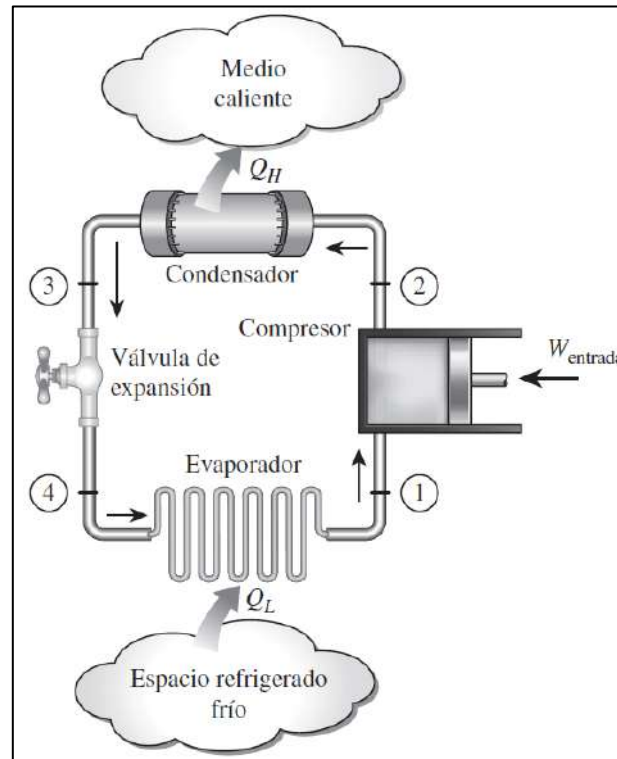


Figura 18. Esquema de un ciclo de refrigeración ideal por compresión de vapor.

Fuente: Tomado de “*Termodinámica (8th ed.)*” (Cengel & Boles, 2015).

En la práctica, ocurren ciertas irreversibilidades como se explica a continuación:

En primer lugar, se necesitará de un sistema para obtener un ligero sobrecalentamiento del refrigerante, a la entrada del compresor, de tal manera que se asegure la evaporación completa de este cuando ha ingresado. Asimismo, este proceso de compresión real se encuentra influenciado por los efectos de fricción lo que equivale a un proceso con una variación en la entropía, según su diagrama T-s (véase Figura 20), proceso 1-2’.

De igual manera, no siempre se consigue obtener un refrigerante líquido saturado por la existencia de caídas de presión en el condensador, lo que provoca que se deba condensar un poco antes de su ingreso a la válvula de estrangulamiento.

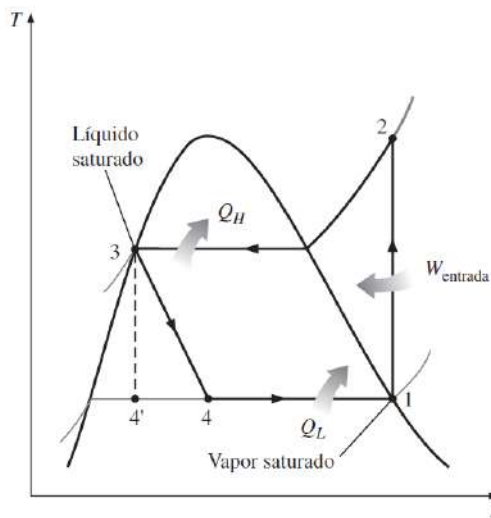


Figura 19. Diagrama T-s para el ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: Tomado de “*Termodinámica (8th ed.)*” (Cengel & Boles, 2015).

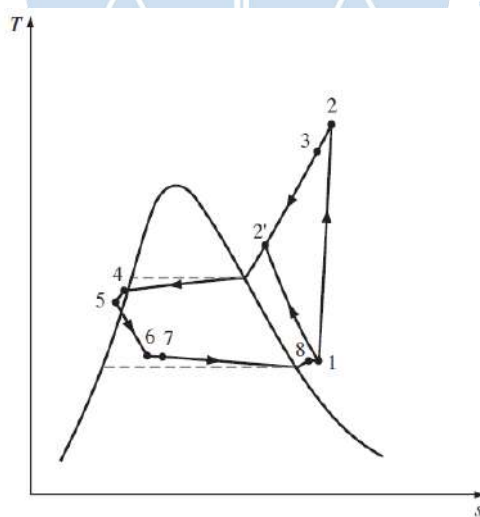


Figura 20. Diagrama T-s para el ciclo real de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: Tomado de “*Termodinámica (8th ed.)*” (Cengel & Boles, 2015).

2.2 Identificación y modelamiento de sistemas

La identificación es una herramienta para modelar sistemas desde una base de datos obtenida de forma empírica o experimental.

Para realizar una identificación, se debe conocer el proceso que sigue el sistema, entradas y salidas, para saber qué pruebas son las correctas para obtener todos los datos posibles de las propiedades que posee el sistema.

Una vez realizadas las pruebas y obtenidos los datos, lo siguiente es tener un modelo que mejor se ajuste a esta base de datos. Para la estimación de parámetros del modelo, se especifica un criterio de error (función de pérdida o análisis de residuos) (Seborg, Edgar, & Mellichamp, 2004).

Simplificando el proceso, se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Pruebas de identificación
- Selección de un modelo
- Estimación de parámetros
- Validación del modelo

En primer lugar, se deben considerar tres variables dentro del sistema: la variable manipulable (MV), la variable controlable (CV) y el disturbio (DV).

La variable manipulable (MV) se refiere a las entradas del sistema; las cuales se pueden cambiar por el usuario dependiendo de las condiciones que se requieran en el proceso; además, deben tener una influencia en la salida del sistema, asimismo, si se tuviese diferentes tipos de entrada se debe evidenciar que se tienen distintos efectos en las salidas.

El disturbio (DV) es una variable en el sistema que no se puede manipular porque es independiente del proceso; sin embargo, debe tener una influencia en el mismo. Como criterios de selección, el disturbio debe poseer la misma capacidad de respuesta que la variable controlada o parecida proporcionalmente; de tal manera que se puede verificar su influencia en la salida del proceso. Si el disturbio tiene un lento efecto, se puede utilizar para la identificación, de tal manera que se mejore la precisión del modelo (Zhu, 2011).

La variable controlada (CV) se refiere a las salidas del sistema. Su selección depende de los requerimientos del control y sirve como respuesta del sistema.

Para evaluar el comportamiento de un sistema lineal por modelación empírica, se genera una señal de entrada PRBS (*Pseudo-Random Binary Sequence*), mediante código de programación en MATLAB, donde se tiene un intervalo de trabajo alrededor de un punto medio, un ancho de pulso máximo y un límite de muestras deseadas.

Es necesario realizar un experimento previo a este, para obtener un conocimiento *a priori* del intervalo de trabajo del proceso.

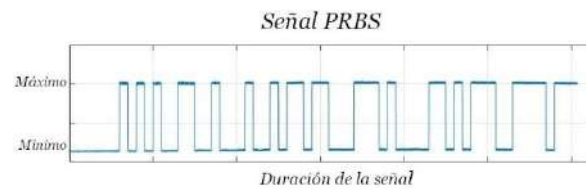


Figura 21. Señal *Pseudo-Random Binary Sequence*.

Fuente: Elaboración Propia

De esta manera, se puede generar la señal PRBS e implementarla para la realización de experimentos y obtención de datos que se utilizarán para importarlos en las herramientas de identificación de sistemas (véase la Figura 21).

Para evaluar el comportamiento de un sistema no lineal por modelación empírica, se genera una señal de entrada PRS (*Pseudo-Random Sequence*), de igual manera por código de programación en MATLAB, donde se tiene un intervalo de trabajo alrededor de un punto medio, un ancho de pulso máximo, un ancho de pulso mínimo y un límite de muestras deseadas. En este caso, según la Figura 22, los pulsos son aleatorios y poseen distintas amplitudes, lo que sirve para evaluar el comportamiento del sistema frente a distintos valores de entrada.



Figura 22. Señal PRS.

Fuente: Elaboración propia.

En el presente proyecto, se utilizará la herramienta de MATLAB llamada “*System Identification Toolbox*”, donde se importan los datos obtenidos de los experimentos y se buscan modelos que se ajusten correctamente al proceso, (en la Figura 23 se muestra una ventana de trabajo).

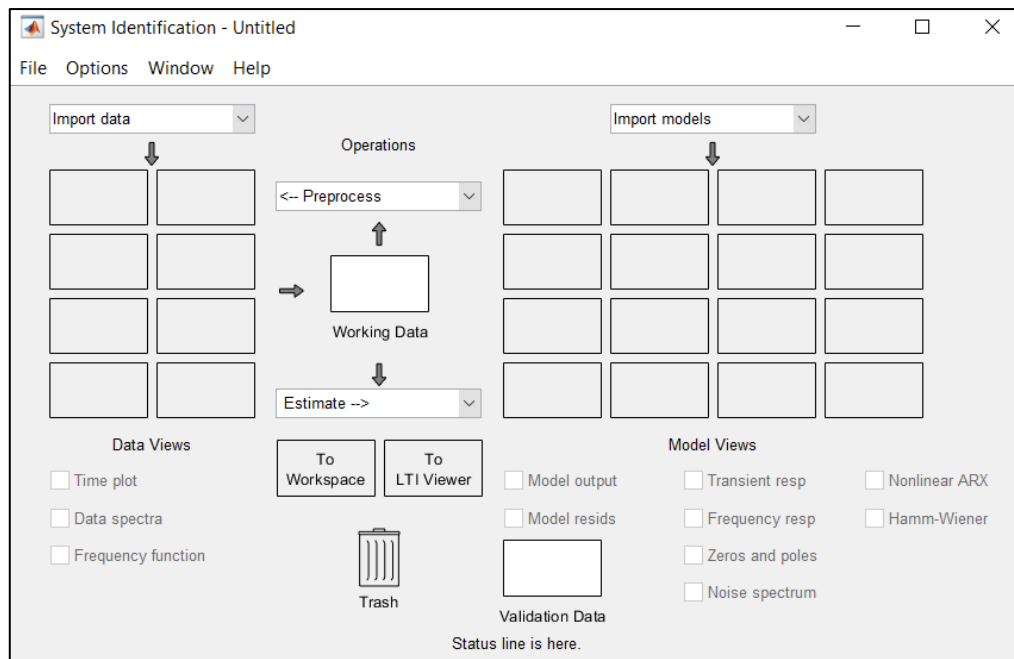


Figura 23. Ventana de trabajo de “System Identification Toolbox™”.

Fuente: MATLAB®.

Se debe contar con unos datos de estimación y unos datos de validación, de tal manera que, con este último se pueda verificar el ajuste del modelo, el cual debe tener un mínimo de 80% de los datos estimados con respecto a los datos validados.

Los comandos de estimación utilizados en la presente tesis para identificar los modelos en base a datos experimentales, son los siguientes:

- *PEM (Prediction Error-Minimization)*: Método utilizado para estimar modelos lineales y no lineales a partir de la minimización de los errores de predicción.
- *PROCEST*: MATLAB lo utiliza para el modelo del proceso.

A continuación, en la Tabla 3, se definen los comandos de estimación de modelos que utiliza MATLAB mediante su herramienta de identificación.

Tabla 3.

Comandos para la estimación *offline*.

Model Type	Estimation Commands
Transfer function models	tfest
Process models (low-order transfer functions expressed in time-constant form)	procest
Linear input-output polynomial models	armax (ARMAX and ARIMAX models) arx (ARX and ARIX models) bj (BJ only) iv4 (ARX only) ivx (ARX only) oe (OE only) polyest (for all models)
State-space models	n4sid ssest ssregest
Frequency-response models	etfe spa spafdr
Correlation models	cra impulseest
Linear time-series models	ar arx (for multiple outputs) ivar
Linear grey-box models	greyest
Nonlinear ARX models	nlarx
Hammerstein-Wiener models	nlhw
Nonlinear grey-box models	nlgreyest
Linear and nonlinear models	pem

Fuente: Tomado de “*System Identification Toolbox*” (Ljung, System Identification Toolbox, 2019).

Además, esta herramienta posee un resultado de un análisis de residuos realizado, en el cual se evalúa la auto-correlación de los residuos entre cada modelo estimado y correlación cruzada de los residuos de cada modelo con respecto a los datos de entrada, y se identifican aquellos datos que no se logren ajustar al modelo.

En la Figura 24, se muestran mediante un esquema, los pasos mencionados anteriormente para la identificación del sistema, desde los experimentos para la obtención de los datos de forma empírica hasta la validación del modelo.

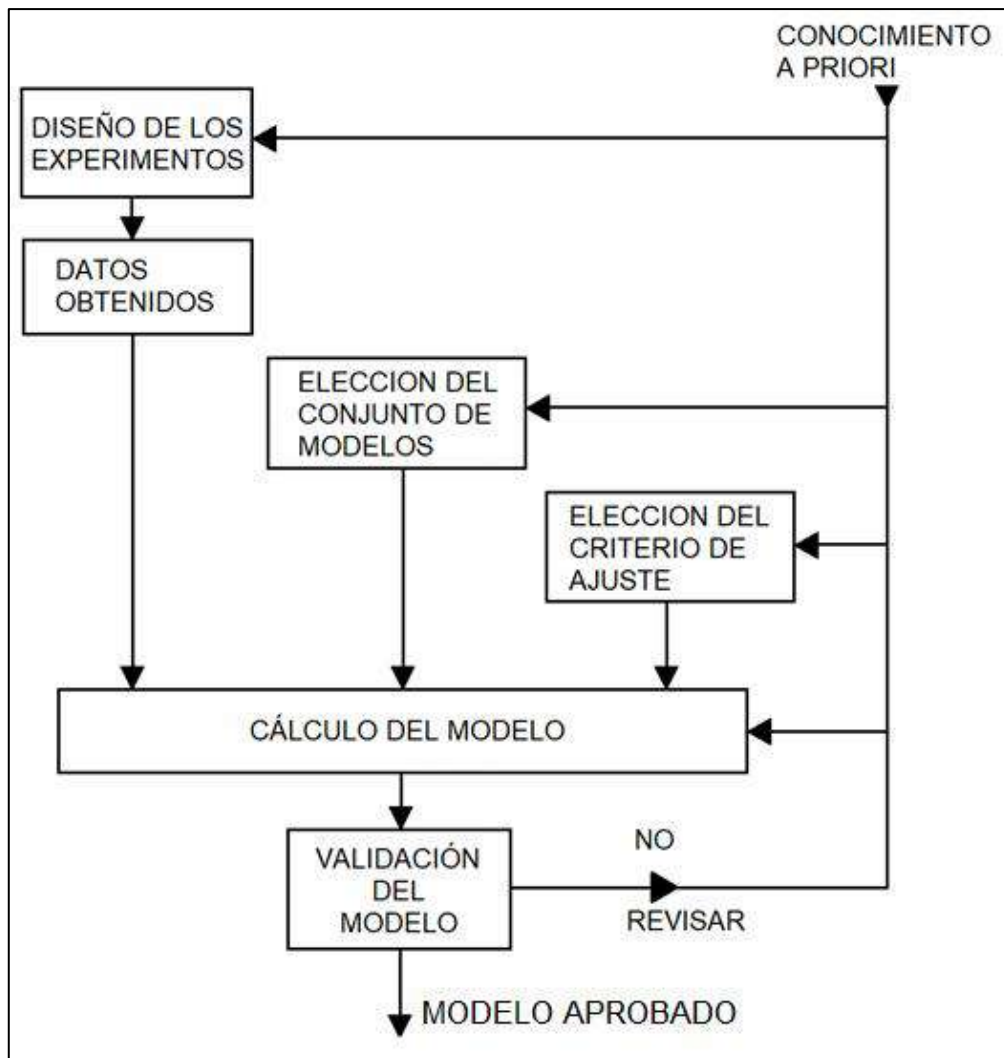


Figura 24. Diagrama de flujo para la identificación.

Fuente: Traducido de “*System Identification: Theory for the user*” (Ljung, System Identification: Theory for the user, 1987).

2.3 Estrategias de Control

A continuación, se detallan las dos estrategias de control aplicadas en este sistema de frío.

2.3.1 Estrategia de control PID

En esta sección se explica sobre esta estrategia de control: su esquema y/o estructura, diagrama de bloques genérico, sus parámetros principales, técnicas de sintonización, ventajas y desventajas.

Para definir una estrategia de control es necesario mostrar el diagrama de bloques estándar de un lazo cerrado de control, para conocer los componentes principales sobre los que se puede actuar.

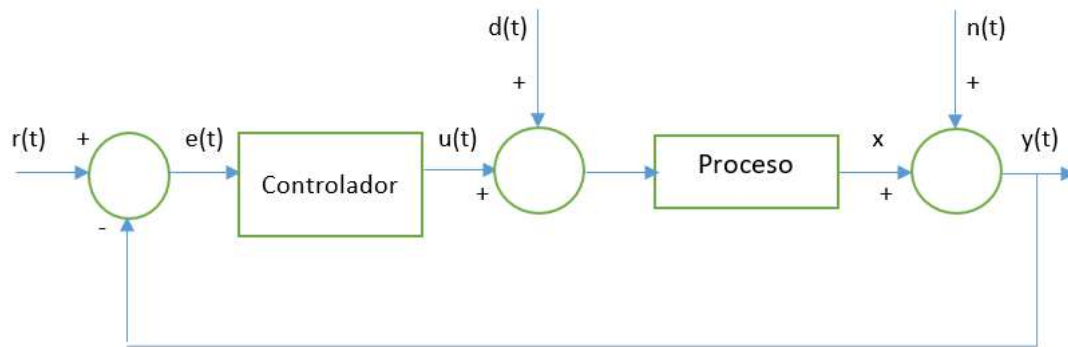


Figura 25. Esquema de control a lazo cerrado.

Fuente: Adaptado de “Control Automático de Procesos” (Ipanaqué Alama, 2012).

Donde:

$r(t)$ = señal de referencia, *set point*

$e(t)$ = error

$u(t)$ = señal de control, variable manipulable

$d(t)$ = disturbio

$x(t)$ = salida del proceso

$n(t)$ = ruido

$y(t)$ = variable de salida

Acción Proporcional (K_p)

El elemento proporcional o “ganancia proporcional” es un ratio entre un cambio de la señal de salida y un cambio de la señal de entrada. El K_p es proporcional a la señal del error, donde: error = referencia – variable de salida.

Su parámetro de sintonización (K_p) es adimensional.

La ganancia proporcional se ajusta a los requerimientos de la salida del sistema al igual que su signo; de tal manera que, el error puede aumentar o disminuir si es lo que se está buscando.

Sin embargo, no garantiza un error nulo; es decir, que no existan diferencias entre la señal de referencia y la variable de salida, a no ser que el proceso ya cuente con un integrador puro.

En algunos procesos no se utiliza una ganancia proporcional como controlador, sino una banda proporcional, que es la inversa de la ganancia proporcional, la cual se define como:

$$PB \triangleq \frac{100\%}{K_p}$$

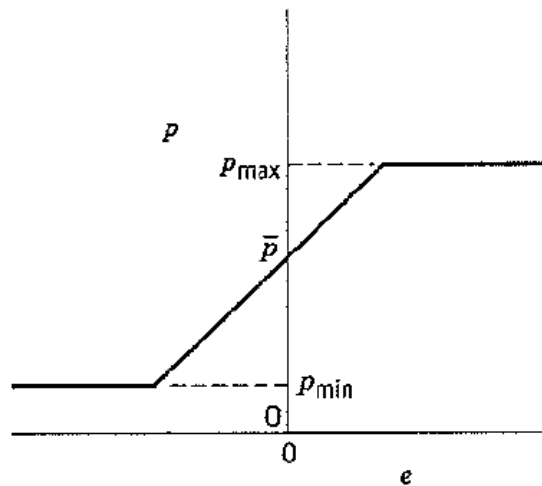


Figura 26. Comportamiento del actuador de un controlador proporcional.

Fuente: Tomado de “*Process Dynamics and Control*” (Seborg, Edgar, & Mellichamp, 2004).

Acción Integral (T_i)

El componente integral asegura un error nulo en estado estacionario. Es decir, que la variable de salida sea igual a la referencia.

El regulador integral depende de la integral de la señal de error, y se utiliza en conjunto con un controlador de ganancia proporcional, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$u(t) = k * e(t) + k \int_{t_0}^t \frac{e(t)}{T_i} dt$$

Su parámetro de sintonización es T_i , mayormente dado en segundos.

Se debe realizar una evaluación en estacionario, de tal manera que la señal $u(t)$ sea una constante para garantizar un error nulo.

Por lo que se puede decir que el regulador integral proporciona un reset automático cuando la señal $u(t)$ sea constante en el estacionario.

Acción Derivativa (T_d)

El regulador derivativo depende de la derivada de la señal de error, y se utiliza en conjunto con un controlador de ganancia proporcional, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$u(t) = k * e(t) + K * T_d * \frac{de(t)}{dt}$$

Su parámetro de sintonización es T_d , mayormente dado en segundos.

El componente derivativo amplifica el ruido en forma proporcional a la frecuencia. Esto afecta directamente a la variable de control, creciendo por la presencia de ruidos a alta frecuencia, por lo que se requiere de un componente adicional, lo cual es un filtro pasabajo para atenuar las ganancias elevadas. (Ipanaqué Alama, 2012).

Los tres componentes juntos conforman un controlador PID, donde la parte proporcional se ajusta a los requerimientos de salida del sistema para regular el nivel de error deseado, el integrador garantiza error nulo, el derivador garantiza una estabilidad en estado estacionario.

Un regulador PID sigue la siguiente ecuación para la señal de control $u(t)$:

$$G_{PID}: u(t) = K * e(t) + K \int_{t_0}^t \frac{e(t)}{T_i} dt + K * T_d * \frac{de(t)}{dt}$$

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

Se tiene la siguiente representación del controlador PID:

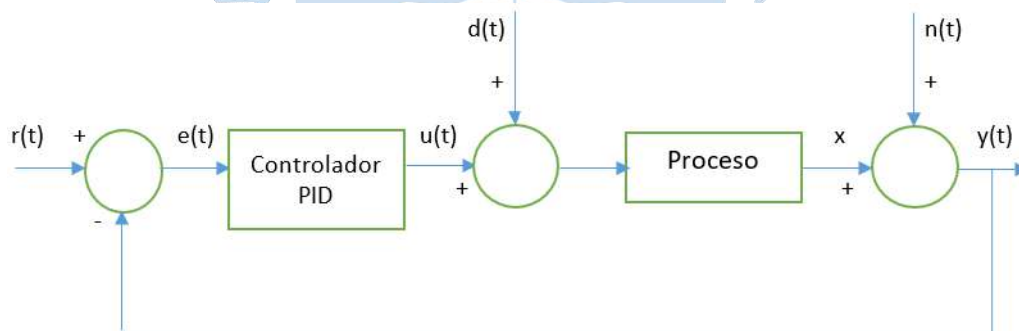


Figura 27. Esquema del lazo cerrado con controlador PID.

Fuente: Adaptado de “Control Automático de Procesos” (Ipanaqué Alama, 2012).

Al momento de incrementarse la ganancia del controlador proporcional ocasiona inestabilidad. De igual manera, la acción integral produce oscilaciones en la respuesta de la variable de control, lo que genera una inestabilidad al sistema.

Por lo que, se considera agregar una acción derivativa al controlador, para contrarrestar este efecto integrador y favorecer a la estabilidad del sistema, además de que dicha acción disminuye el tiempo que el proceso demora en llegar al estado estacionario, conocido como tiempo de establecimiento o “*settling time*” (Process and Dynamics Control, 2nd Edition, 2004).

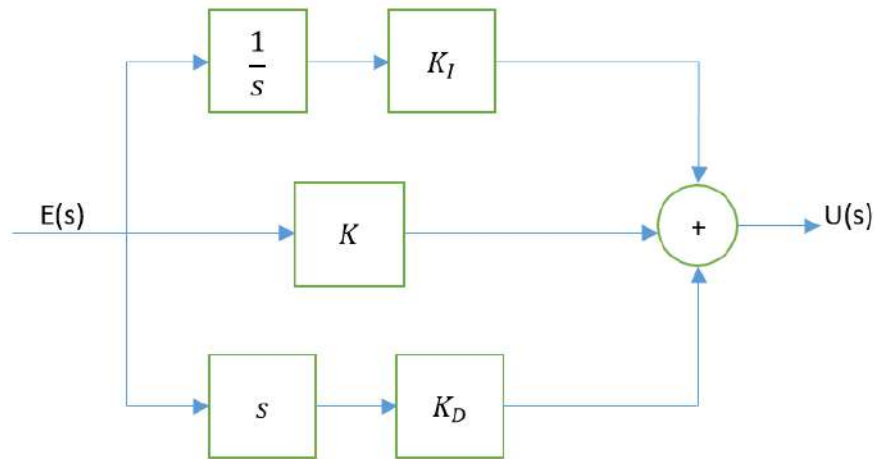


Figura 28. Diagrama de bloques de un PID.

Fuente: Adaptado de “Control Automático de Procesos” (Ipanaqué Alama, 2012).

Técnicas de Sintonización

Existen tres parámetros principales que conforman al controlador: proporcional, integral y derivativo (PID). El proceso de hallar estos parámetros (K_p, T_i, T_d) del controlador se llama “sintonización”. Por ello, existen diversas técnicas y/o métodos para obtener estos valores dependiendo de la dinámica del proceso a controlar; a continuación, se explicarán tres de ellos.

- **Método de Zieger-Nichols**

Este método fue presentado en 1940. Consiste en llevar al proceso con regulador proporcional (K_p), sin contar con la acción integral y derivativa, a lazo cerrado y se aumenta este valor hasta obtener oscilaciones permanentes en la respuesta del sistema; se obtiene un periodo crítico de la oscilación “ T_C ” para hallar un valor de ganancia proporcional crítica cuyo símbolo es “ K_C ”. Posteriormente, con estos datos se pueden determinar los parámetros de sintonización del controlador PID, según las fórmulas de la Tabla 4.

Tabla 4.

Sintonización de ZN a lazo cerrado.

	K	T_I	T_D
P	$0.5K_C$		
PI	$0.4 K_C$	$0.8 T_C$	
PID	$0.6 K_C$	$0.5 T_C$	$0.125 T_C$

Fuente: Tomado de “Control Automático de Procesos” (Ipanaqué Alama, 2012).

- Método de Chien, Hrones y Reswick (CHR)

El presente método se realiza en un experimento a lazo abierto, es una modificación del método de Ziegler-Nichols a lazo abierto, en donde se considera que el proceso tiene una entrada escalón y sigue la siguiente función de transferencia generalizada:

$$P(s) = \frac{K_p e^{-sL}}{\tau s + 1}$$

Además:

$$a = \frac{K_p L}{\tau}$$

Donde:

τ : Constante de tiempo equivalente

L: Tiempo de retardo de la planta

K_p : Ganancia estática de la planta

El objetivo de este método es compensar las sobre-oscilaciones de tal manera que, no sobrepase el 20%; las siguientes tablas también evalúan el comportamiento frente a disturbios y cambios de *set point* (Ipanaqué Alama, 2012).

Tabla 5.

Método CHR frente a overshoot de 0%.

	K	T _I	T _D
P	0.3/a		
PI	0.35/a	1.2 τ	
PID	0.6/a	τ	0.5 τ

Fuente: Tomado de “Control Automático de Procesos” (Ipanaqué Alama, 2012).

Tabla 6.

Método CHR frente a disturbios 0%.

	K	T _I	T _D
P	0.3/a		
PI	0.6/a	4 L	
PID	0.95/a	2.4 L	0.42 L

Fuente: Tomado de “Control Automático de Procesos” (Ipanaqué Alama, 2012).

- Método de Cohen-Coon:

Este método requiere experimentos a lazo abierto, en donde se debe utilizar una función de transferencia de primer orden junto a un tiempo de retardo puro.

Se tienen los siguientes parámetros a utilizar para la deducción de la función de transferencia de primer orden, según lo indica la Figura 29:

$$\tau_m = \frac{3}{2}(t_2 - t_1); d_m = \tau_2 - \tau_m$$

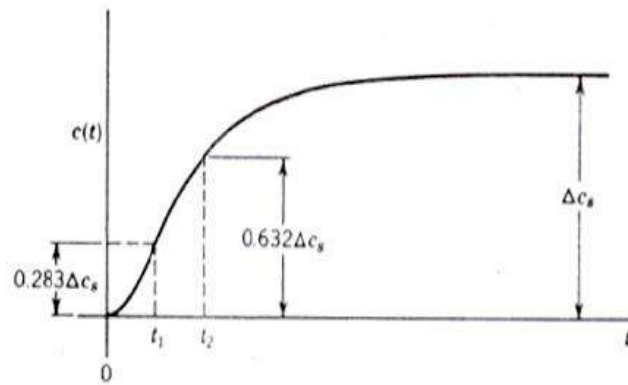


Figura 29. Deducción de la función de transferencia de un proceso de primer orden con respuesta a entrada escalón.

Fuente: Tomado de “*Comparison of PID Controller Tuning Methods*” (Shahrokhi & Zomorodi, 2012).

Donde:

t : Tiempo

$e(t)$: Función de salida.

ΔC_s : Valor de salida estacionario.

t_1 : Instante de tiempo en el que el valor de respuesta es $0.283\Delta C_s$. Retardo

t_2 : Instante de tiempo en el que el valor de respuesta es $0.632\Delta C_s$

Luego de tener estos parámetros, se puede sintonizar el controlador PID según la Tabla 7 de parámetros de sintonía acorde a este método:

Tabla 7.

Parámetros de sintonización del método de Cohen-Coon

Controller Type	k_c	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K_m} \frac{\tau_m}{d} (1 + \frac{d}{3\tau_m})$	-	-
PI	$\frac{1}{K_m} \frac{\tau_m}{d} (\frac{9}{10} + \frac{d}{12\tau_m})$	$d \frac{30 + 3d/\tau_m}{9 + 20d/\tau_m}$	-
PD	$\frac{1}{K_m} \frac{\tau_m}{d} (\frac{5}{4} + \frac{d}{6\tau_m})$	-	$d \frac{6 - 2d/\tau_m}{22 + 3d/\tau_m}$
PID	$\frac{1}{K_m} \frac{\tau_m}{d} (\frac{4}{3} + \frac{d}{4\tau_m})$	$d \frac{32 + 6d/\tau_m}{13 + 8d/\tau_m}$	$d \frac{4}{11 + 2d/\tau_m}$

Fuente: Tomado de “*Comparison of PID Controller Tuning Methods*” (Shahrokhi & Zomorodi, 2012).

2.3.1.1 Control PID IMC

Esta estrategia de control PID basada en una estructura IMC, hace referencia a un modelo de control interno aproximado; es decir, se debe obtener una función de transferencia del proceso y una función de transferencia para el modelo del proceso, de tal manera que, se le extrae parte de la dinámica que no se puede controlar para la respectiva sintonización del controlador (Morari & Zafiriou, 1989).

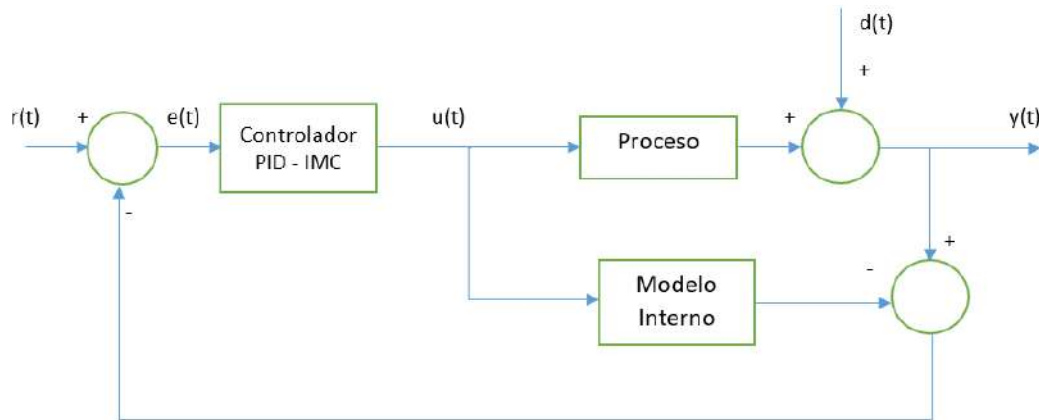


Figura 30. Estructura de control PID IMC.

Fuente: Adaptado de “Process Dynamics and Control “ (Seborg, Edgar, & Mellichamp, 2004).

Función de transferencia del controlador IMC : G_{IMC}

Función de transferencia del proceso: G_p

Función de transferencia del modelo interno: G_m

Salida de la función de transferencia del modelo: C_m

Salida del sistema: Y

Referencia $r(t)$: Set point Y_{sp}

Error del sistema: $e = Y_{sp} - (Y - C_m)$

Para el diseño del controlador se deben realizar dos pasos²:

Paso 1:

La función de transferencia del modelo interno G_m se debe factorizar en sus polos positivos y negativos:

$$G_m = G_{m+}G_{m-}$$

² (Shah, Markana, & Parikh, 2010)

Donde G_{m+} son los polos positivos de la función de transferencia original del modelo interno y G_{m-} son los polos negativos.

Si existiera algún retardo en la función de transferencia se agrupa en el lado de los polos positivos; de esta manera, se logra separar los polos reales negativos de los polos positivos para evitar su influencia en la estabilidad del sistema.

Paso 2:

Según la estructura, se pueden deducir las siguientes ecuaciones:

$$G_{IMC} = \frac{G_F}{G_{m-}}$$

Donde G_{m-} son los polos reales negativos de la función de transferencia del modelo interno y G_F es la función de transferencia de un filtro pasabajo que se implementa en el controlador para evitar la falta de coincidencia del modelo.

$$G_F = \frac{1}{\tau_f s + 1}$$

Se tiene la siguiente función de transferencia de primer orden del modelo interno:

$$G_m = \frac{K}{\tau_p s + 1} e^{-\theta s}$$

Utilizando la aproximación de Padé³:

$$e^{-\theta s} = \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s}$$

Reemplazando en el modelo interno:

$$G_m = \frac{K}{\tau_p s + 1} \left(\frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \right)$$

³ (Bequette, 1999)

Se separan los polos positivos y tiempo de retardo, de los polos negativos:

$$G_{m+} = 1 - \frac{\theta}{2}s, \quad G_{m-} = \frac{K}{(\tau_p s + 1)(1 + \frac{\theta}{2}s)}$$

$$G_{IMC} = \frac{(\tau_p s + 1)(1 + \frac{\theta}{2}s)}{K(\tau_f s + 1)}$$

Los controladores de ambas estructuras, tanto de PID como de PID IMC, satisfacen la siguiente ecuación:

$$G_{PID} = \frac{G_{IMC}}{1 - G_{IMC} * G_m}$$

Por lo tanto, se reemplaza G_{IMC} y G_m en la ecuación anterior de G_{PID} :

$$G_{PID} = \frac{\frac{(\tau_p s + 1)(1 + \frac{\theta}{2}s)}{K(\tau_f s + 1)}}{1 - \frac{(\tau_p s + 1)(1 + \frac{\theta}{2}s)}{K(\tau_f s + 1)} * \frac{K}{\tau_p s + 1} (\frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s})}$$

Reduciendo G_{PID} , queda la siguiente ecuación:

$$G_{PID} = \frac{(\tau_p s + 1)(1 + \frac{\theta}{2}s)}{K[(\tau_f s + 1) - (1 - \frac{\theta}{2}s)]}$$

$$G_{PID} = \frac{(\tau_p s + 1)(1 + \frac{\theta}{2}s)}{Ks(\tau_f s + \frac{\theta}{2})}$$

De la ecuación anterior, se deducen los parámetros del controlador para su sintonización:

$$\text{Ganancia Proporcional: } K_p = \frac{2\left(\frac{\tau_p}{\theta}\right)+1}{K[2\left(\frac{\tau_f}{\theta}\right)+1]}$$

$$\text{Constante de Tiempo Integral: } \tau_I = \frac{\theta}{2} + \tau_p$$

$$\text{Constante de Tiempo Derivativo: } \tau_D = \frac{\tau_p}{2\left(\frac{\tau_p}{\theta}\right)+1}$$

Retardo del sistema: θ

2.3.2 Estrategia de control ON/OFF

Es un tipo de controlador cuya función es alternar entre dos posiciones: encendido y apagado, mediante el uso de temporizadores en su mayoría. Es comúnmente utilizado por su simplicidad. Se requiere de un elemento de control final (FCE) sobre el cual se pueda implementar esta alternancia.

Sin embargo, el estar entre estos dos estados genera cierto desgaste, disminuye el ciclo de vida útil del elemento y aumenta los costos por mantenimiento del mismo.

A continuación, se muestran dos gráficas en paralelo, donde se ve cómo afecta un control ON/OFF en la variable de salida de un proceso.

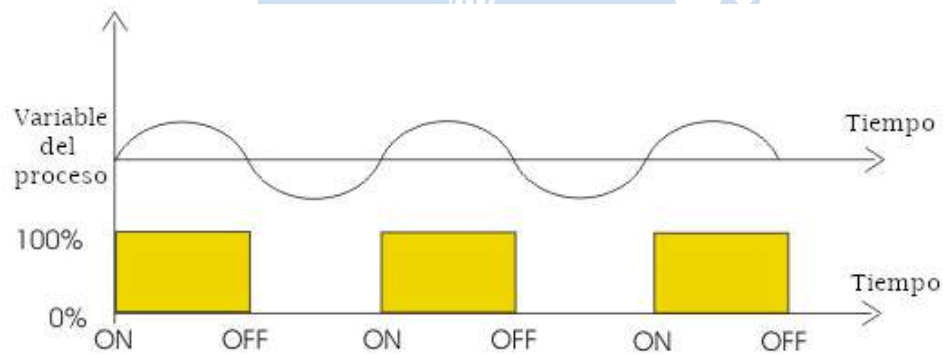


Figura 31. Respuesta de la variable del proceso frente a un controlador ON/OFF.

Fuente: Traducido de “On Off Control Theory” Electrical 4U (U, s.f.).

El controlador ON/OFF no posee la versatilidad de un PID, no es posible su implementación en la mayoría de procesos donde se requiere diferencia nula entre la variable de salida y la referencia. En el caso de la planta piloto de refrigeración, al aplicar un ON/OFF, se mantiene encendido el motor del compresor hasta llegar a la temperatura deseada donde se apaga, se vuelve a encender cuando se encuentra por encima de la temperatura deseada.

Esta estrategia de control es análoga a un control proporcional con una ganancia de controlador muy alta.

Capítulo 3

Diseño y desarrollo del modelo y del controlador del proyecto

El presente capítulo abarca cuatro pasos esenciales de la tesis. En primer lugar, se muestran los experimentos realizados en la planta piloto clasificados en tres tipos de pruebas lo que se presenta en el apartado 3.1. En segundo lugar, se clasifican los datos extraídos de las pruebas realizadas para procesarlos en la herramienta de MATLAB llamada “*System Identification Toolbox*”, lo cual se detalla en el apartado 3.2. En tercer lugar, mediante la elección del modelo que se adecúe al proceso, como se ve en el apartado 3.3, se realiza la sintonización del controlador PID IMC y se simula utilizando *Simulink* de MATLAB. Finalmente, en el apartado 3.4 se muestran los experimentos de la implementación de dicho controlador en la planta piloto de refrigeración.

3.1 Pruebas en la planta piloto con banano

La capacidad máxima del túnel de enfriamiento es de 2 toneladas.

Cabe destacar que la cantidad de banano orgánico dentro del túnel de enfriamiento solo es referencial; es decir, no se intenta controlar directamente la temperatura de la pulpa de la fruta, solamente se espera controlar la temperatura del túnel mediante datos que se extrae del sensor de temperatura ambiente. En el caso del banano orgánico, se debe conservar el túnel entre los 12°C a 14°C para almacenamiento y transporte (Barrett, Somogyi, & Ramaswamy, 2005).

A continuación, se muestran los resultados de los experimentos realizados en la planta piloto de refrigeración industrial de la Universidad de Piura durante el mes de abril del año 2019.



Figura 32. Banano Orgánico dentro del túnel de enfriamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Cada experimento en la planta piloto del sistema de refrigeración ha contado con un aproximado de 2 - 3 pruebas.

El primer experimento consistió en enfriar el túnel con una carga de 250 kg de banano a lazo abierto, variando la frecuencia del motor que acciona al compresor desde 25 Hz hasta 40 Hz por escalones de 5 en 5 Hz.

El criterio para usar escalones de frecuencia ha sido esperar a que se llegue a un valor estacionario en la temperatura del túnel de enfriamiento, con el objetivo de identificar a qué determinado valor de frecuencia como entrada se tiene un valor de temperatura estacionaria.

El segundo experimento consistió en tener como entrada a una señal PRBS (*Pseudo-Random Binary Sequence*), de tal manera que, con los datos extraídos de tres pruebas de experimentación - variables como la temperatura del túnel, la frecuencia del compresor y la temperatura ambiente - se pudiera realizar el modelamiento del túnel de frío mediante identificación. Asimismo, se pudiera obtener una función de transferencia del proceso.

Finalmente, mediante el tercer experimento, se realizaron tres pruebas con distintas señales PRS teniendo la misma carga de banano, con lo cual se obtuvo un modelo no lineal. Además, con estos datos se puede analizar posibles controles avanzados que, en un futuro, puedan implementarse en la planta piloto de refrigeración industrial.

3.1.1 Experimento N°1: Entrada escalón

El primer experimento en la planta piloto del sistema de refrigeración ha contado con dos pruebas. La amplitud del escalón se considera de 5 Hz, debido a que el rango de trabajo del motor del compresor es de 25 Hz a 80 Hz, por lo que se busca tener múltiplos de cinco para, posteriormente tener una señal PRBS simétrica.

La duración de ambas pruebas depende del tiempo que se demore la temperatura del túnel en llegar a un valor estacionario en cada escalón para aplicar uno siguiente, hasta llegar a los 10 °C, la cual es la menor temperatura que soporta el banano orgánico (Kader, 1996).

Se tiene una carga de 250 kg de banano orgánico.

- Prueba n° 1: 02/04/2019

La prueba duró desde las 10:37 a.m. hasta 17:12 p.m. Cuenta con un total de 6 horas y 35 minutos.

Se empezó con un valor de frecuencia del motor que acciona del compresor de 25 Hz, llegó a un valor estacionario de 17.95°C dentro del túnel, momento en el cual se le aplica el primer escalón de 30 Hz, se llegó a un valor estacionario de 13.11°C dentro del túnel.

Las imágenes de los resultados de esta prueba se encuentran en el apéndice B.

- Prueba n° 2: 03/04/2019

La prueba inició a las 07:43 a.m. hasta 11:20 a.m. Cuenta con un total de 3 horas y 37 minutos.

Se empezó con un valor de frecuencia en el compresor de 30Hz, se esperó a que se tuvieran las mismas condiciones del día anterior; es decir, que el valor de temperatura en el túnel llegue a 13.11°C en estado estacionario, para aplicar un nuevo escalón de frecuencia de valor de 35Hz.

En el segundo escalón de 35 Hz se llegó a un valor estacionario de 11.58°C dentro del túnel. En el tercer escalón de 40 Hz se llegó a un valor estacionario de 10.48°C dentro del túnel. Debido a que la temperatura más baja que soporta el banano orgánico es de 10°C, se decidió detener el experimento en este escalón.

Las imágenes de los resultados de esta prueba se encuentran en el apéndice B.

El análisis de los resultados de este experimento se explica en el apartado 4.1.

3.1.2 Experimento N°2: Señal de entrada PRBS

La señal PRBS se generó en el entorno de “*Command Window*” en MATLAB (el código se puede encontrar en el apéndice A.1). Los criterios asumidos para su creación son: un valor mínimo de 25 Hz y valor máximo de 35 Hz (rango deducido del experimento anterior, véase apartado 4.1), la frecuencia media es de 30 Hz, un periodo de 3,000 segundos y una máxima duración para 30,000 muestras, lo que equivale a un aproximado de 8 horas y media por prueba.

Adicionalmente, se le ha agregado un intervalo de 1,200 segundos con una frecuencia de 30 Hz al inicio del experimento, esto sirve para obtener un pre-enfriamiento del túnel.

Se generan tres señales PRBS distintas que se ingresan al SCADA del software LabView y se transmite por el PLC al sistema de frío en tres pruebas distintas, como se puede apreciar en la Tabla 8, donde se enlistan las características de dichas pruebas.

Tabla 8.

Resultados de los experimentos con señales PRBS.

Características	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Fecha	04/04/2019	05/04/2019	08/04/2019
Hora de inicio	9:05 am	9:07 am	8:16 am
Hora final	17:25 pm	17:27 pm	16:36 pm
Duración (Horas)	8hr 20 min	8hr 20 min	8hr 20 min
N° de muestras	30 000	30 000	30 000
Amplitud mínima	25 Hz	25 Hz	25 Hz
Amplitud Máxima	35 Hz	35Hz	35 Hz
Ancho de pulso promedio	20 minutos	20 minutos	20 minutos
Temperatura Inicial del Túnel	18.42 °C	12.94 °C	18.85 °C
Temperatura Final del Túnel	11.6 °C	10.98 °C	11.89 °C
Temperatura Ambiente Inicial	27.2 °C	27.27 °C	25.57 °C
Temperatura Ambiente Final	32.04 °C	31.18 °C	31.83 °C

Fuente: Elaboración propia

Las imágenes de los resultados de estas pruebas se encuentran en el apéndice B.2.

3.1.3 Experimento N°3: Señal de entrada PRS

La señal PRS se generó en el entorno de “*Command Window*” en MATLAB (el código se puede encontrar en el apéndice A.2); las características de esta señal, se muestran a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9.

Características de la señal PRS.

Características	Valor
Mínimo valor de frecuencia	25 Hz
Máximo valor de frecuencia	35 Hz
Valor de inicio	30 Hz
Mínima duración de pulso	300 s
Máxima duración de pulso	1 800 s
Tiempo de inicialización	1 500 s
Niveles de escalera	6
Tiempo total de la señal	30 000 s

Fuente: Elaboración propia.

Se generan tres señales PRS distintas que se ingresan al software LabView y se transmite por el PLC al sistema de frío en tres pruebas distintas, como se puede apreciar en la Tabla 10, donde se enlistan las características de dichas pruebas.

Tabla 10.

Resultados de los experimentos con señales PRS.

Características	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Fecha	12/04/2019	15/04/2019	17/04/2019
Hora de inicio	8:35 am	8:08 am	7:32 am
Hora final	16:55 pm	16:28 pm	15:46 pm
Duración	8hr 20 min	8hr 20 min	8hr 14 min
N° de muestras	30 000	30 000	29 663
Amplitud mínima	25 Hz	25 Hz	25 Hz
Amplitud Máxima	35 Hz	35 Hz	35 Hz
Ancho de pulso promedio	20 min	20 min	20 min
Temperatura Inicial del Túnel	22.95 °C	24.49 °C	25.57 °C
Temperatura Final del Túnel	12.86 °C	13.57 °C	12.6 °C
Temperatura Ambiente Inicial	24.41 °C	28.18 °C	23.85 °C
Temperatura Ambiente Final	31.77 °C	32.72 °C	33.19 °C

Fuente: Elaboración propia

Las imágenes de los resultados de estas pruebas se encuentran en el apéndice B.3.

3.2 Identificación y Modelamiento del sistema

En primer lugar, se debe configurar las señales de entrada y de salida que tendrá el proceso para adecuarlo al modelo del sistema. Como entrada, se tiene la variación de frecuencia del compresor y como salida se tiene la temperatura del túnel de frío. Además, se tiene un disturbio que es la temperatura ambiente, la cual se modela como una entrada adicional.

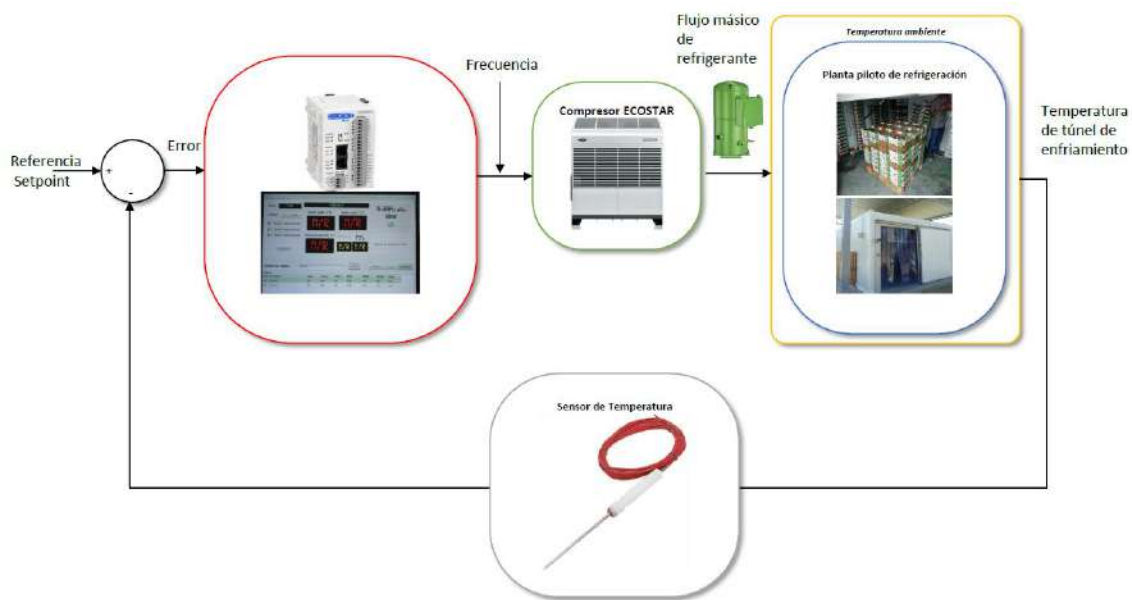


Figura 33. Esquema de control a lazo cerrado.

Fuente: Elaboración propia.

Para poder analizar los datos obtenidos de manera experimental, se cuenta con la herramienta de MATLAB llamada “*System Identification Toolbox*”.

El análisis empieza estableciendo los datos de estimación y los datos para la validación, como se requiere en la herramienta.

En esta sección se presentan dos señales generadas por comando en MATLAB: PRBS y PRS; con la primera señal se hará la identificación de una función de transferencia de modelo lineal, y con la segunda, se tendrá no solo una función de transferencia sino también una aproximación de modelo no lineal.

Ambas señales se ingresan al proceso mediante el SCADA, que con ayuda del PLC comanda el funcionamiento del sistema Ecostar.

3.2.1 Modelo con la prueba PRBS

3.2.1.1 Primer conjunto

Se tiene un primer grupo de identificación, el cual cuenta con 30,000 muestras, utilizando el toolbox antes mencionado:

Grupo N° 1:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 4/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 2, realizada el 5/4/19 (color rojo).

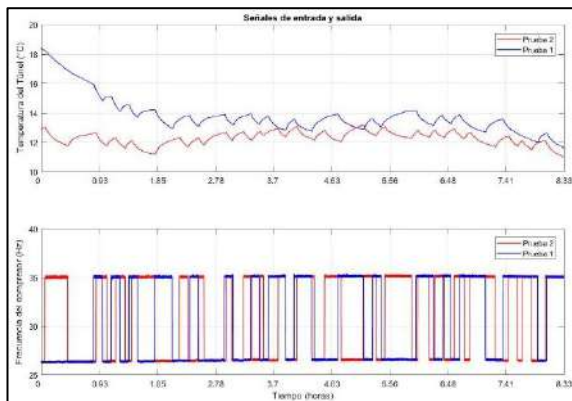


Figura 34. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

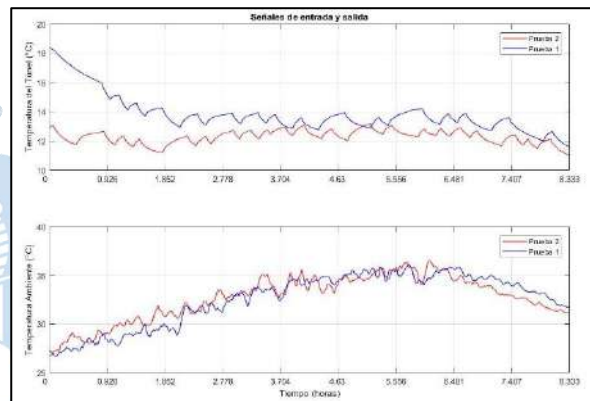


Figura 35. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes ajustes:

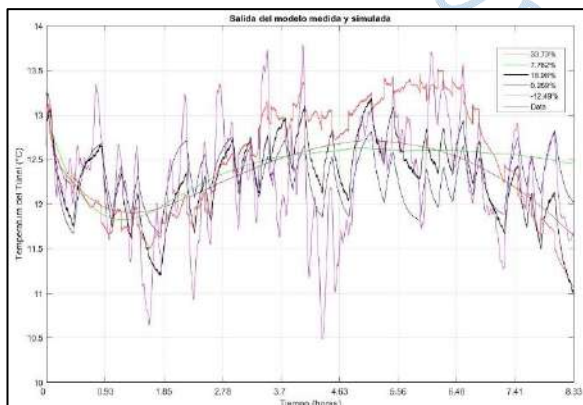


Figura 36. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

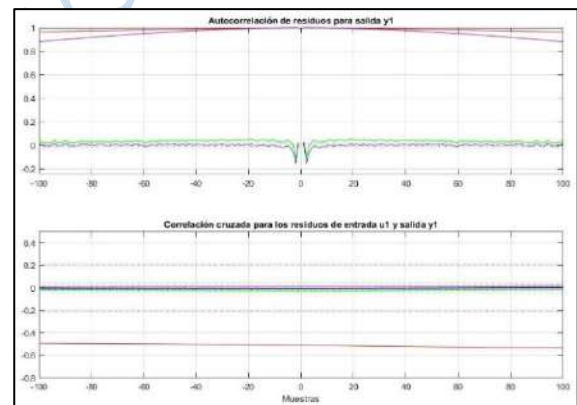


Figura 37. Análisis de residuos.

Se tiene un segundo proceso de identificación utilizando el toolbox antes mencionado:

Grupo N° 2:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 4/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 8/4/19 (color rojo).

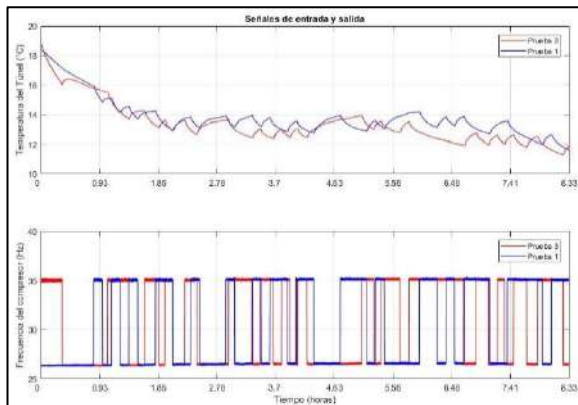


Figura 38. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

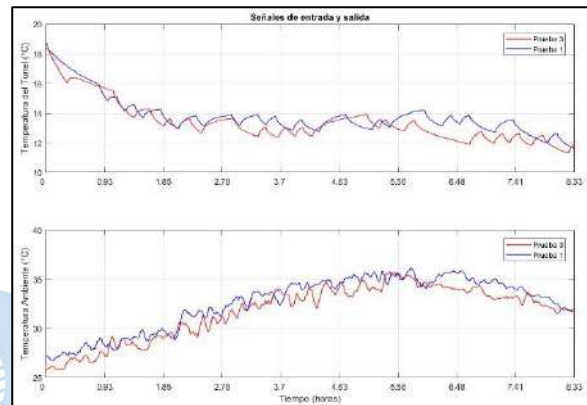


Figura 39. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes ajustes:

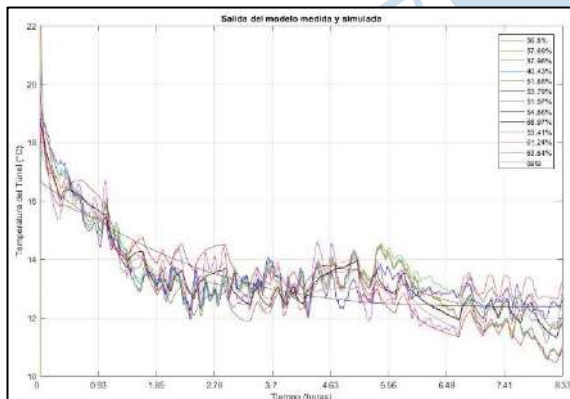


Figura 40. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

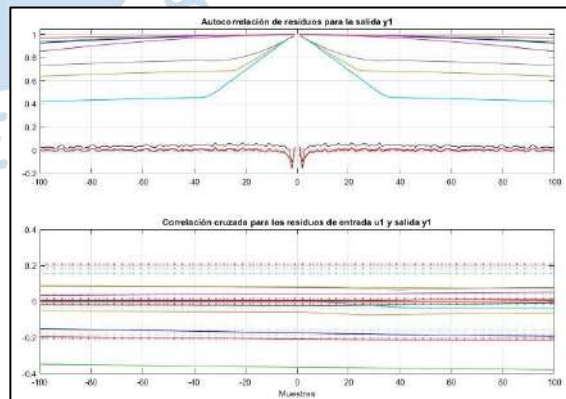


Figura 41. Análisis de residuos.

Se tiene un tercer grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado:

Grupo N° 3:

Datos de estimación: Prueba 2, realizada el 5/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 8/4/19 (color rojo).

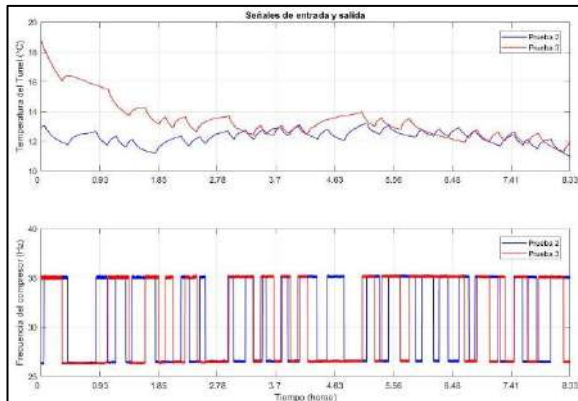


Figura 42. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia.

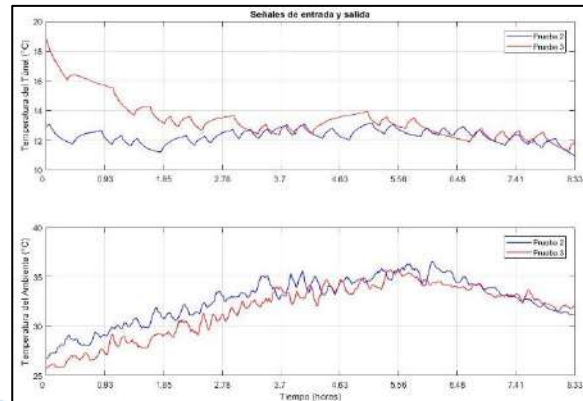


Figura 43. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

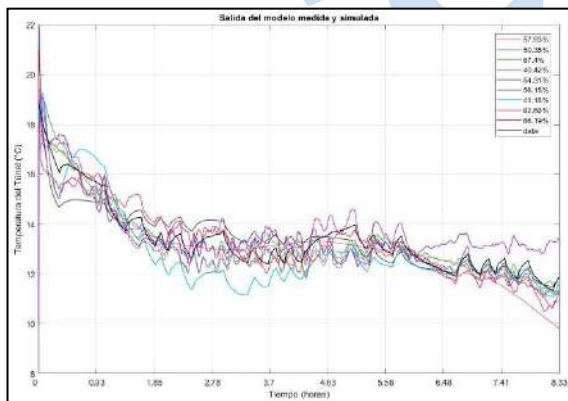


Figura 44. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia.

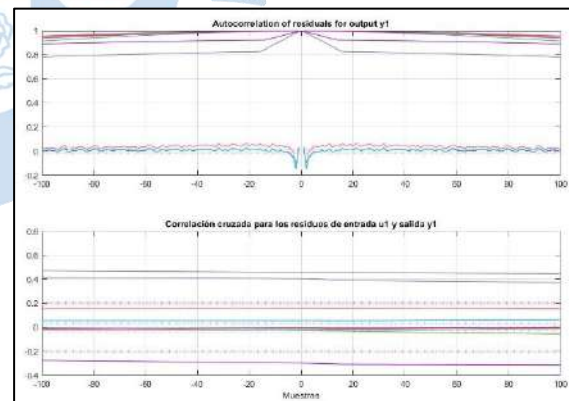


Figura 45. Análisis de residuos.

3.2.1.2 Segundo conjunto

Debido a un análisis de sensibilidad realizado en los datos extraídos, de las aproximadas 31,200 muestras de cada uno de los experimentos que se vieron anteriormente, se extraen unos 5,000 datos, quedando 26,200 muestras.

Grupo N° 1:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 4/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 2, realizada el 5/4/19 (color rojo).

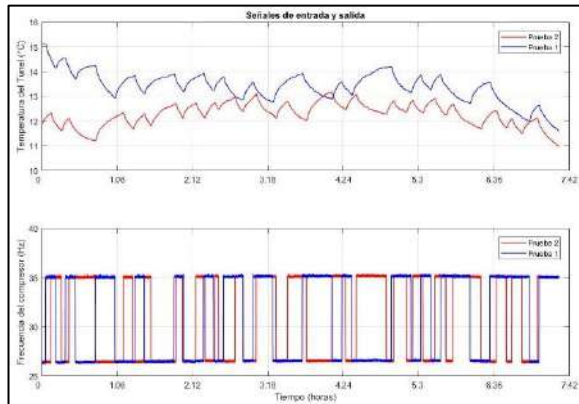


Figura 46. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

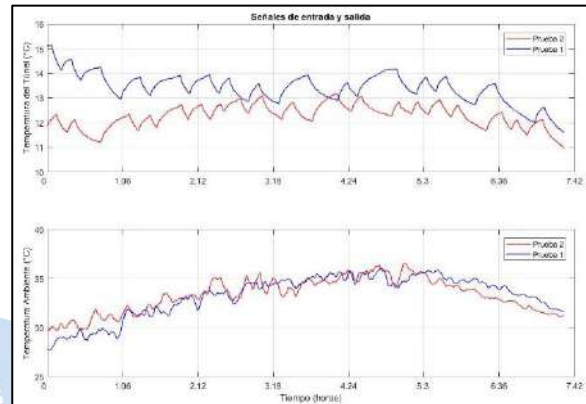


Figura 47. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes ajustes:

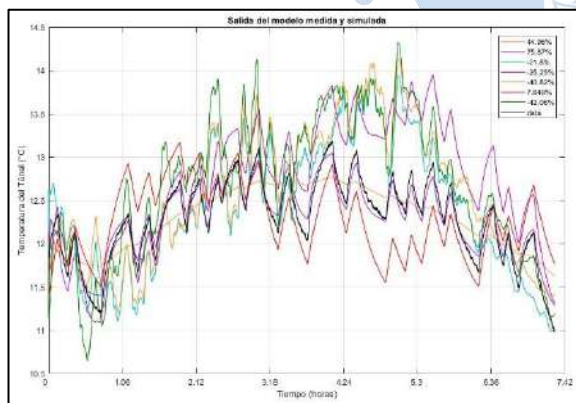


Figura 48. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

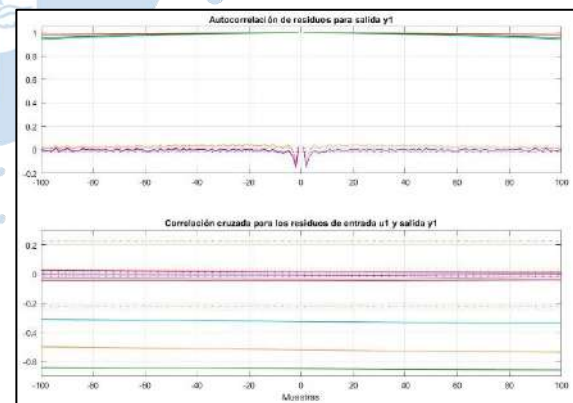


Figura 49. Análisis de residuos.

Se tiene un segundo grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 26,200 muestras:

Grupo N°2:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 4/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 8/4/19 (color rojo).

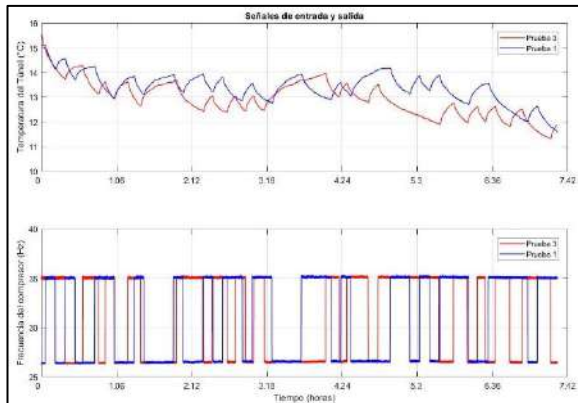


Figura 50. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

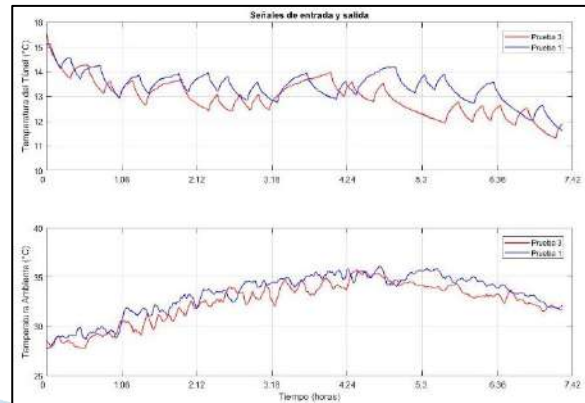


Figura 51. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes ajustes:

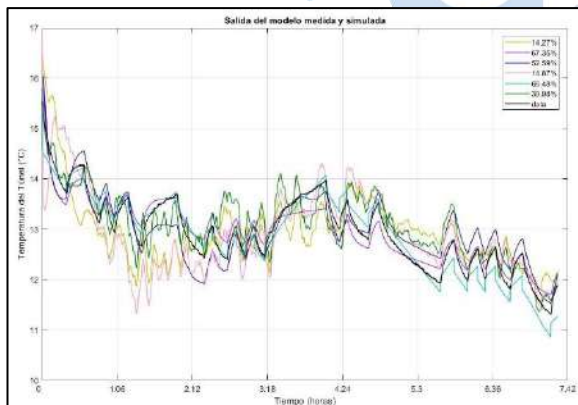


Figura 52. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

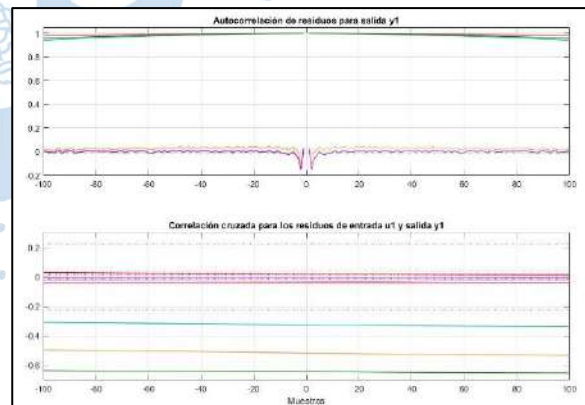


Figura 53. Análisis de residuos.

Se tiene un tercer grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 26,200 muestras:

Grupo N°3:

Datos de estimación: Prueba 2, realizada el 5/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 8/4/19 (color rojo).

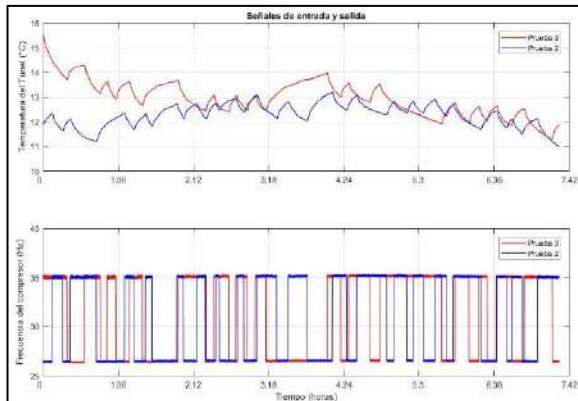


Figura 54. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia.

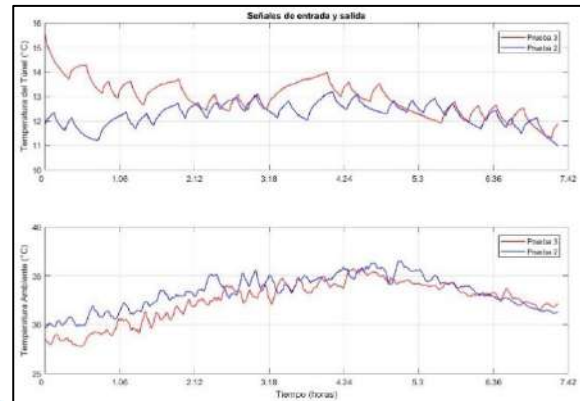


Figura 55. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

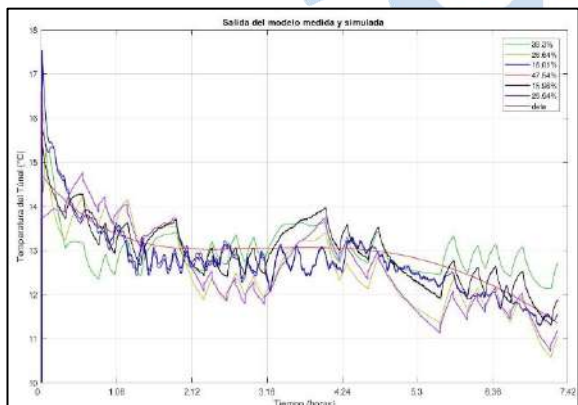


Figura 56. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia.

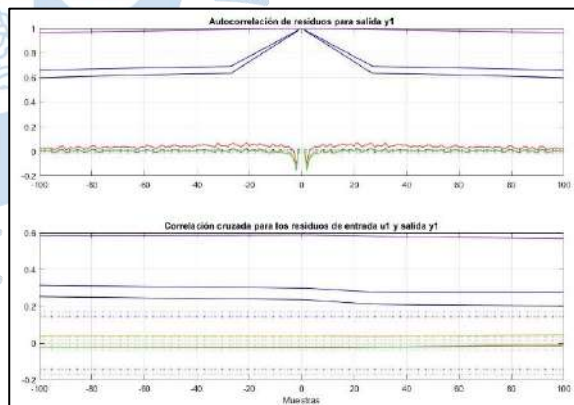


Figura 57. Análisis de residuos.

3.2.1.3 Tercer conjunto

Debido a un segundo análisis de sensibilidad realizado en los datos extraídos, de 26,200 muestras de cada uno de los experimentos que se han visto previamente, se agregó un tiempo de muestreo de 5 segundos, generando un promedio cada cinco datos, quedando 5,240 muestras.

Grupo N°1:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 4/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 2, realizada el 5/4/19 (color rojo).

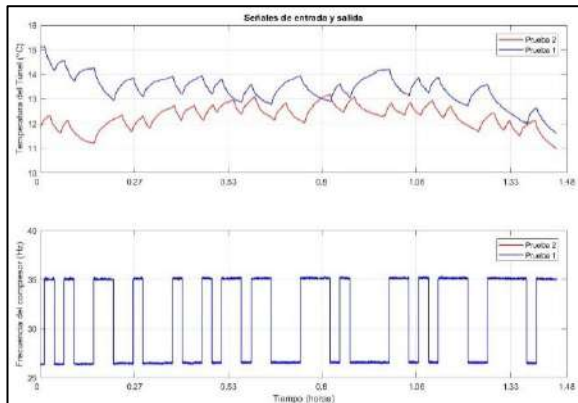


Figura 58. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

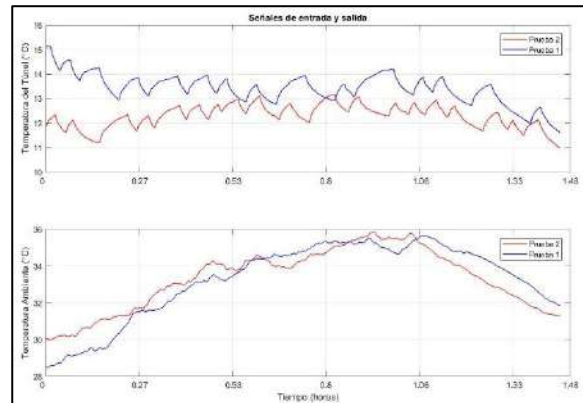


Figura 59. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes ajustes:

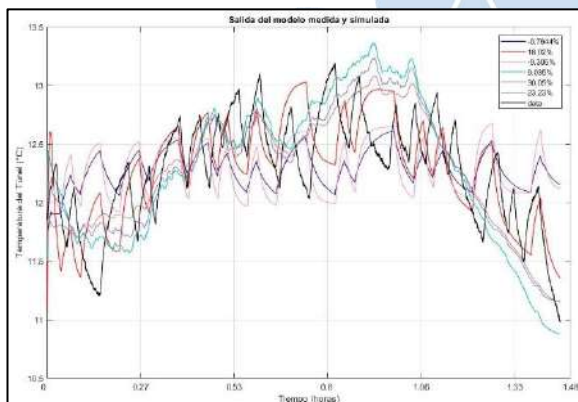


Figura 60. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

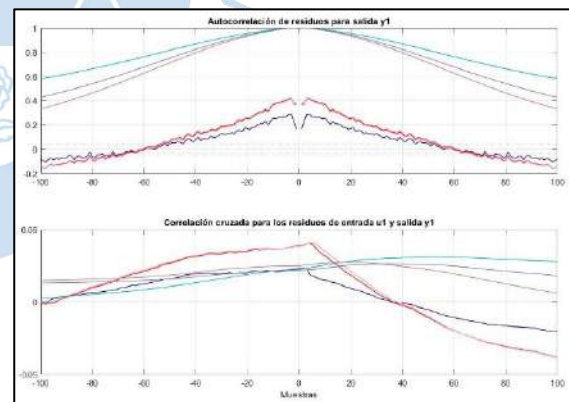


Figura 61. Análisis de residuos.

Se tiene un segundo grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 5,240 muestras:

Grupo N°2:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 4/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 8/4/19 (color rojo).

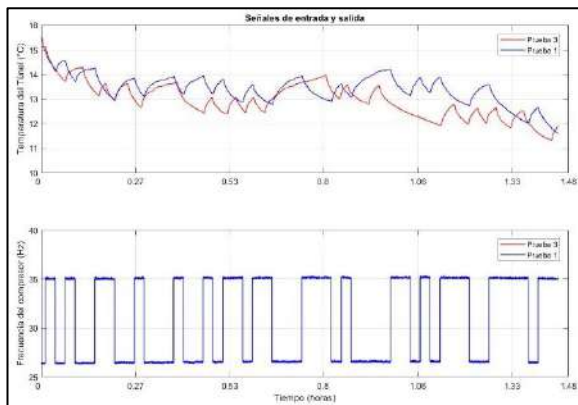


Figura 62. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

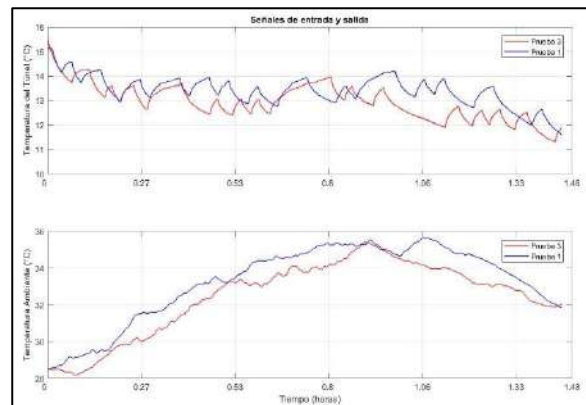


Figura 63. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes ajustes:

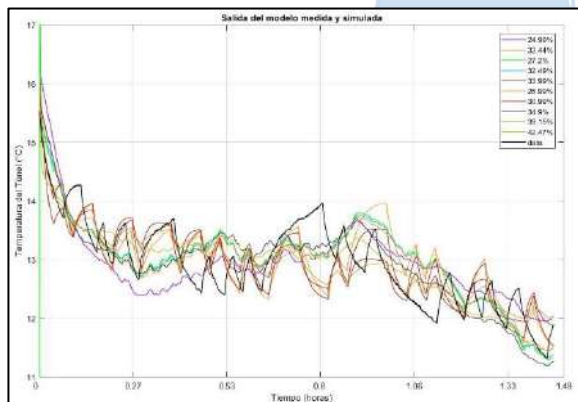


Figura 64. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

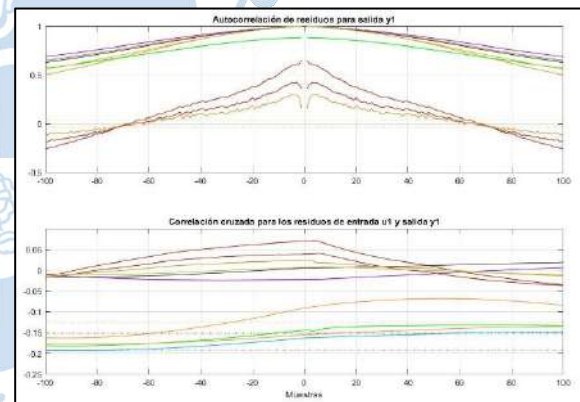


Figura 65. Análisis de residuos.

Se tiene un tercer grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 5,240 muestras:

Grupo N°3:

Datos de estimación: Prueba 2, realizada el 5/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 8/4/19 (color rojo).

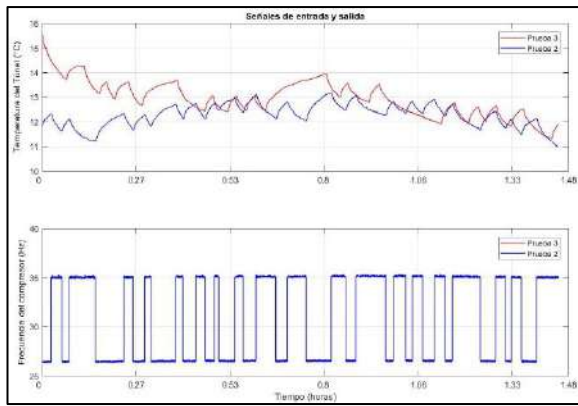


Figura 66. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRBS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia.

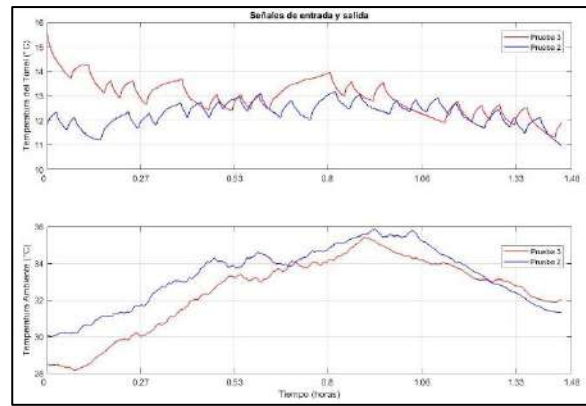


Figura 67. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

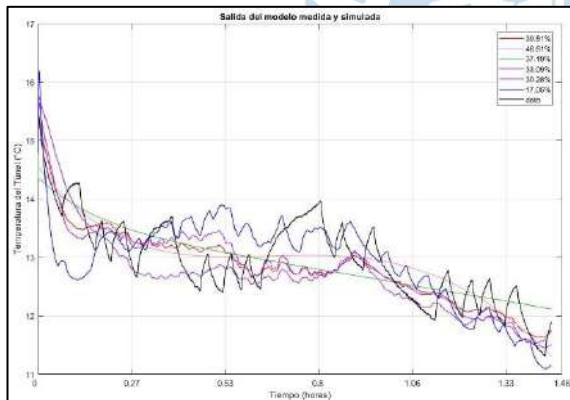


Figura 68. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia.

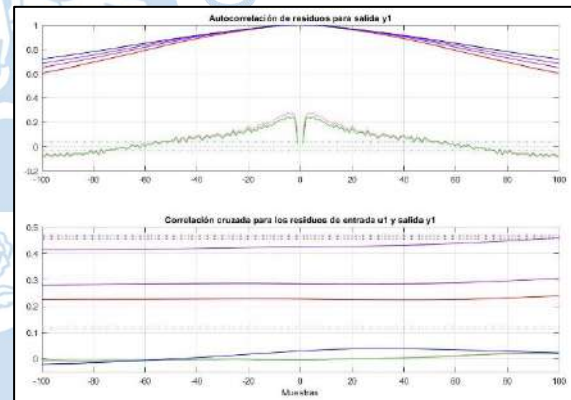


Figura 69. Análisis de residuos.

Se realizará un posterior análisis de cada grupo de datos en el capítulo 4.

3.2.2 Modelo con la prueba PRS

3.2.2.1 Primer conjunto

De igual manera, con las señales PRS generadas para tres pruebas de experimentación, se obtienen datos que se agruparán de la siguiente manera:

Grupo N° 4:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 12/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 2, realizada el 15/4/19 (color rojo).

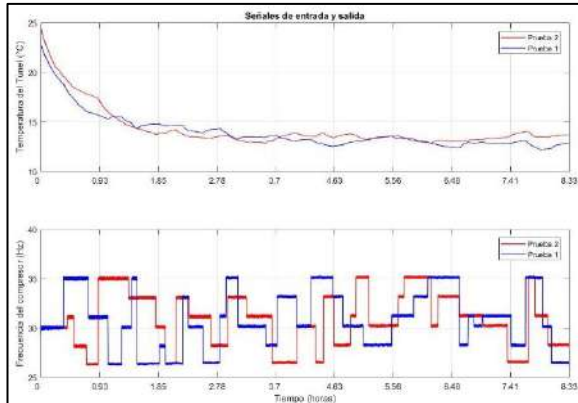


Figura 70. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

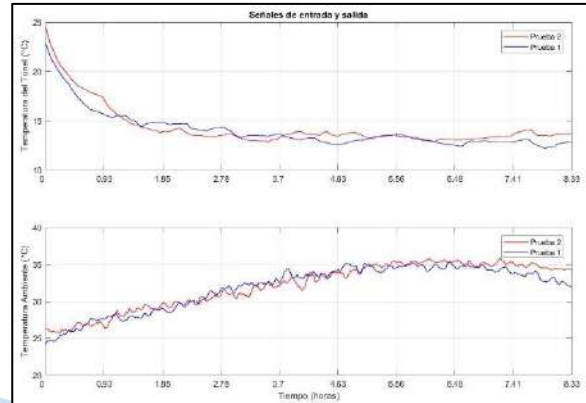


Figura 71. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

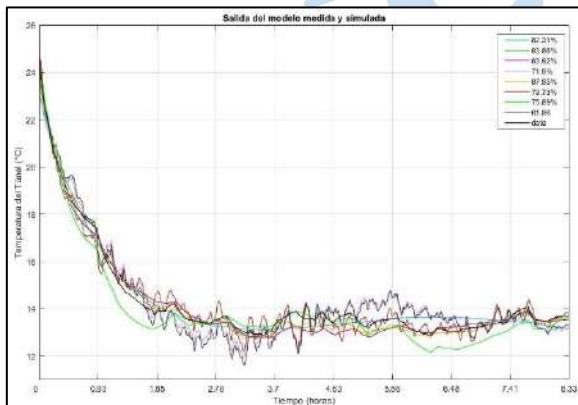


Figura 72. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

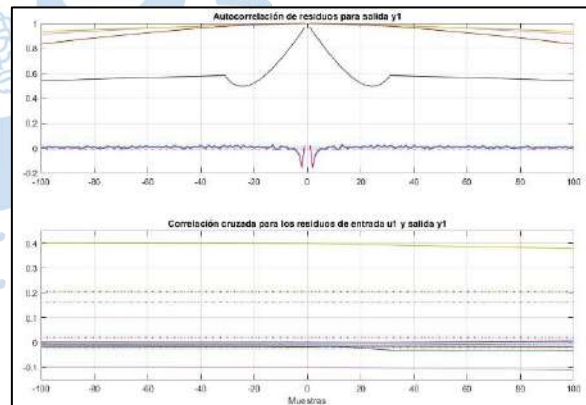


Figura 73. Análisis de residuos.

Se tiene un segundo grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado:

Grupo N°5:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 12/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 17/4/19 (color rojo).

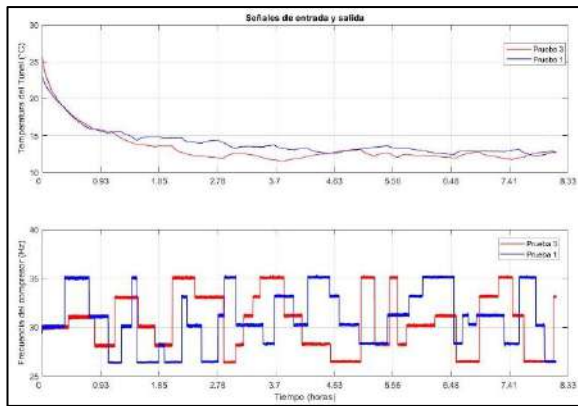


Figura 74. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

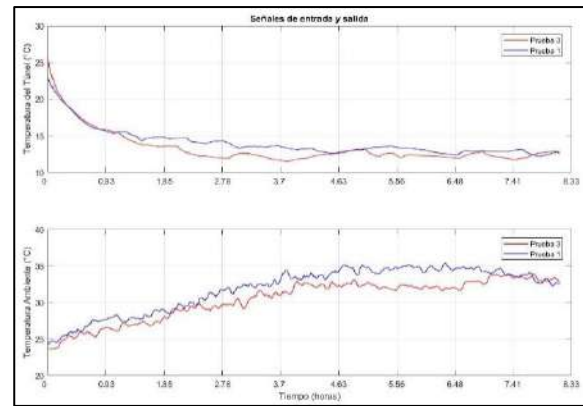


Figura 75. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

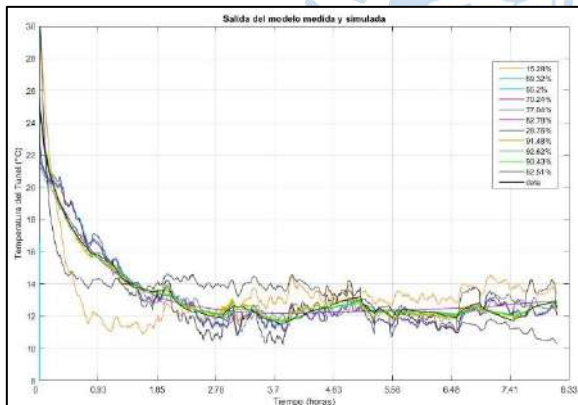


Figura 76. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

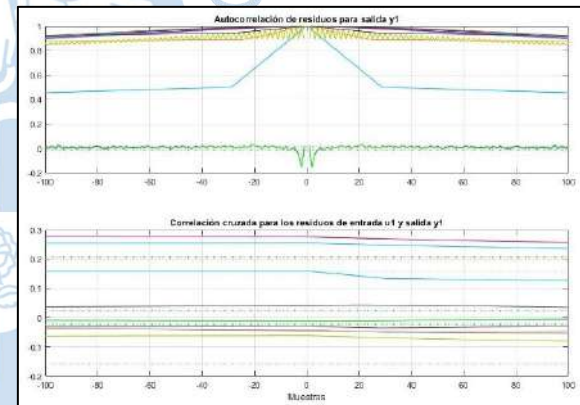


Figura 77. Análisis de residuos.

Se tiene un tercer grupo de identificación con PRS utilizando el toolbox antes mencionado:

Grupo N° 6:

Datos de estimación: Prueba 2, realizada el 15/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 17/4/19 (color rojo).

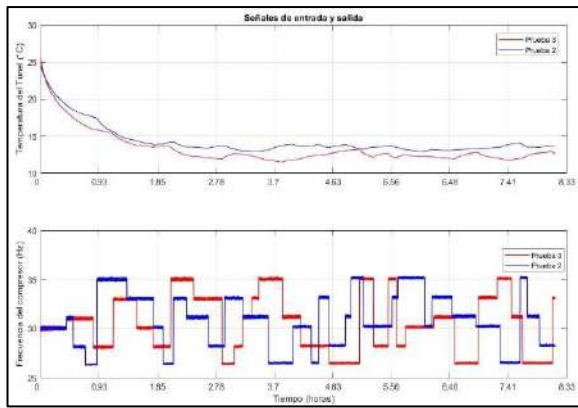


Figura 78. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

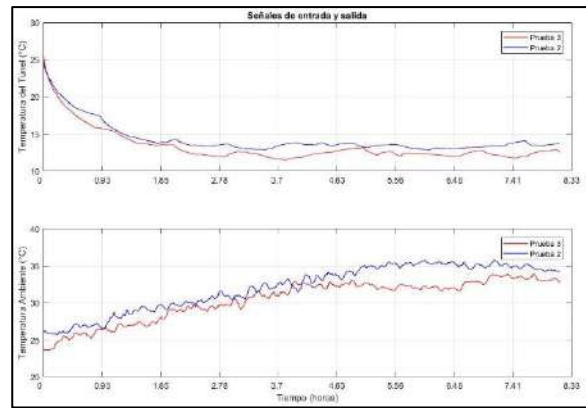


Figura 79. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

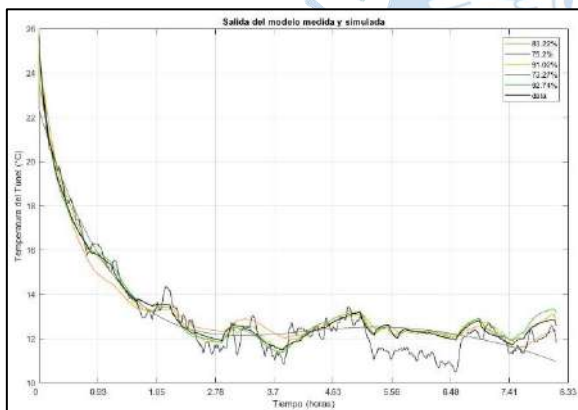


Figura 80. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

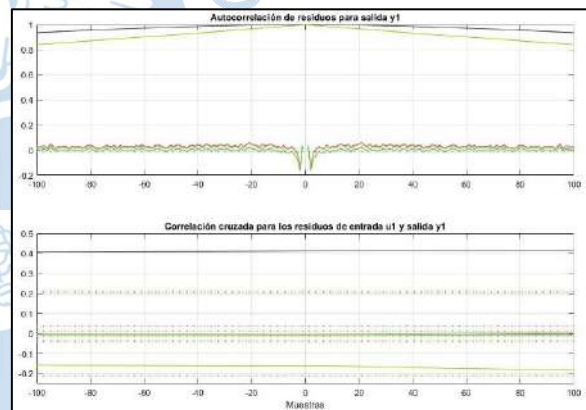


Figura 81. Análisis de residuos.

3.2.2.2 Segundo conjunto

Debido a un análisis de sensibilidad realizado en los datos extraídos, de las 30,000 muestras de cada uno de los experimentos que se vieron en el apartado anterior, se extraen unos 5,000 datos del inicio, quedando 25,000 muestras.

Grupo N° 4:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 12/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 2, realizada el 15/4/19 (color rojo).

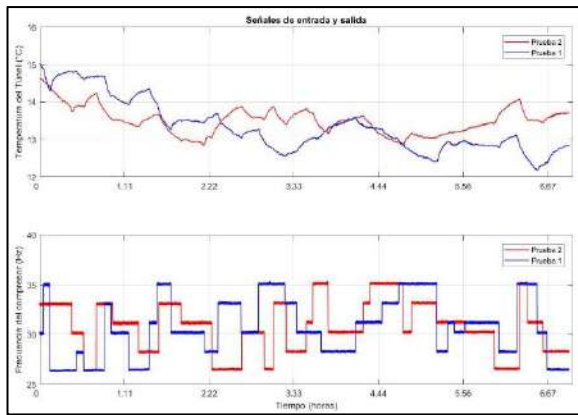


Figura 82. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

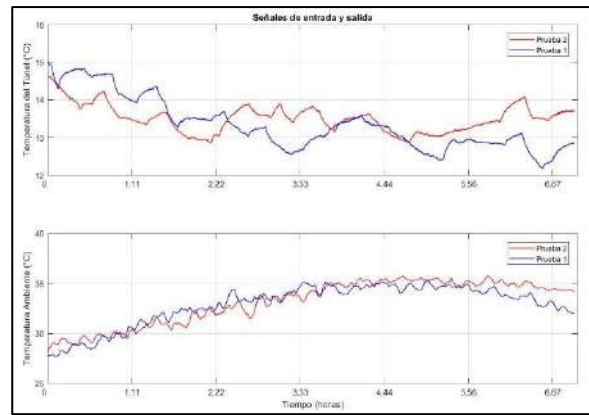


Figura 83. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

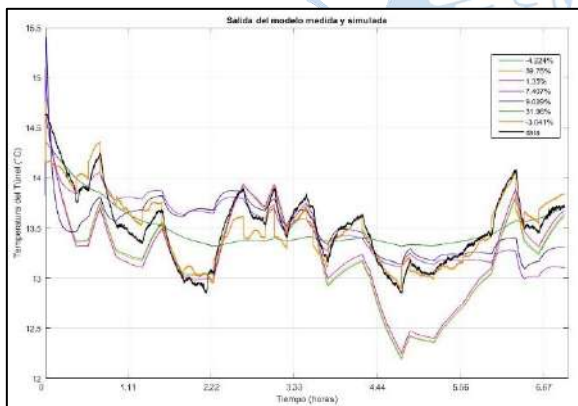


Figura 84. Ajuste de modelos experimentales.

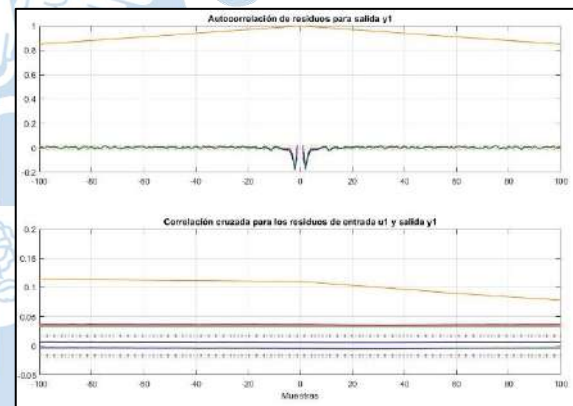


Figura 85. Análisis de residuos – Modelos del primer experimento con PRS.

Fuente: Elaboración Propia

Se tiene un segundo proceso de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 25,000 muestras:

Grupo N° 5:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 12/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 17/4/19 (color rojo).

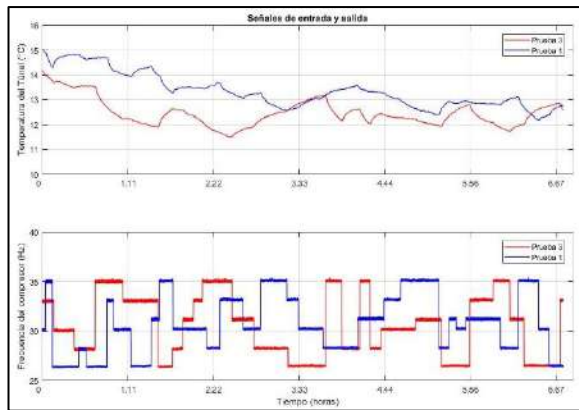


Figura 86. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

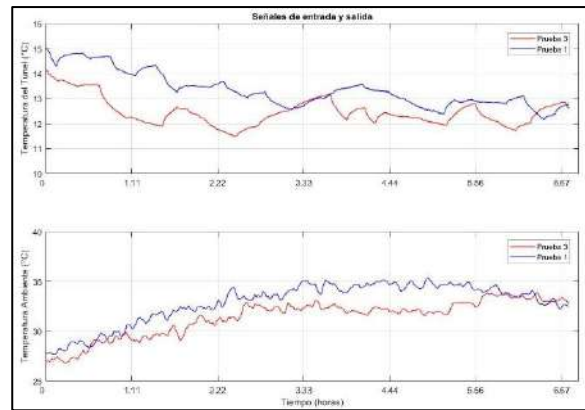


Figura 87. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

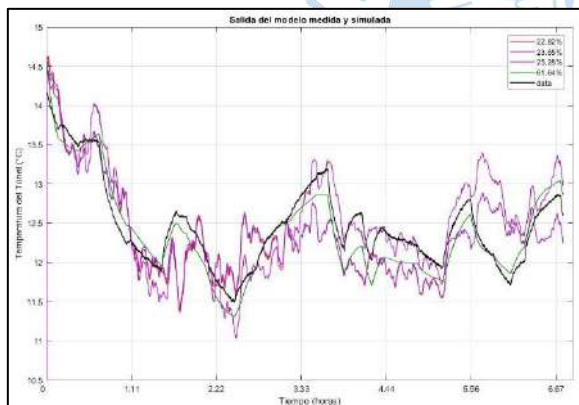


Figura 88. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

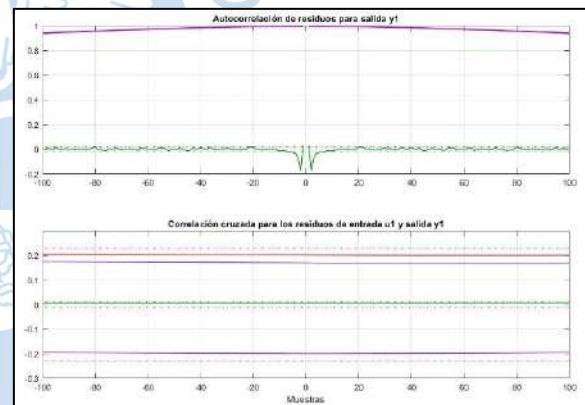


Figura 89. Análisis de residuos.

Se tiene un tercer grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 25,000 muestras:

Grupo N° 6:

Datos de estimación: Prueba 2, realizada el 15/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 17/4/19 (color rojo).

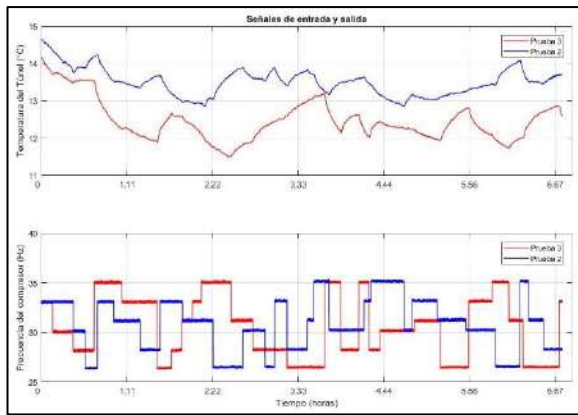


Figura 90. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

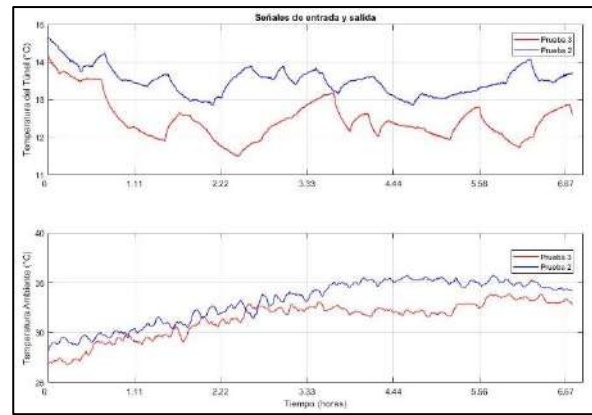


Figura 91. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

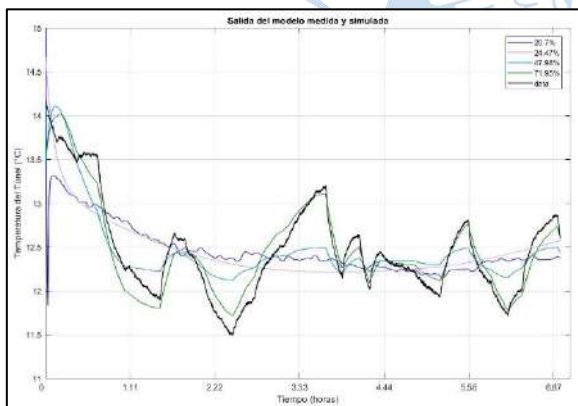


Figura 92. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

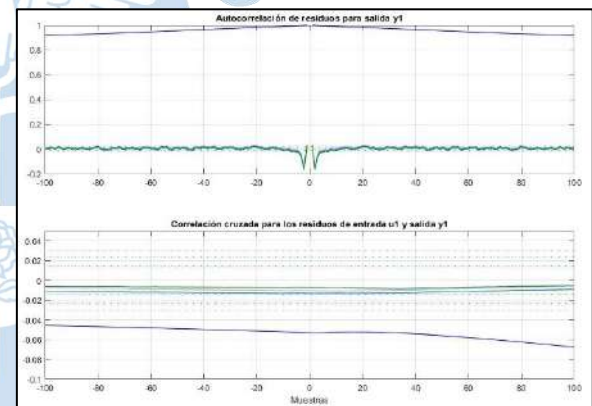


Figura 93. Análisis de residuos.

3.2.2.3 Tercer conjunto

Debido a un segundo análisis de sensibilidad realizado en los datos extraídos, de 25,000 muestras de cada uno de los experimentos que se vieron en el apartado anterior, se agregó un tiempo de muestreo de 5 segundos, generando un promedio cada cinco datos, quedando 5,000 muestras.

Grupo N° 4:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 12/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 2, realizada el 15/4/19 (color rojo).

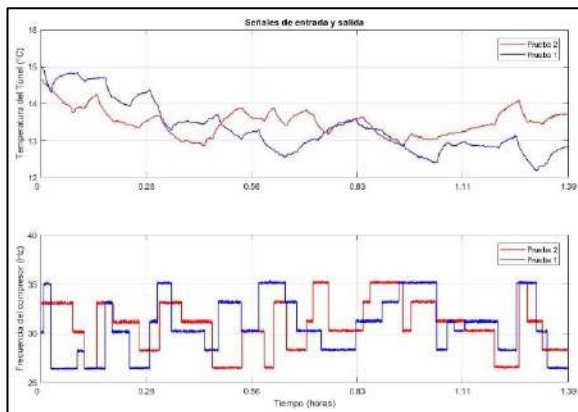


Figura 94. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

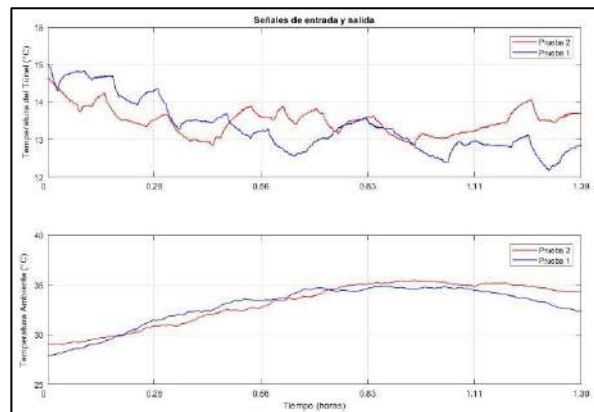


Figura 95. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

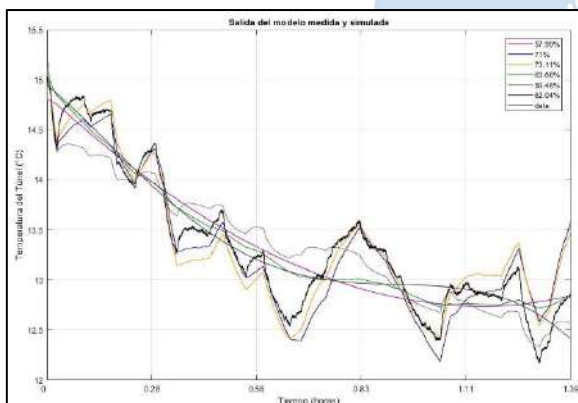


Figura 96. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

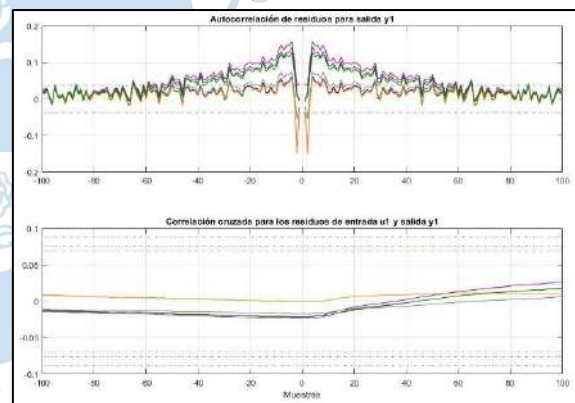


Figura 97. Análisis de residuos.

Se tiene un segundo grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 5,000 muestras:

Grupo N°5:

Datos de estimación: Prueba 1, realizada el 12/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 17/4/19 (color rojo).

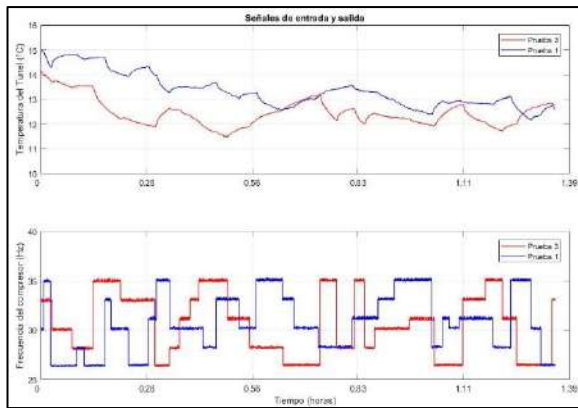


Figura 98. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

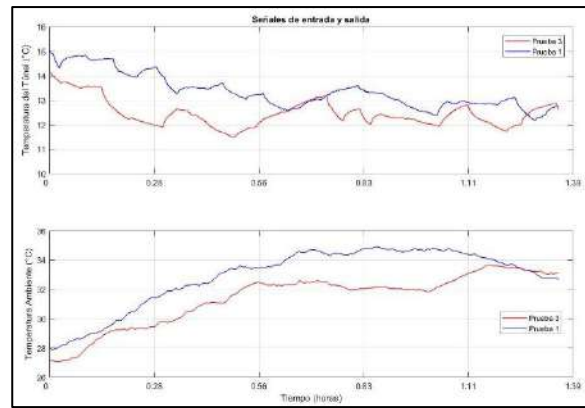


Figura 99. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

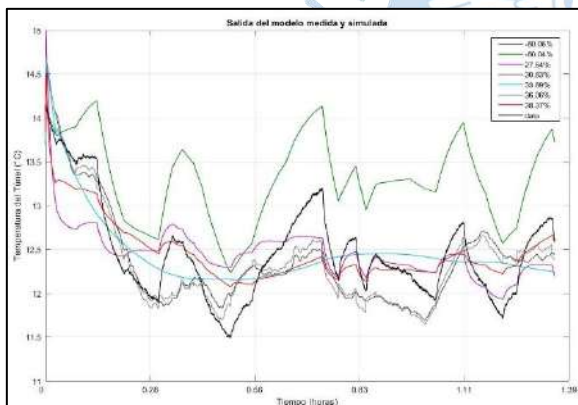


Figura 100. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

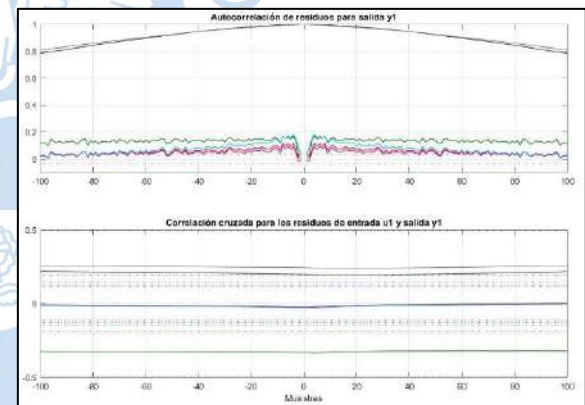


Figura 101. Análisis de residuos.

Se tiene un tercer grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado, esta vez con 5,000 muestras:

Grupo N° 6:

Datos de estimación: Prueba 2, realizada el 15/4/19 (color azul).

Datos de validación: Prueba 3, realizada el 17/4/19 (color rojo).

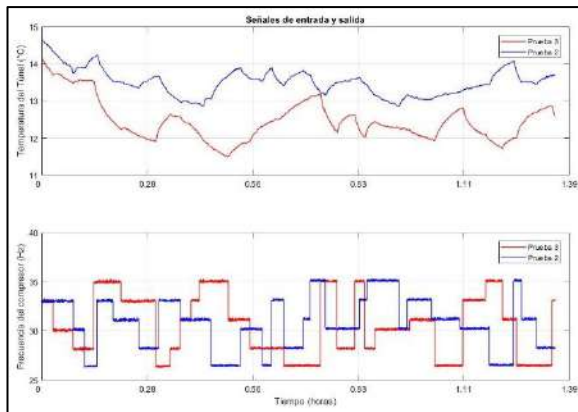


Figura 102. Temperatura del túnel de enfriamiento vs señal de entrada PRS de frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración Propia

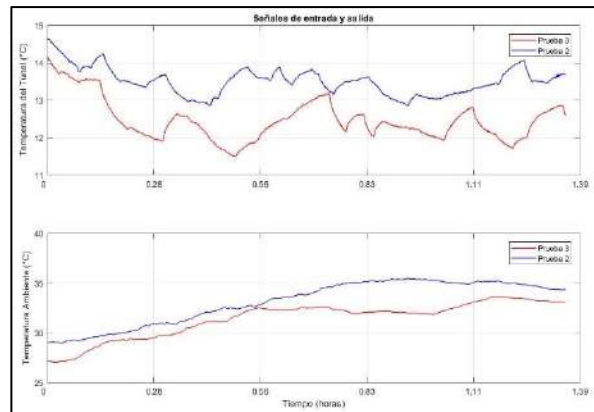


Figura 103. Temperatura del túnel de enfriamiento vs Temperatura externa.

Luego de ingresados ambos datos a la herramienta de MATLAB, se generan distintos modelos; por lo que se tienen los siguientes modelos de ajustes:

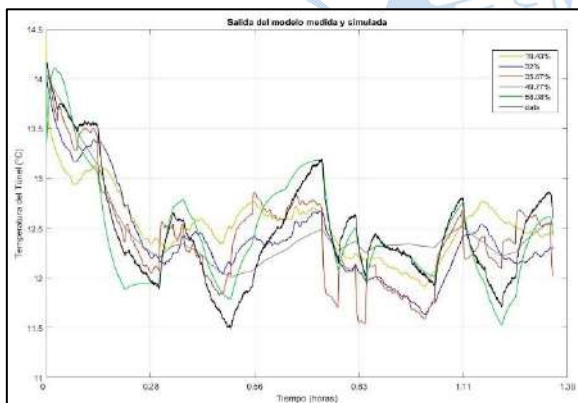


Figura 104. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

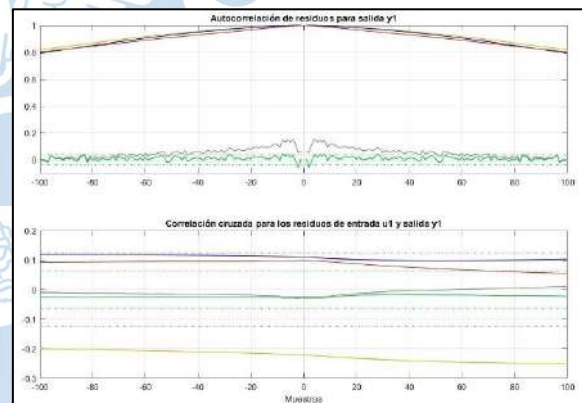


Figura 105. Análisis de residuos.

Se realizará un posterior análisis de cada grupo de datos en el capítulo 4.

3.3 Diseño del control PID IMC

Luego del proceso de identificación mediante la herramienta de Matlab llamada “*System Identification Toolbox*”, se obtuvieron diferentes modelos (cuyo análisis se explicará con más detalle en el capítulo 4), de los cuales se escogió una función de transferencia con tres polos y un cero:

P3DZd =

$$y = G_{11}(s)*u_1 + G_{12}(s)*u_2$$

$$G_{11}(s) = (-0.30618) * \frac{1+1.2067*10^7*s}{(1+5.663*10^7*s)*(1+2.4678*s)*(1+5.4426*10^6*s)} * e^{(-4.6698*10^5*s)}$$

$$G_{12}(s) = (0.16442) * \frac{1+1.506*10^7*s}{(1+5.56*10^6*s)*(1+87.11*s)*(1+4.3174*10^7*s)} * e^{(-1.2864*10^6*s)}$$

Se ingresan los datos anteriores en bloques de Simulink, la estructura básica del control PID IMC se muestra a continuación:

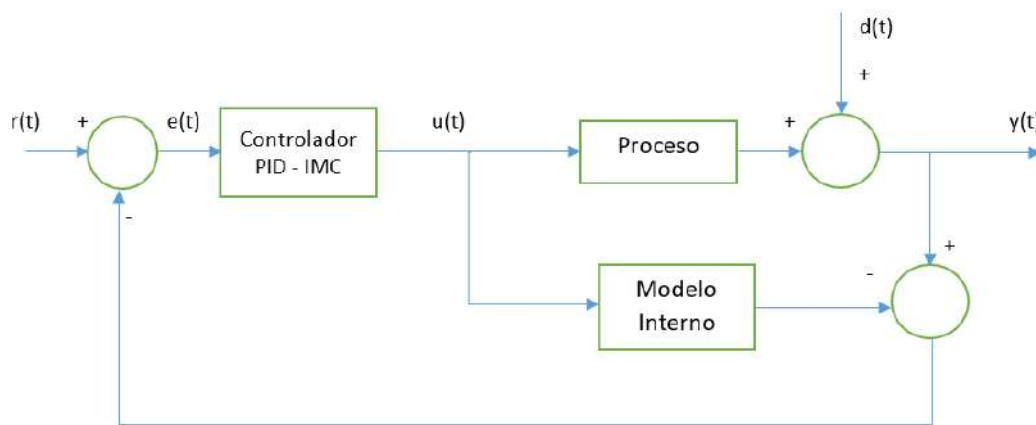


Figura 106. Diagrama de bloques de la estructura interna de control del modelo.

Fuente: Adaptado de “*Process Dynamics and Control*” (Seborg, Edgar, & Mellichamp, 2004).

Donde:

El modelo del proceso es el siguiente:

$$M(s) = \frac{-0.477}{33s + 1}$$

El cual se ha obtenido del primer experimento a entrada escalón en lazo abierto como se explica en (Jin, Wang, & Hao, 2013).

Se agrupan las dos funciones de transferencia del proceso para crear un nuevo subsistema dentro del entorno de Simulink:

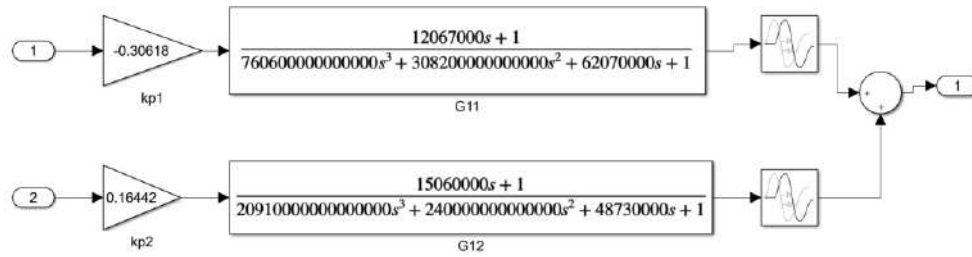


Figura 107. Funciones de transferencia que se agrupan para crear un subsistema en Simulink.

Fuente: Elaboración Propia

El bloque del subsistema de las funciones de transferencia queda según la Figura 108.



Figura 108. Subsistema del proceso en Simulink.

Fuente: Elaboración Propia

Se ingresan los datos anteriores en bloques de Simulink, se muestra a continuación la estructura:

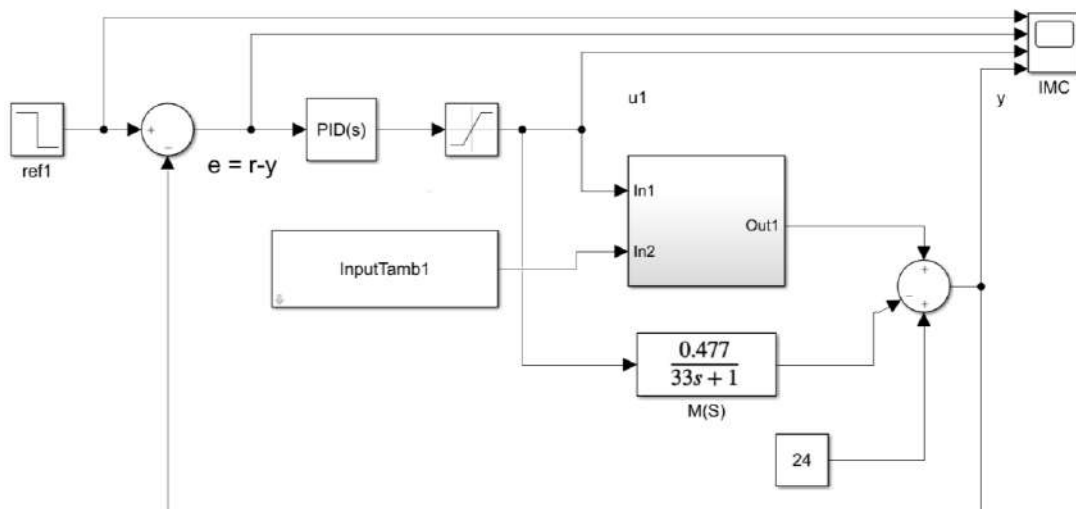


Figura 109. Diagrama de Bloques de la Estructura de Control PID-IMC en Simulink con el proceso como subsistema.

Fuente: Elaboración Propia.

Ejecutando el diagrama de bloques en Simulink, se agregan al graficador la señal de entrada, la señal del error, la variable controlada y la variable de salida; de tal manera que se muestren las 4 gráficas en una sola figura. Se utiliza la herramienta *PID Tuner* de MATLAB para sintonizar automáticamente el controlador PID.

Los resultados se muestran en la Figura 110.

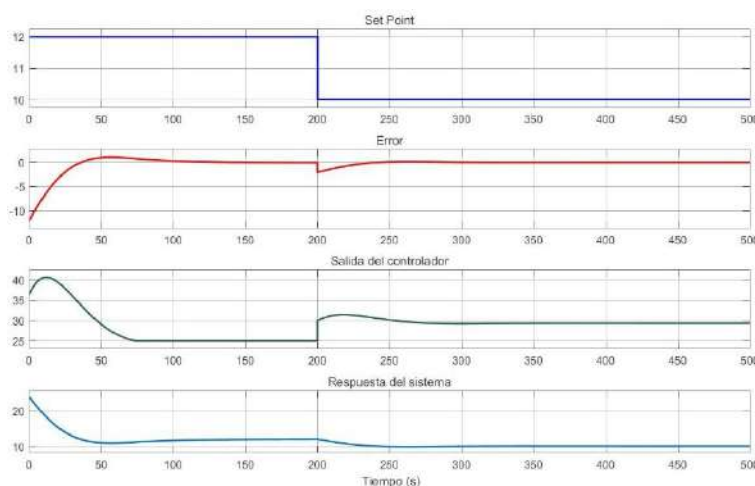


Figura 110. Resultados de la simulación con PID-IMC utilizando *PID Tuner* para la sintonización del controlador.

Fuente: Elaboración Propia.

Se ha tenido como setpoint inicial un valor de 12°C, a los 6,000 segundos, se reduce este valor en 2, quedando un setpoint final de 10°C. Al final del proceso se agrega un valor de 24 para compensar al valor de la señal de entrada escalón. El tiempo total de simulación es de 10,000 segundos.

Como valores de sintonización en el PID, se tiene: $K_p = -3.1$ y $T_i = 1/0.066$ min.

Sin embargo, según las ecuaciones deducidas en el apartado 2.3.1.1, se puede sintonizar el PID IMC basado en los datos de $K = -0.477$ y $\tau = 33$ min del modelo interno.

En primer lugar, se toma en cuenta un filtro pasabajo $\tau_f = 5$.

$$\text{Ganancia Proporcional: } K_p = \frac{2\left(\frac{\tau_p}{\theta}\right)+1}{K[2\left(\frac{\tau_f}{\theta}\right)+1]} = -13.836.$$

$$\text{Constante de Tiempo Integral: } \tau_I = \frac{\theta}{2} + \tau_p = 33 \text{ min.}$$

$$\text{Constante de Tiempo Derivativo: } \tau_D = \frac{\tau_p}{2\left(\frac{\tau_p}{\theta}\right)+1} = 0.$$

Se ingresan los datos en el bloque del PID y se simula, resultando las siguientes gráficas:

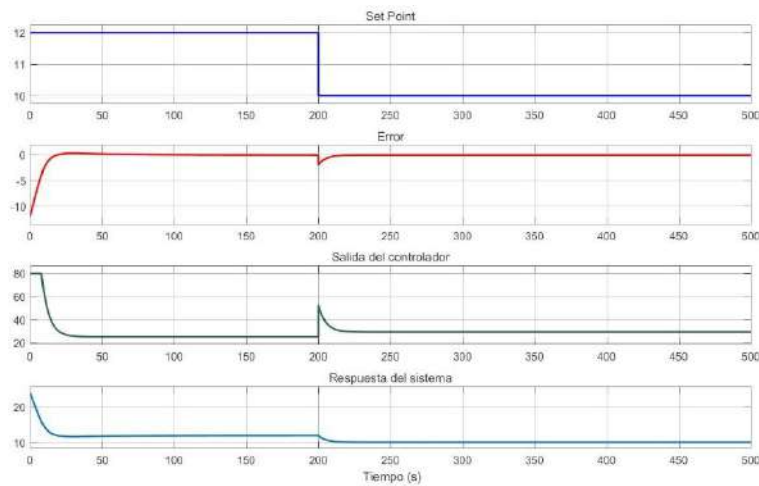


Figura 111. Resultados de la simulación con PID-IMC con $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos.

Fuente: Elaboración Propia

En segundo lugar, se toman en cuenta un filtro $\tau_f = 10$.

$$\text{Ganancia Proporcional: } K_p = \frac{2(\frac{\tau_p}{\theta})+1}{K[2(\frac{\tau_f}{\theta})+1]} = -6.918.$$

$$\text{Constante de Tiempo Integral: } \tau_I = \frac{\theta}{2} + \tau_p = 33 \text{ min.}$$

$$\text{Constante de Tiempo Derivativo: } \tau_D = \frac{\tau_p}{2(\frac{\tau_p}{\theta})+1} = 0.$$

Se ingresan los datos en el bloque del PID y se simula, resultando las siguientes gráficas:

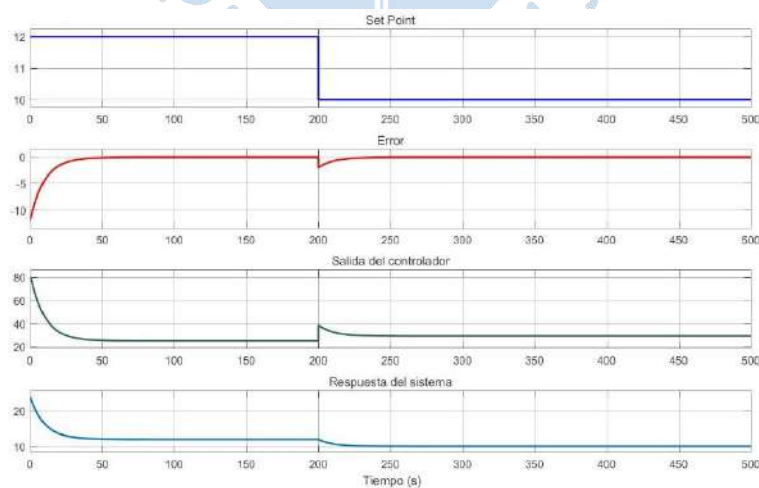


Figura 112. Resultados de la simulación con PID-IMC con $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980$ segundos.

Fuente: Elaboración Propia.

En tercer lugar, se toma en cuenta un filtro $\tau_f = 15$.

$$\text{Ganancia Proporcional: } K_p = \frac{2\left(\frac{\tau_p}{\theta}\right)+1}{K[2\left(\frac{\tau_f}{\theta}\right)+1]} = -4.61$$

$$\text{Constante de Tiempo Integral: } \tau_I = \frac{\theta}{2} + \tau_p = 33 \text{ min.}$$

$$\text{Constante de Tiempo Derivativo: } \tau_D = \frac{\tau_p}{2\left(\frac{\tau_p}{\theta}\right)+1} = 0$$

Se ingresan los datos en el bloque del PID y se simula, resultando las siguientes gráficas:

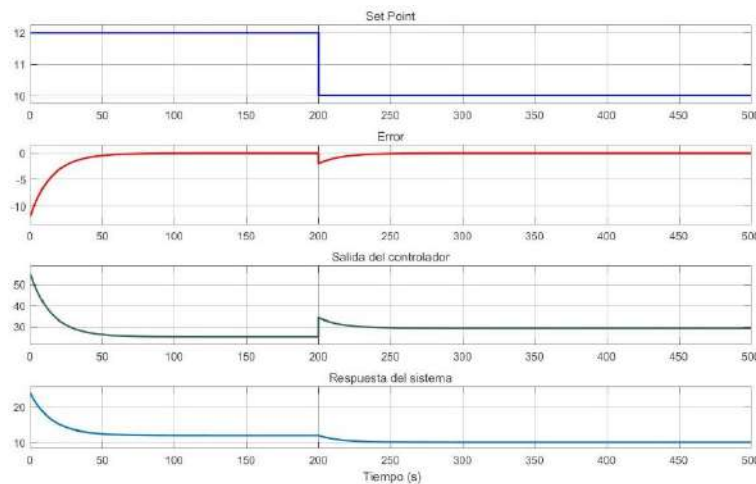


Figura 113. Resultados de la simulación con PID-IMC con $K_p = -4.61$ y $T_i = 1980$ segundos.

Fuente: Elaboración Propia.

3.4 Implementación del Control PID IMC

Debido al buen comportamiento del controlador PID IMC mostrado en las simulaciones explicadas en el apartado anterior, se decidió implementarlo en la planta piloto de refrigeración.

Se tienen cuatro pruebas con el túnel de refrigeración en vacío, variando el valor de K_p en función de τ_f y, a la vez con dos valores diferentes de *set point*.

La primera prueba se realizó con un *set point* de 12°C, $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980$ segundos.

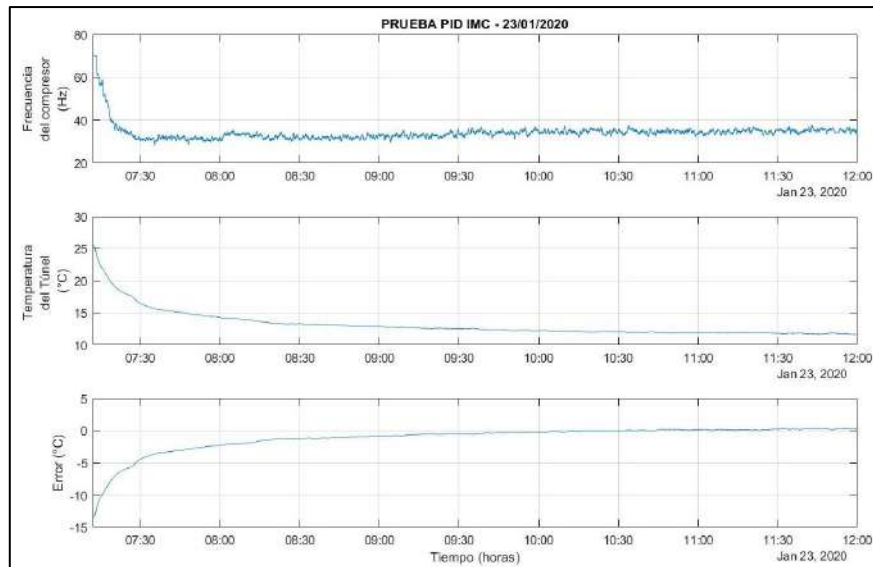


Figura 114. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 23/01/2020, $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980$ segundos. *Set Point* = 12 °C

Fuente: Elaboración Propia

La segunda prueba se realizó con un *set point* de 12°C, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos. Como se puede apreciar en la Figura 115, se aumentó negativamente el valor de la ganancia proporcional deducido en el apartado anterior, para determinar su influencia en la respuesta del sistema.

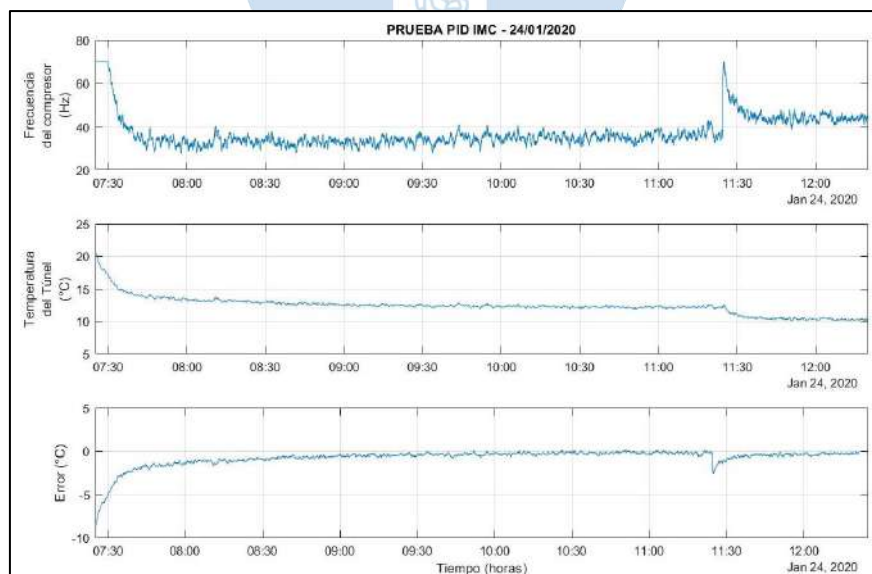


Figura 115. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 24/01/2020, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos. *Set Point* = 12 °C.

Fuente: Elaboración Propia

La tercera prueba se realizó con un *set point* de 14°C, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos.

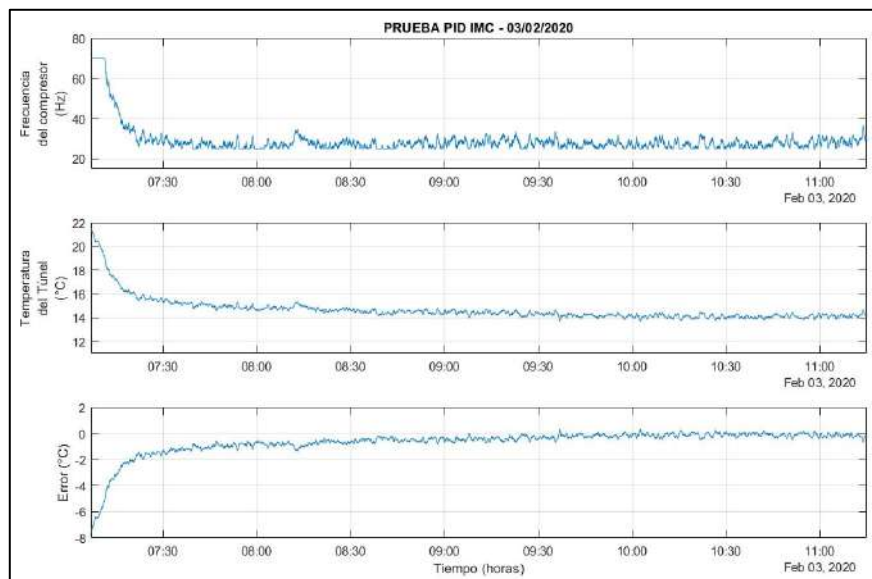


Figura 116. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 03/02/2020.

$K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos. *Set Point* = 14 °C

Fuente: Elaboración Propia.

La cuarta prueba se realizó con un *set point* de 14°C, $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980$ segundos.

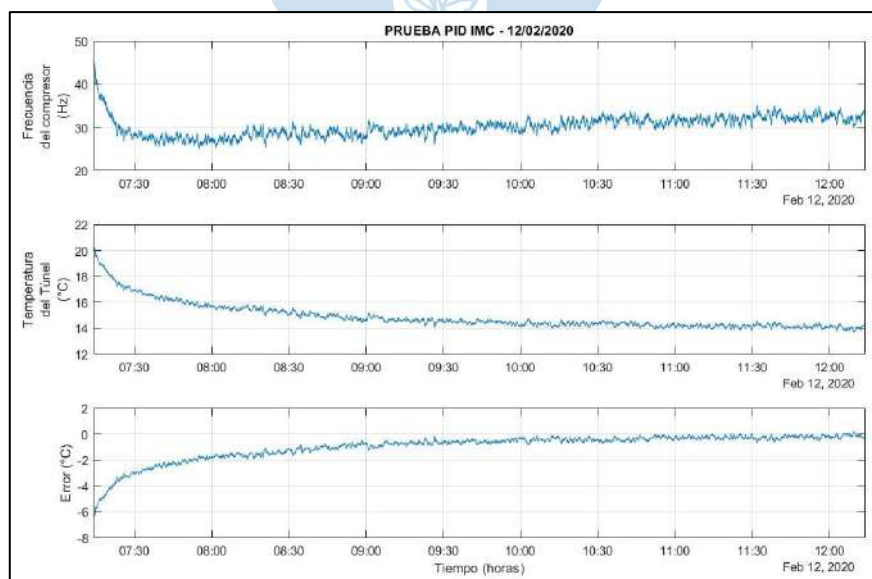


Figura 117. Resultados prueba PID IMC en vacío del día 12/02/2020.

$K_p = -6.918$ y $T_i = 1980$ segundos. *Set Point* = 14 °C.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se muestran las pruebas realizadas con una carga de 200 kg de banano orgánico dentro del túnel de refrigeración. La primera prueba con PID IMC se colocó un *set point* de 14 °C, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos. La segunda prueba con PID IMC se colocó un *set point* de 12 °C, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos.

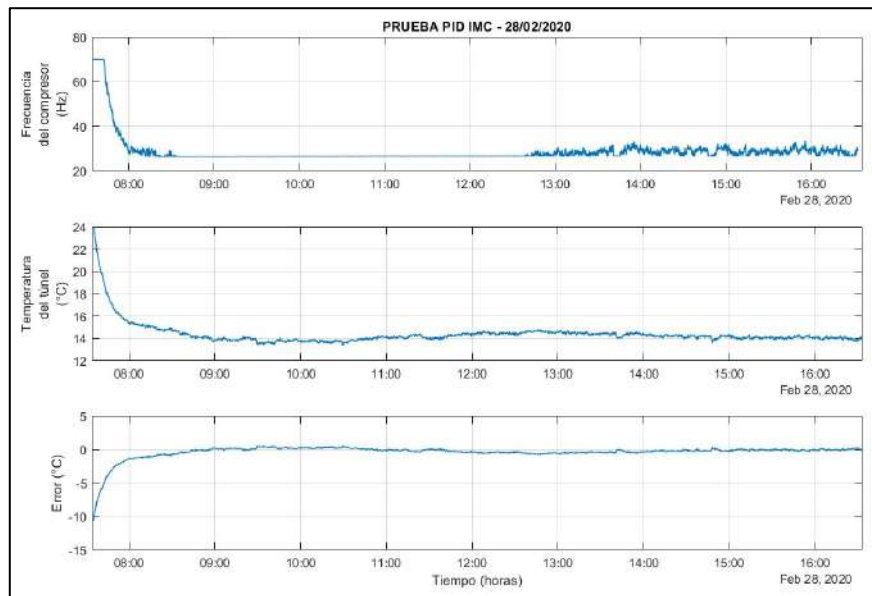


Figura 118. Resultados prueba PID IMC con carga de banano del día 28/02/2020, $K_p = -13.836$, $T_i = 1980$ segundos, *Set Point* = 14 °C.

Fuente: Elaboración Propia.

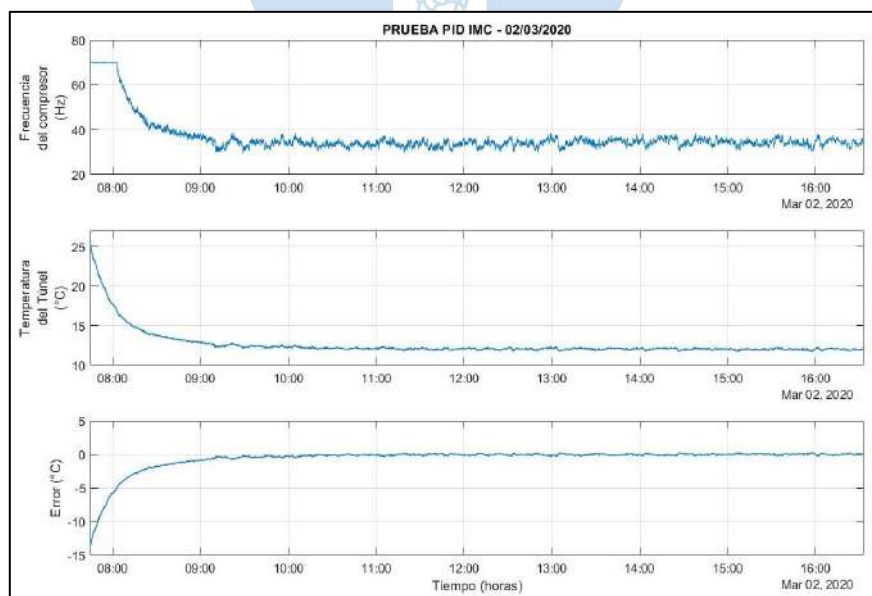


Figura 119. Resultados prueba PID IMC con carga de banano del día 2/03/2020, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos, *Set Point* = 12 °C.

Fuente: Elaboración Propia.

Estas dos últimas pruebas con PID IMC se comparan con la estrategia de control *ON/OFF*; por lo tanto, se tienen dos pruebas extra con dicho regulador.

La primera prueba con *ON/OFF* se colocó un *set point* de 12 °C, como se ve en la Figura 120. La segunda prueba con *ON/OFF* se colocó un *set point* de 14 °C, como se ve en la Figura 121.

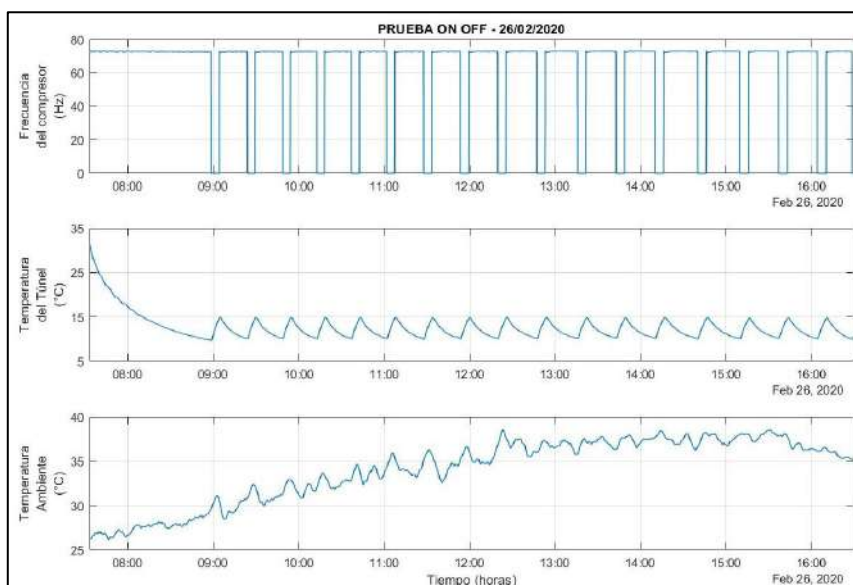


Figura 120. Resultados prueba *ON OFF* con carga de banano del día 26/02/2020.

Set Point = 12 °C.

Fuente: Elaboración Propia.

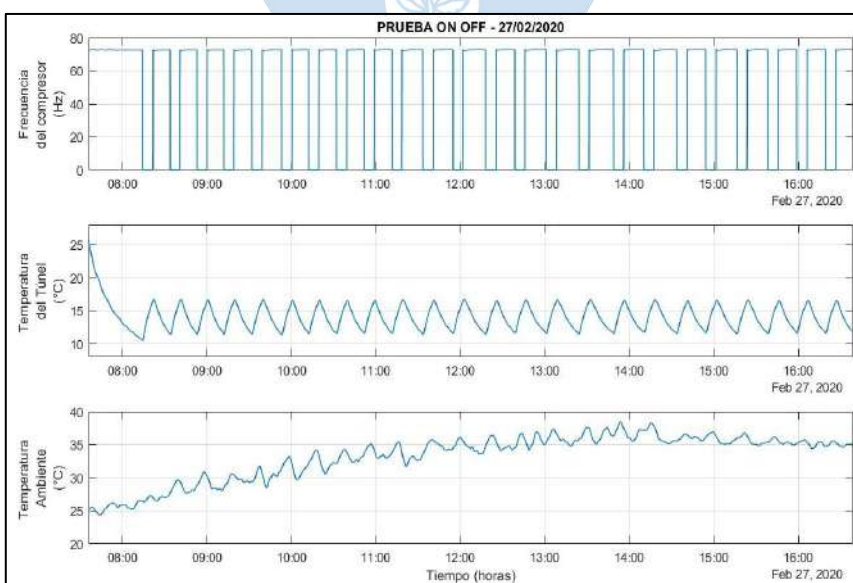


Figura 121. Resultados prueba *ON OFF* con carga de banano del día 27/02/2020.

Set Point = 14 °C.

Fuente: Elaboración Propia.

El análisis de los resultados de cada prueba realizada se explicará con más detalle en el siguiente capítulo.

El SCADA del sistema de control se encuentra en los apéndices D, E, F y G.



Capítulo 4

Interpretación de resultados

El presente trabajo de investigación trata sobre el control de temperatura de un túnel de enfriamiento para frutas instalado en una planta piloto de refrigeración industrial; se tiene como entrada la variación de la frecuencia del compresor; por ello, el primer experimento fue ingresar un determinado valor de frecuencia como entrada escalón, esperar a que la temperatura se estabilice e ir aumentando en escalones de 5 Hz, hasta llegar a la temperatura deseada para la conservación del banano orgánico, fruta con la que se ha trabajado.

4.1 Análisis de los experimentos con entrada escalón

El objetivo de este primer experimento fue determinar el rango de trabajo del compresor para un valor determinado de temperatura del túnel. En el caso del banano orgánico, se debe conservar entre los 12 - 15 °C para almacenamiento y transporte (Barrett, Somogyi, & Ramaswamy, 2005), para maduración entre los 15 a 20 °C (Kader, 1996).

Se analiza, según la Tabla 11, en cada escalón, la ganancia estática para poder validar cómo es la variación de ésta según el rango de trabajo. De esta misma manera, se evalúa la constante de tiempo y se deduce que, es un sistema con ganancia variable.

A continuación, se han agrupado los experimentos a entrada escalón de las dos pruebas, de tal manera que se pueda identificar el valor de temperatura estacionaria del túnel de frío con respecto a cada valor de frecuencia en el compresor.

Los resultados gráficos de la Tabla 12 se han realizado con los datos de la Tabla 11.

Se puede deducir, en primer lugar, que es un sistema con ganancia inversa; es decir, a medida que aumenta la frecuencia del motor que acciona al compresor, la ganancia estática disminuye al igual que la temperatura en el túnel, como se puede ver en las Figuras 122 y 123.

De igual manera, según la Figura 124, la constante de tiempo va disminuyendo a medida que aumenta el valor de la frecuencia del compresor.

Tabla 11.

Resultados pruebas de entrada escalón a lazo abierto.

Frecuencia del motor del compresor [Hz]	Temperatura Inicial Túnel [°C]	Temperatura Estacionaria Túnel [°C]	Ganancia Estática	Constante de Tiempo [min]	Temperatura Exterior [°C]
26.25 - 30	17.95	13.11	1.3046	129	29.35
30 - 35	13.11	11.58	0.306	20	26.41
35 - 40	11.58	10.48	0.22	17	30.15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12.

Gráficas de los resultados de los experimentos a entrada escalón.

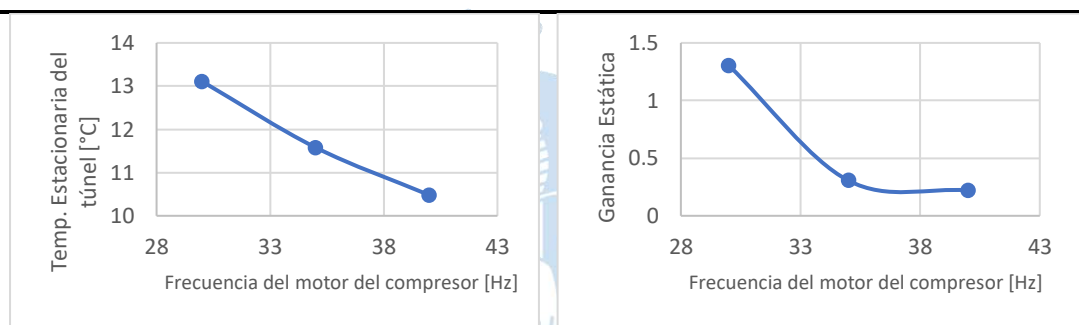


Figura 122. Temperatura Estacionaria del Túnel vs Frecuencia del motor del compresor.

Figura 123. Ganancia Estática vs Frecuencia del motor del compresor.

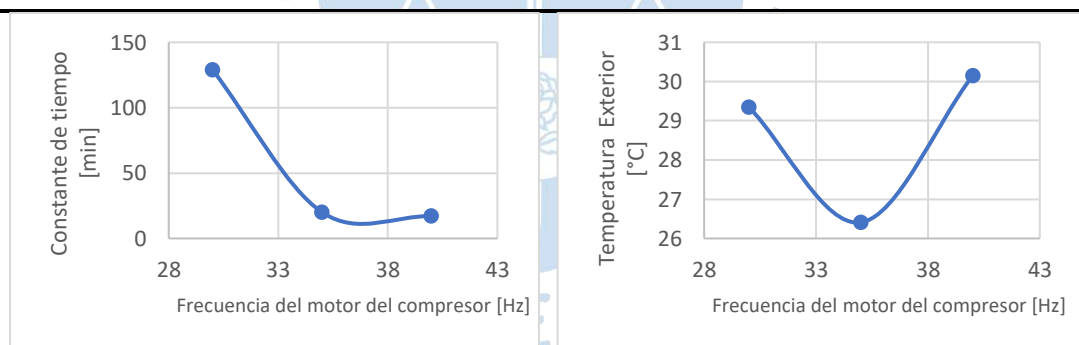


Figura 124. Constante de Tiempo vs Frecuencia del motor del compresor.

Figura 125. Temperatura del Exterior vs Frecuencia del motor del compresor.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se puede obtener el rango de trabajo del proceso; es decir, si el banano necesita estar frío a 14 °C, se debe aplicar una frecuencia al compresor entre los 25 Hz y 35 Hz.

Con este rango obtenido, ya se podría generar una nueva señal de entrada PRBS (*Pseudo-Random Binary Sequence*), en la cual es necesario un ancho de pulso máximo y el intervalo en el que va a trabajar el compresor; de tal manera que, se obtenga una nueva señal de salida de temperatura; es decir, con estos nuevos se obtienen datos importantes para ser posteriormente

tratados y procesados para realizar la modelación empírica del sistema mediante la herramienta de MATLAB llamada “*System Identification Toolbox*”.

4.2 Análisis de los experimentos con señales de entrada PRBS

Debido a que la herramienta de MATLAB llamada “*System Identification Toolbox*” requiere de datos de estimación y validación, y como se tuvieron datos de tres días de pruebas con entrada PRBS, se decidió utilizar los datos de una prueba como estimación y los datos de otra prueba como validación; así se obtuvieron tres grupos para identificación con estas opciones, claramente se escogió el que poseía el mejor ajuste de modelo, como se explicará más adelante.

Cabe aclarar que, con las pruebas con señal de entrada PRBS, se pueden obtener modelos de sistemas lineales. En este caso, se utilizó la opción de “*Process Model*” incluida en el Toolbox, para poder determinar la cantidad de polos y ceros que poseería la función de transferencia; asimismo, como disturbio se agrega los datos de temperatura ambiente obtenida durante cada experimento.

Para la identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, se tienen como entrada “u1” a la frecuencia del compresor, como “u2” a la temperatura ambiente, y como salida “y1” a la temperatura deseada en el túnel de frío.

4.2.1 Primer conjunto

Las pruebas con señales de entrada PRBS duraron 8 horas con 20 minutos, lo que resultan 31,200 muestras en total, las primeras 1,200 muestras sirvieron para pre-enfriar la cámara, con una constante de 30 Hz, como frecuencia en el compresor, seguidamente, se le aplica la señal PRBS. Por lo tanto, se tiene un primer conjunto de 30,000 muestras para identificación.

4.2.1.1 Grupo N°1

Con el Grupo N° 1 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 36 se pueden visualizar cinco ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 33.73% con el modelo “P3DZd” que hace referencia a un modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.

Tabla 13.

Datos de los modelos con el primer grupo de identificación.

Código	%Ajuste	Descripción
P3DZd	33.73%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P2DZd	18.98%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3Zd	7.762%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un retardo.
Tf3Z	0.296%	Función de transferencia de tres polos y un cero.
Tf2C	-12.49%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.

Fuente: Elaboración propia

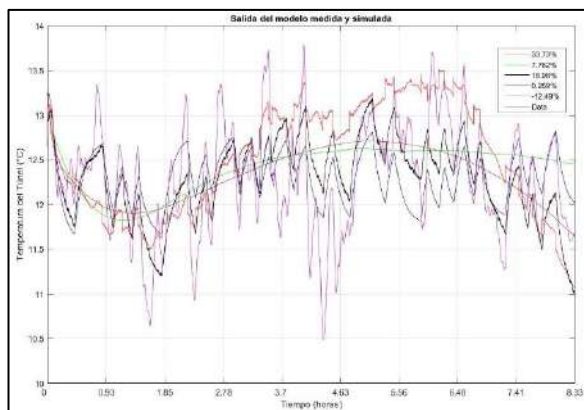


Figura 36. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

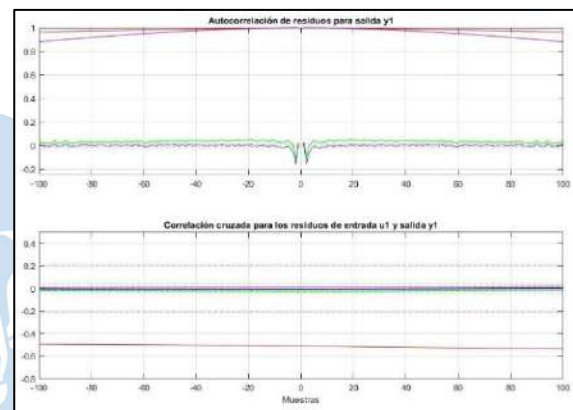


Figura 37. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 37), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 37 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 37), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P3DZd”, “P2DZd”, “P3DZ”, los cuales son modelos del proceso pero que, a su vez, tiene un *fit* muy bajo, inferior del 80% con respecto a los datos de validación.

4.2.1.2 Grupo N°2

Con el Grupo N°2 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 40 se pueden visualizar doce distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 87.56% con el modelo del proceso de tres polos, un cero, un disturbio y un retardo llamado “P3DZd”.

Tabla 14.

Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación.

Código	%Ajuste	Descripción
P3DZd	87.56%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1DZd	68.97%	Modelo del proceso de 1 polo, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2C	63.64%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.
Tf2D	61.24%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P1Z	57.69%	Modelo del proceso de 1 polo y un cero.
P3Zd	7.762%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un retardo.
P2DZd	54.86%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P2Z	53.79%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P1Zd	53.41%	Modelo del proceso de 1 polo, un cero y un retardo.
P2D	51.97%	Modelo del proceso de 2 polos y un disturbio.
P2DZ	51.88%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero y un disturbio.
P3DZ	40.43%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un disturbio.

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 41), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

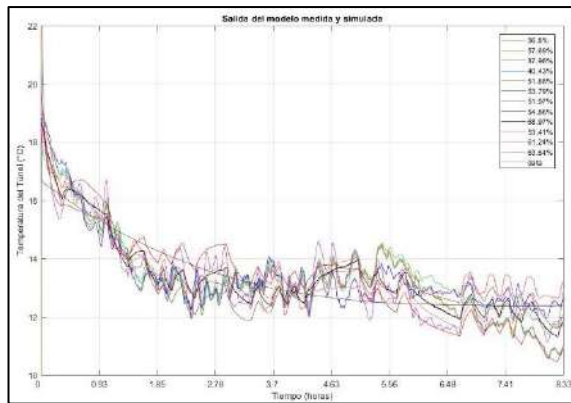


Figura 40. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

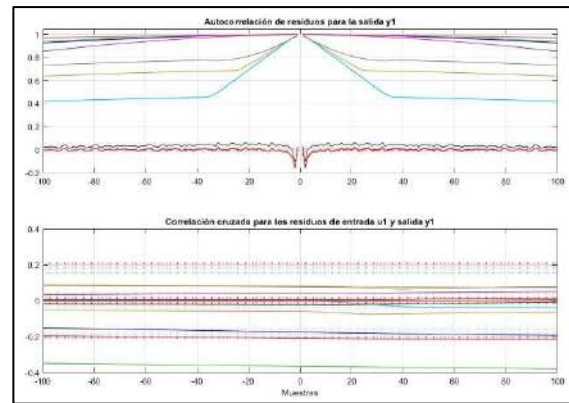


Figura 41. Análisis de residuos.

En el primer gráfico de la Figura 41 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 41), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P3DZd” y “P1DZd”.

4.2.1.3 Grupo N° 3

Tabla 15.

Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P3Z	67.4%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.
Tf2C	66.19%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.
Tf2D	61.24%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P3DZd	57.93%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1Z	56.15%	Modelo del proceso de un polo y un cero.
P1DZd	54.31%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
P3D	50.35%	Modelo del proceso de 3 polos y un retardo.
P2DZd	41.16%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZ	40.42%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un disturbio.

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene un tercer grupo de identificación utilizando el toolbox antes mencionado:

Con el Grupo N° 3 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 44 se pueden visualizar nueve distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 67.4 % con el modelo de proceso llamado “P3Z”.

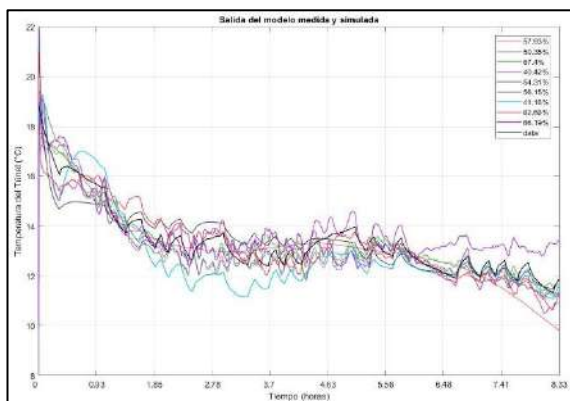


Figura 44. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia.

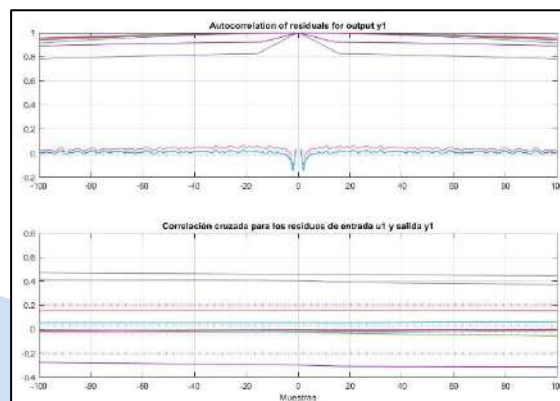


Figura 45. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 45), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 45 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo. En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 45), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada.

Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01. En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P3DZd”, “P1DZd” y “P2DZ”, con un *fit* inferior al 80% con respecto a los datos de validación.

4.2.2 Segundo conjunto

Las pruebas con señales de entrada PRBS duraron 8 horas con 20 minutos, lo que resultan 31,200 muestras en total, las primeras 1,200 muestras sirvieron para pre-enfriar la cámara, con una constante de 30 Hz, como frecuencia en el compresor, posteriormente, se le aplica la señal PRBS.

En este caso, se tiene un segundo conjunto de 26,200 muestras para identificación, donde se le han extraído los 5,000 primeros datos para estudiar la dinámica del proceso sin estos.

4.2.2.1 Grupo N°1

Con el Grupo N° 1 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 48 se pueden visualizar siete distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 75.87% con el modelo “P3DZ” que hace referencia a un modelo del proceso con tres polos, un cero y un disturbio.

Tabla 16.

Datos de los modelos con el primer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P3DZ	75.87%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un disturbio.
P3DZd	44.96%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2D	7.649%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P3Z	-21.8%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.
P2DZ	-25.25%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero y un disturbio.
P2Z	-40.82%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
Tf2C	-42.06%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.

Fuente: Elaboración propia

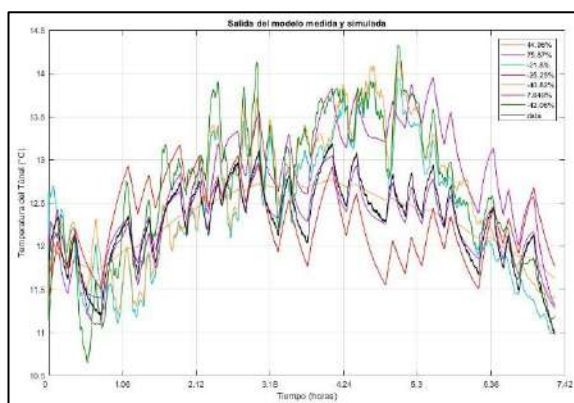


Figura 48. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

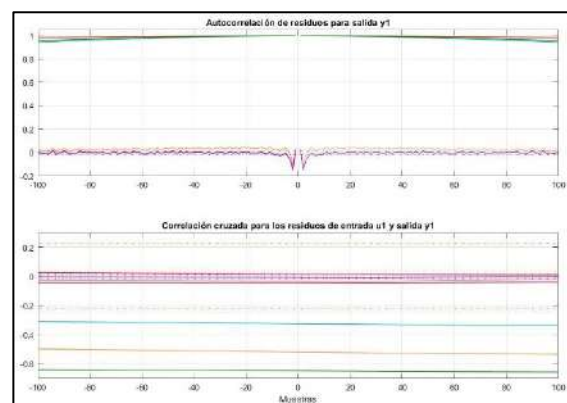


Figura 49. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 49), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 49 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo. En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 49), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P3DZ”, “P3DZd” y “P2DZ”; sin embargo, el único modelo adecuado es el primero, con un *fit* de 75.87% con respecto a los datos de validación.

4.2.2.2 Grupo N°2

Tabla 17.

Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P3DZd	67.35%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2D	66.48%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P2DZ	52.59%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero y un disturbio.
Tf2C	39.98%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.
P2Z	14.87%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P3Z	14.27%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.

Fuente: Elaboración propia.

Con el Grupo N° 2 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 52 se pueden visualizar seis distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 67.35% con el modelo de proceso llamado “P3DZd”.

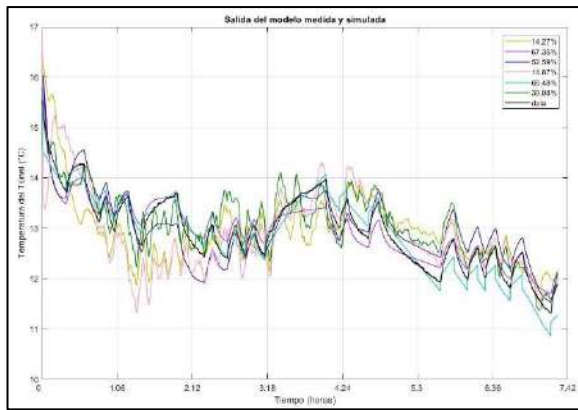


Figura 52. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

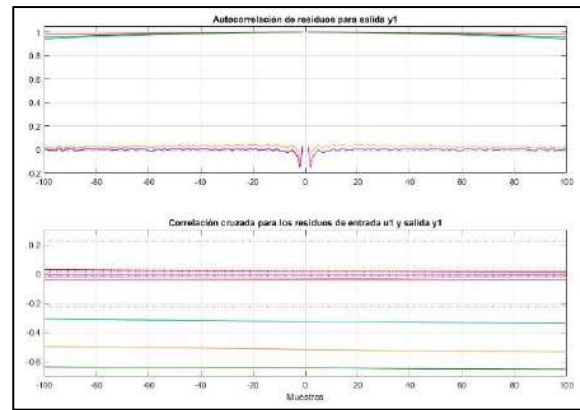


Figura 53. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 53), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 53 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 53), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, el modelo que queda dentro del intervalo de confianza es “P3DZd”.

4.2.2.3 Grupo N°3

Con el Grupo N°3 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 56 se pueden visualizar seis distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 47.57% con el modelo del proceso “P2DZd”.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 57), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

Tabla 18.

Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P2DZd	47.54%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZd	38.3%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1DZd	26.64%	Modelo del proceso de 1 polo, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2D	25.54%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P2DZ	16.01%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero y un disturbio.
P2D	15.96%	Modelo del proceso de 2 polos y un disturbio.

Fuente: Elaboración propia.

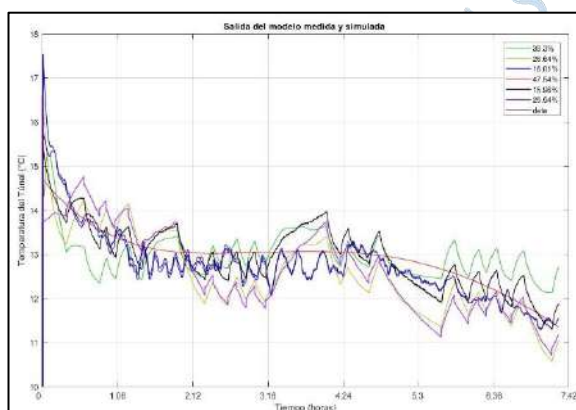


Figura 56. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia.

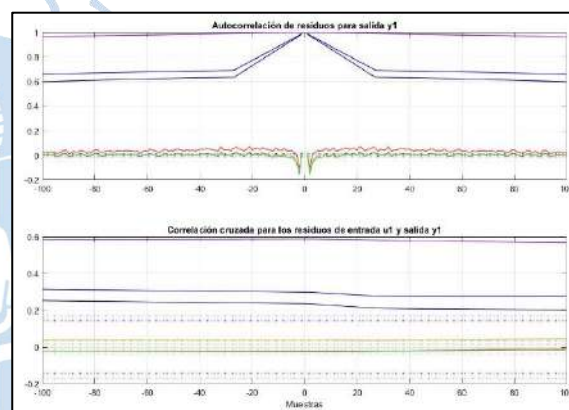


Figura 57. Análisis de residuos.

En el primer gráfico de la Figura 57 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 57), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P1DZd”, “P2DZd” y “P3DZd” se encuentran dentro del intervalo de confianza; sin embargo, sus porcentajes de ajuste son inferiores al 80% con respecto a los datos de validación.

4.2.3 Tercer conjunto

Se tenía un segundo conjunto de 26,200 muestras para identificación.

A estas muestras se les aplica un tiempo de muestreo de 5 segundos, quedando 5,240 muestras para identificación, el cual es el tercer conjunto de muestras que se explica a continuación.

4.2.3.1 Grupo N°1

Tabla 19.

Datos de los modelos con el primer grupo de identificación.

Código	%Ajuste	Descripción
P3D	30.05%	Modelo del proceso de 3 polos y un retardo.
P2Z	23.23%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P3DZd	18.02%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3Z	9.035%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.
P2DZd	-0.764%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1DZd	-9.306%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.

Fuente: Elaboración propia

Con el Grupo N°1 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 60, se pueden visualizar seis distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 30.05% con el modelo “P3D” que hace referencia a un modelo de proceso con tres polos y un disturbio.

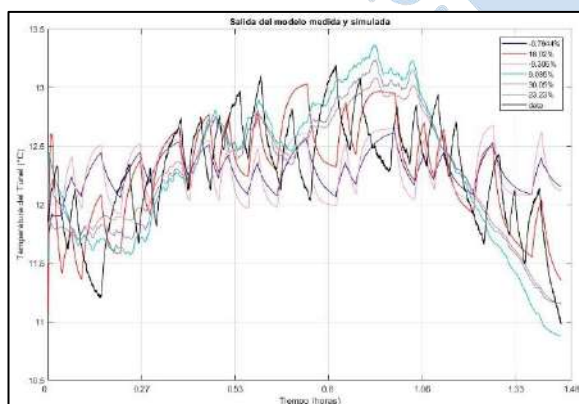


Figura 60. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

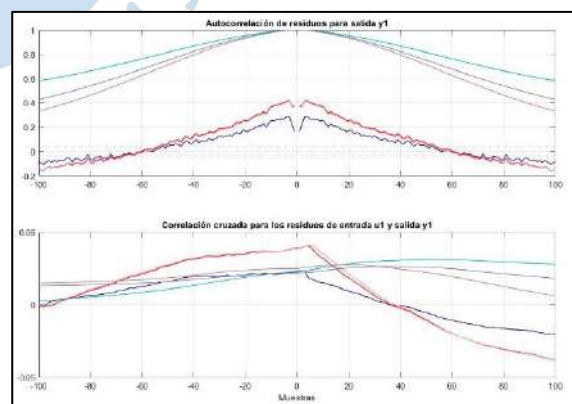


Figura 61. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 61), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 61 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 61), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, no hay modelo cuyos residuos se encuentren dentro del intervalo de confianza.

4.2.3.2 Grupo N°2

Tabla 20.

Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P3D	42.47%	Modelo del proceso de 3 polos y un disturbio.
P2DZd	39.15%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3Z	34.9%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.
P1DZd	33.99%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
P2D	33.44%	Modelo del proceso de 2 polos y un disturbio.
P2DZ	32.49%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero y un disturbio.
P3DZd	30.99%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZ	27.2%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un disturbio.
Tf2D	26.99%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P2Z	24.99%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.

Fuente: Elaboración propia.

Con el Grupo N°2 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 64 se pueden visualizar diez distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 42.47% con el modelo del proceso “P3D”, el cual tiene tres polos y un disturbio.

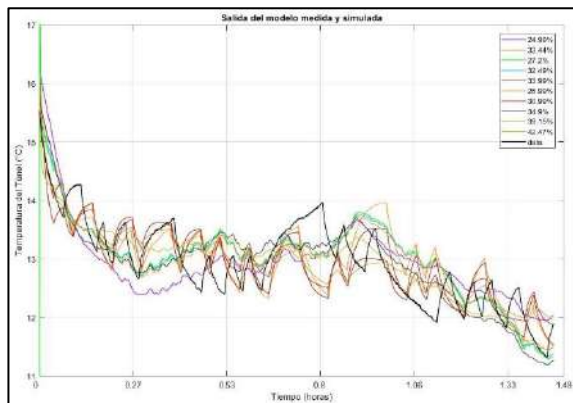


Figura 64. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

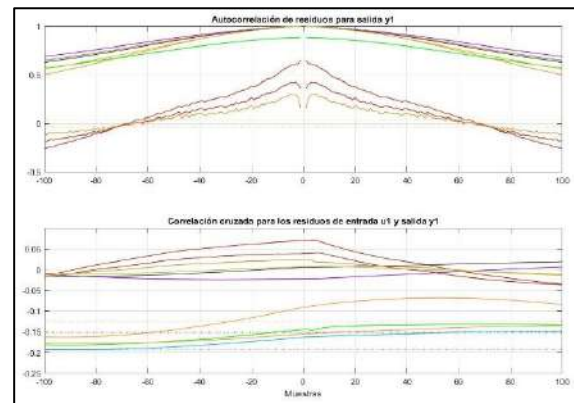


Figura 65. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 65), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 65 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 65), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, no hay modelo cuyos residuos se encuentren dentro del intervalo de confianza.

4.2.3.3 Grupo N°3

Con el Grupo N°3 para identificación de sistemas con señales de entrada PRBS, en la Figura 68 se pueden visualizar siete distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 46.61% con el modelo del proceso “P3DZd”, el cual tiene tres polos, un cero, un disturbio y un retardo.

Tabla 21.

Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P3DZd	46.61%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3Z	39.81%	Modelo del proceso de un polo y un cero.
P2DZd	37.19%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZd	37.14%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P2Z	33.09%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P1Z	30.28%	Modelo del proceso de un polo y un cero.
Tf2C	17.05%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.

Fuente: Elaboración propia.

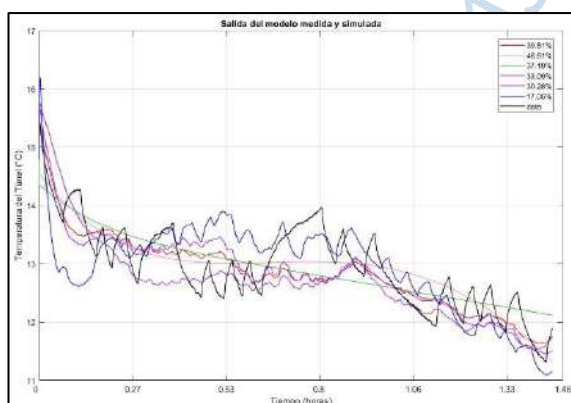


Figura 68. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia.

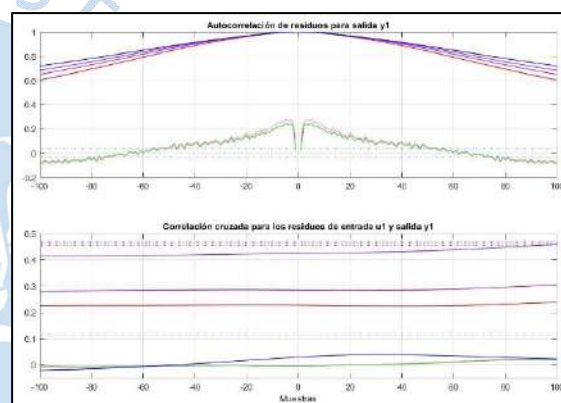


Figura 69. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 69), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 69 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 69), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, no hay modelo cuyos residuos se encuentren dentro del intervalo de confianza.

➤ ELECCION DEL MODELO

Los criterios para la elección del modelo del proceso son:

- Obtener un *Fit* (ajuste) mayor al 80%.
- El modelo seleccionado debe tener un grado de confianza de 99.9%, tanto en autocorrelación como en correlación cruzada, lo cual se puede apreciar en cada uno de los gráficos de análisis de residuos.

Luego de haber analizado los grupos formados por los tres experimentos realizados con señales de entrada PRBS, se opta por el modelo del proceso del apartado 4.2.1.2. por tener un *Fit* de 87.56%.

P3DZd: $y_1 = G_{11}(s)u_1 + G_{12}(s)u_2$

Entrada de frecuencia “u1”, salida de temperatura del túnel “y1”:

$$G_{11}(s) = K_p * \frac{1 + T_z * s}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)} * e^{-T_d * s}$$

$$K_p = -0.30618;$$

$$T_{p1} = 5.663e07;$$

$$T_{p2} = 2.4678;$$

$$T_{p3} = 5.442e06;$$

$$T_d = 4.6698e05;$$

$$T_z = 1.2067e07$$

Entrada de temperatura ambiente “u2”, salida de temperatura del túnel “y1”:

$$G_{12}(s) = K_p * \frac{1 + T_z * s}{(1 + T_{p1} * s)(1 + T_{p2} * s)(1 + T_{p3} * s)} * e^{-T_d * s}$$

$$K_p = 0.16442;$$

$$T_{p1} = 5.5599e06;$$

$$T_{p2} = 87.11;$$

$$T_{P3} = 4.3174e07;$$

$$T_d = 1.2864e06;$$

$$T_Z = 1.506e07$$

4.3 Análisis de los experimentos con señales de entrada PRS

A fines de evaluar el comportamiento del modelo lineal con un modelo no lineal, se decidió realizar un tercer experimento con señal de entrada PRS, pulsos aleatorios, de diferente amplitud y ancho de pulso, pero dentro de un intervalo de frecuencias dado, según la Tabla 9.

Sin embargo, se demuestra que, aun siendo el proceso no lineal, controlado con un PID IMC basado en una estructura lineal, los resultados son muy aceptables trabajando en un rango determinado (25 Hz - 70 Hz, 12 °C - 14 °C), lo cual es típico de un proceso industrial.

De igual manera, se realizan tres pruebas y los resultados se agrupan en una prueba para los datos de estimación y otra prueba para los datos de validación. Generándose tres grupos de identificación, como se explicará a continuación.

Para la identificación de sistemas con señales de entrada PRS, se tienen como “u2” a la temperatura ambiente, como “u1” a la frecuencia del compresor, y como salida “y1” a la temperatura deseada en el túnel de frío.

4.3.1 Primer conjunto

El primer conjunto de muestras contiene 30,000 datos, basado en las pruebas con duración de 8 horas y 20 minutos.

4.3.1.1 Grupo N°4

Con el Grupo N° 4 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 72 se pueden visualizar ocho distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 87.95% con el modelo de función de transferencia llamada “Tf2D”, la cual tiene 2 polos y un cero, en modo discreto. De igual manera, se tienen porcentajes de ajuste superiores al 80% con respecto a los datos de validación, en cuanto a los modelos “P3DZd”, “P1DZd” y “P2DZd”.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 73), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

Tabla 22.

Datos de los modelos con el primer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
Tf2D	87.95%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P3DZd	83.92%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1DZd	83.86%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
P2DZd	82.31%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2C	79.73%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.
nlrx1	75.89%	Modelo no lineal.
P2Z	71.9%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P2DZ	61.86%	Modelo del proceso de 2 polos, un disturbio y un cero.

Fuente: Elaboración propia

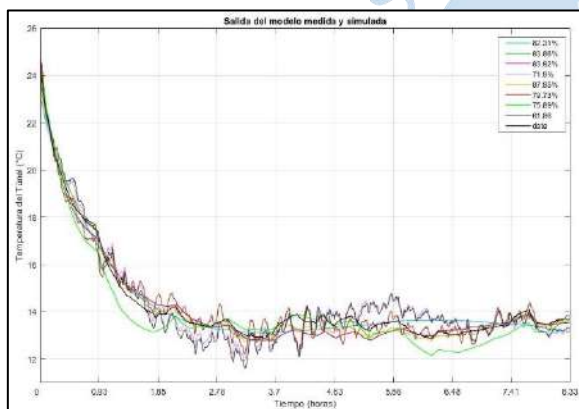


Figura 72. Ajuste de modelos experimentales.

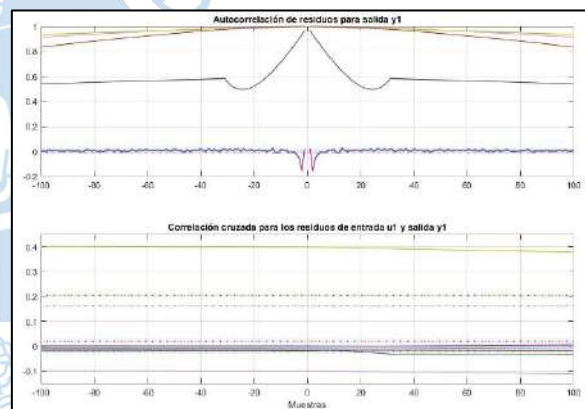


Figura 73. Análisis de residuos.

Fuente: Elaboración Propia

En el primer gráfico de la Figura 73 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 73), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P3DZd”, “P1DZd” y “P2DZd”, los cuales son modelos que tienen un *fit* superior del 80% con respecto a los datos de validación.

4.3.1.2 Grupo N°5

Con el Grupo N° 5 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 76 se pueden visualizar doce distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 93.43% con el modelo del proceso “P2DZd”, con dos polos, un disturbio, un cero y un retardo.

Tabla 23.

Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P2DZd	93.43%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1DZd	92.62%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2D	91.48%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P3DZd	82.78%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3Z	77.04%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.
P1Z	70.24%	Modelo del proceso de un polo y un cero.
P2Z	69.32%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
Tf2C	62.51%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.
P1DZ	55.2%	Modelo del proceso de un polo, un disturbio y un cero.
nlrx1	54.17%	Modelo no lineal.
P2DZ	28.76%	Modelo del proceso de 2 polos, un disturbio y un cero.
P3DZ	15.28%	Modelo del proceso de 3 polos, un disturbio y un cero.

Fuente: Elaboración propia.

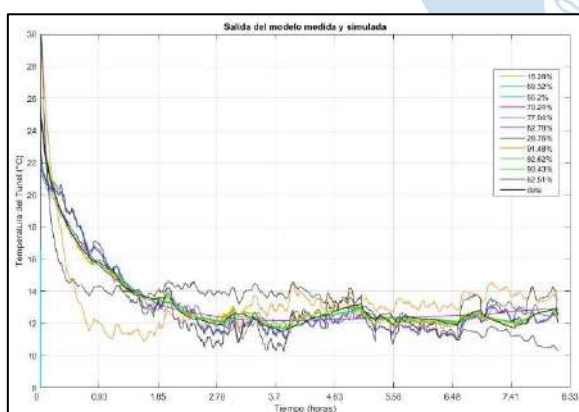


Figura 76. Ajuste de modelos experimentales.

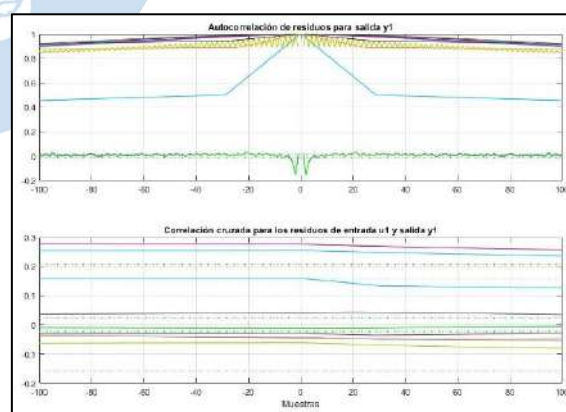


Figura 77. Análisis de residuos.

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 77), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación

del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 77 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 77), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01. En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P2DZd”, “P1DZd” y “P3DZ”, los cuales son modelos que tienen un *fit* superior al 80% con respecto a los datos de validación.

4.3.1.3 Grupo N° 6

Tabla 24.

Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P1DZd	92.74%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2D	91.02%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P2DZd	83.22%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZd	75.2%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P2Z	73.27%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
nlrx1	41.45%	Modelo no lineal.

Fuente: Elaboración propia.

Con el Grupo N° 6 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 80 se pueden visualizar seis distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 92.74% con el modelo “P1DZd”, el cual es un proceso con un polo, un cero, un retardo y un disturbio.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 81), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

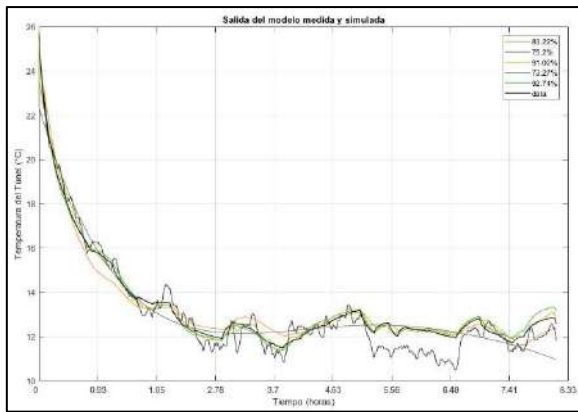


Figura 80. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

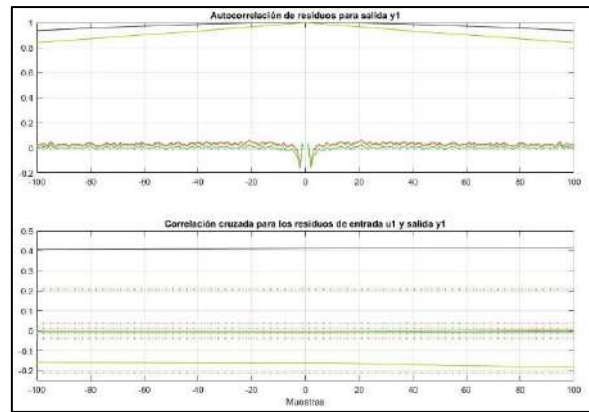


Figura 81. Análisis de residuos.

En el primer gráfico de la Figura 81 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 81), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, los modelos que quedan dentro del intervalo de confianza son “P1DZd”, “P2DZd” y “P3DZd3”, son modelos del proceso, cada uno posee un *fit* de 92.74%, 83.22% y 75.2%, respectivamente, con respecto a los datos de validación.

De igual manera, el modelo no lineal “nlarx1” hace referencia a la representación de sistemas no lineales, cuyo *fit* es de 41.45%, inferior al 80% que se requiere con respecto a los datos de validación.

4.3.2 Segundo conjunto

Se tenía un primer conjunto de muestras contiene 30,000 datos, basado en las pruebas con duración de 8 horas y 20 minutos, posteriormente, se quitan los 5,000 primeros datos, queda un segundo conjunto de 25,000 muestras.

4.3.2.1 Grupo N°4

Con el Grupo N° 4 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 84 se pueden visualizar siete distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como

valor máximo de este tenemos un 59.75% con el modelo de función de transferencia llamada “Tf2D”, la cual tiene 2 polos y un cero, en modo discreto, es decir, en el plano z.

Tabla 25.

Datos de los modelos con el primer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
Tf2D	58.75%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P3DZd	31.96%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P2DZd	9.029%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1DZd	7.407%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
nlrx1	1.35%	Modelo no lineal.
nlrx3	-3.041%	Modelo no lineal.
nlrx4	-4.224%	Modelo no lineal.

Fuente: Elaboración propia.

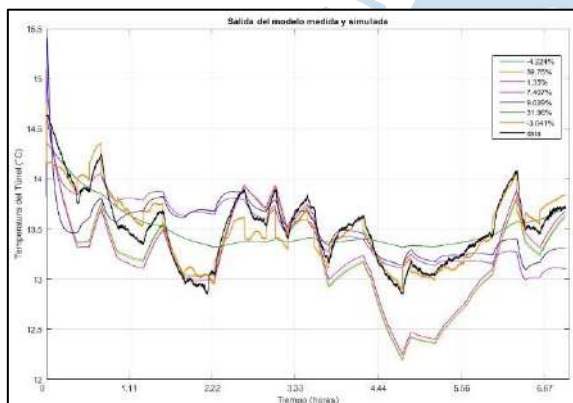


Figura 84. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

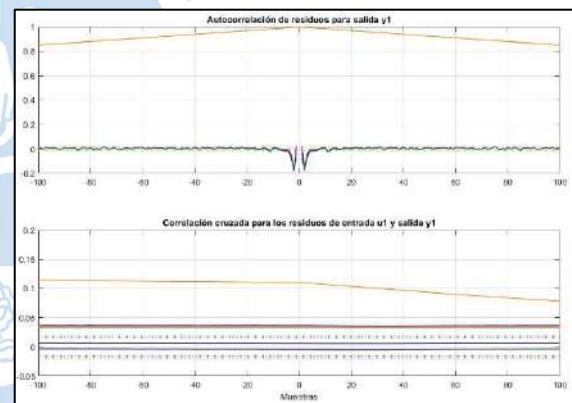


Figura 85. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 85), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 85 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 85), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, los residuos de los tres modelos no lineales “narx1”, “nlarx3” y “nlarx4” se encuentran dentro del intervalo de confianza; sin embargo, sus porcentajes de ajuste son de 1.35%, -3.041% y -4.0224%, por debajo del 80% respecto a los datos de validación, respectivamente.

4.3.2.2 Grupo N°5

Tabla 26.

Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P1DZd	61.64%	Modelo del proceso con un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
P2Z	25.28%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P1D	23.55%	Modelo del proceso de un polo y un disturbio.
P2D	22.82%	Modelo del proceso de 2 polos y un disturbio.
Tf2C	22.46%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.

Fuente: Elaboración propia.

Con el Grupo N° 5 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 88 se pueden visualizar cinco ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 61.64% con el modelo de proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo llamado “P1DZd”.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 89), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “*lags*”.

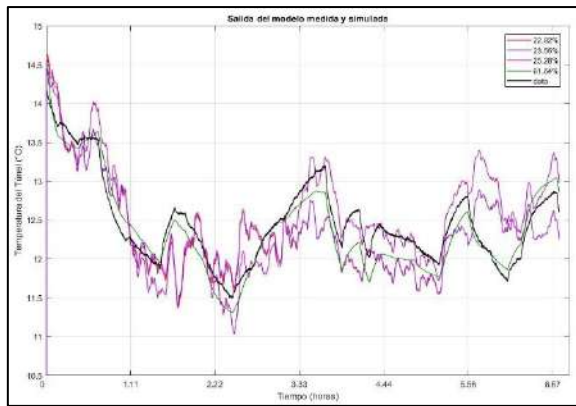


Figura 88. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

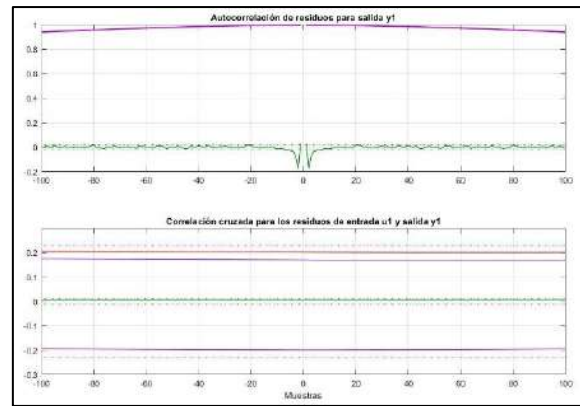


Figura 89. Análisis de residuos.

En el primer gráfico de la Figura 89 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 89) se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, al momento de analizar el segundo cuadro de “Análisis de Residuos” (véase la Figura 89), el “P1DZd” es el único modelo cuyos residuos se encuentran dentro del intervalo de confianza.

4.3.2.3 Grupo N°6

Tabla 27.

Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P1DZd	71.45%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
Tf2D	60.48%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en discreto.
P2DZd	47.98%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3Z	26.39%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.
P3DZd	24.47%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZ	20.7%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un disturbio.
Tf2C	10.92%	Función de transferencia de dos polos y un cero, en continuo.

Fuente: Elaboración propia.

Con el Grupo N° 6 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 92 se pueden visualizar siete distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 71.45% con el modelo “P1DZd”, el cual es un proceso con un polo, un cero, un retardo y un disturbio.

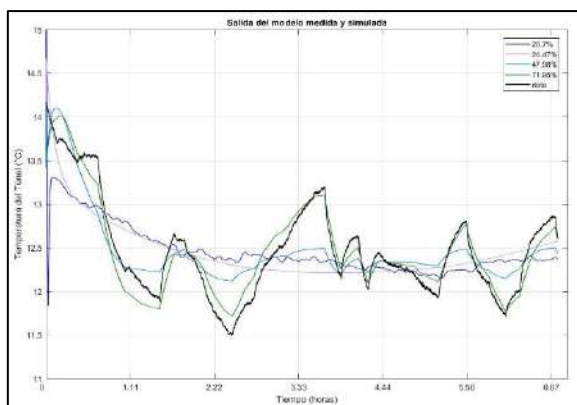


Figura 92. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

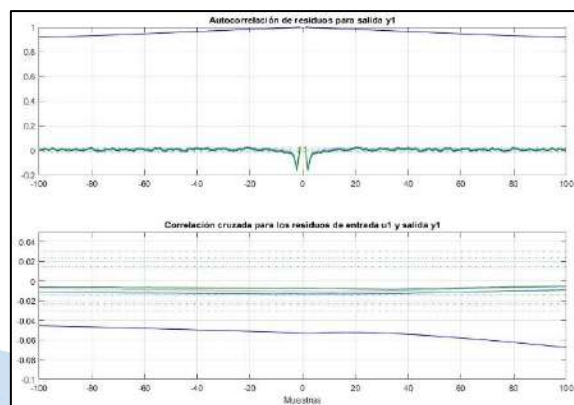


Figura 93. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 93), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 93 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 93), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, existen tres modelos, cuyos residuos se encuentran cerca del intervalo de confianza, llamados “P2DZd”, “P3DZd” y “P1DZd”, según la Tabla 27, cada uno posee un *fit* de 47.98%, 24.47% y 71.45%, respectivamente, con respecto a los datos de validación.

4.3.3 Tercer conjunto

Se tenía un segundo conjunto de 25,000 muestras para identificación.

A estas muestras se les aplica un tiempo de muestreo de 5 segundos, quedando 5,000 muestras para identificación, el cual es el tercer conjunto de muestras que se explicará a continuación.

4.3.3.1 Grupo N°4

Tabla 28.

Datos de los modelos con el primer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
nlarx3	73.11%	Modelo no lineal.
nlarx1	71%	Modelo no lineal.
P2DZd	63.66%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZd	62.04%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P2Z	59.48%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P1DZd	57.99%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.

Fuente: Elaboración propia

Con el Grupo N° 4 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 96 se pueden visualizar seis distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 73.11% correspondiente a un modelo no lineal llamado “nlarx3”.

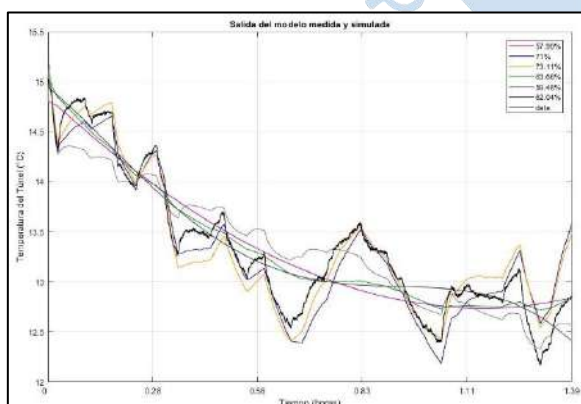


Figura 96. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

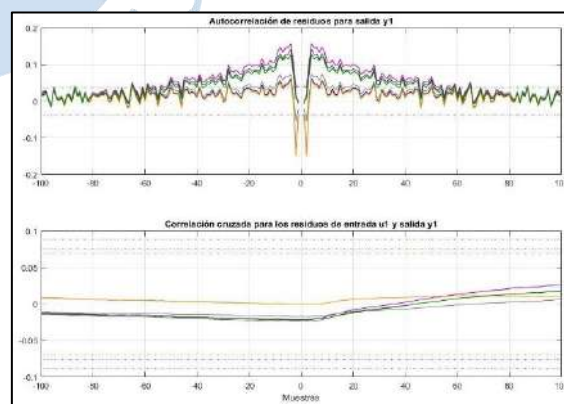


Figura 97. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 97), se evalúan los residuos de las salidas de

los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 97 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 97), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, todos los modelos poseen residuos que se encuentran dentro o con valores cercanos al intervalo de confianza.

4.3.3.2 Grupo N°5

Tabla 29.

Datos de los modelos con el segundo grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P3DZd	38.37%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P2Z	36.06%	Modelo del proceso de 2 polos y un cero.
P2DZd	33.69%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P1Z	30.83%	Modelo del proceso de un polo y un cero.
P1DZd	27.64%	Modelo del proceso de un polo, un cero, un disturbio y un retardo.
nlrx1	-60.04%	Modelo no lineal.
nlrx2	-60.06%	Modelo no lineal.

Fuente: Elaboración propia.

Con el Grupo N° 5 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 100 se pueden visualizar siete distintos ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor máximo de este tenemos un 38.37% con el modelo del proceso llamado “P3DZd”.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 101), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

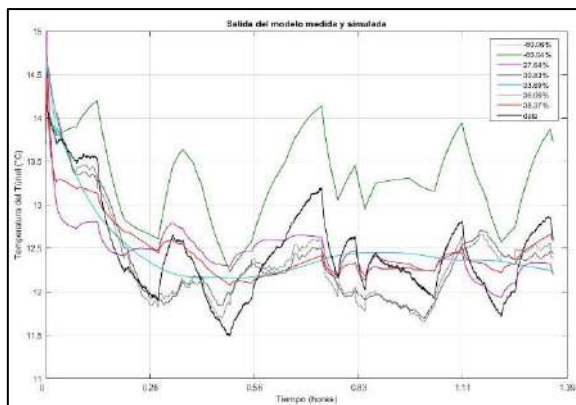


Figura 100. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

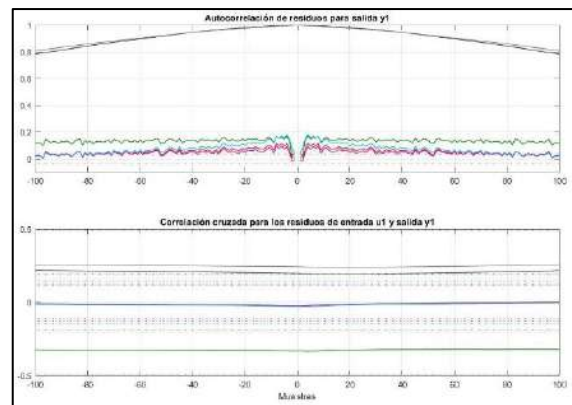


Figura 101. Análisis de residuos.

En el primer gráfico de la Figura 101 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 101), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, existen tres modelos, cuyos residuos se encuentran dentro del intervalo de confianza, llamados “P1DZd”, “P2DZd” y “P3DZd”, según la Tabla 29, estos a su vez, tienen un *fit* de 27.64%, 33.69% y 38.37% con respecto a los datos de validación, respectivamente.

4.3.3.3 Grupo N°6

Tabla 30.

Datos de los modelos con el tercer grupo de identificación

Código	%Ajuste	Descripción
P2DZd	58.08%	Modelo del proceso de 2 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZd	49.77%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero, un disturbio y un retardo.
P3DZ	35.67%	Modelo del proceso de 3 polos, un cero y un disturbio.
P3Z	32%	Modelo del proceso de 3 polos y un cero.
P3D	19.43%	Modelo del proceso de 3 polos y un disturbio.

Fuente: Elaboración propia.

Con el Grupo N° 6 para identificación de sistemas con señales de entrada PRS, en la Figura 104 se pueden visualizar cinco ajustes, diferentes por su porcentaje o *FIT*; como valor

máximo de este tenemos un 58.08% con el modelo “P2DZd”, el cual es un proceso con dos polos, un disturbio, un cero y un retardo.

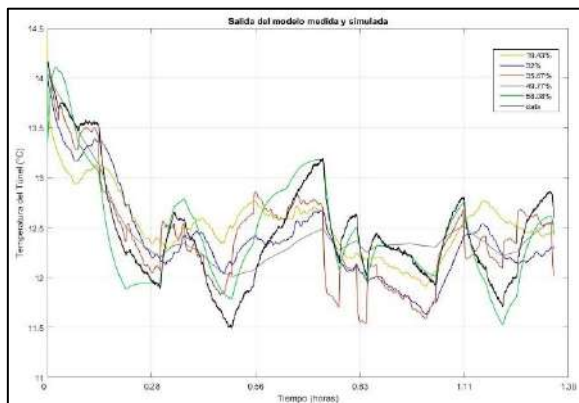


Figura 104. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

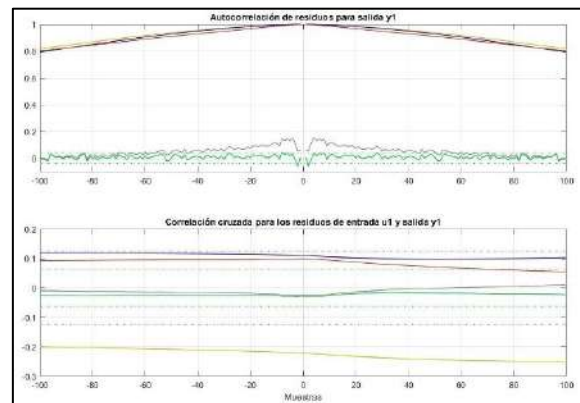


Figura 105. Análisis de residuos.

De igual manera, al realizar el análisis de residuos, en cuanto a la autocorrelación de los residuos de la salida (primer gráfico de la Figura 105), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 105 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 105), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

En este caso, existen dos modelos, cuyos residuos se encuentran cerca del intervalo de confianza, “P2DZd” y “P3DZd”, cada uno posee un ajuste de 58.08% y 49.77%, respectivamente.

➤ ELECCION DEL MODELO

Los criterios para la elección del modelo del proceso son:

- Obtener un *Fit* (ajuste) mayor al 80%.

- El modelo seleccionado debe tener un grado de confianza de 99.9%, tanto en autocorrelación como en correlación cruzada, lo cual se puede apreciar en cada uno de los gráficos de análisis de residuos.

Luego de haber analizado los grupos formados por las tres pruebas realizadas con señales de entrada PRS, se opta por el modelo del proceso del apartado 4.2.1.2, “P2DZd”, debido a que posee un buen ajuste de 93.43% con respecto a los datos de validación:

$$\underline{P2DZd}: y1 = G11(s)u1 + G12(s)u2$$

Entrada de frecuencia “u1”, salida de temperatura del túnel “y1”:

$$G_{11}(s) = K_P * \frac{1 + T_Z * s}{(1 + T_{P1} * s)(1 + T_{P2} * s)} * e^{-T_d * s}$$

$$K_P = -0.13293;$$

$$T_{P1} = 2.7014e07;$$

$$T_{P2} = 68110;$$

$$T_d = 3.52e06;$$

$$T_Z = 2.0799e05$$

Entrada de temperatura ambiente “u2”, salida de temperatura del túnel “y1”:

$$G_{12}(s) = K_P * \frac{1 + T_Z * s}{(1 + T_{P1} * s)(1 + T_{P2} * s)} * e^{-T_d * s}$$

$$K_P = 0.49898;$$

$$T_{P1} = 9.8055e07;$$

$$T_{P2} = 90087;$$

$$T_d = 3.3219e06;$$

$$T_Z = -1.8796e05$$

Por otro lado, se obtuvo un ajuste de 75.89% para un modelo no lineal, del apartado 4.2.1.2.

nlarx1 = Modelo no lineal ARX con una salida y dos entradas:

Entradas: u1 (frecuencia), u2 (temperatura ambiente)

Salida: y1 (temperatura del túnel)

Regresores estándares correspondientes a los pedidos:

$$n_a = [2], n_b = [2 \ 2], n_k = [1 \ 1]$$

Regresores no lineales:

$$y_1(t-1), y_1(t-2)$$

$$u_1(t-1), u_1(t-2)$$

$$u_2(t-1), u_2(t-2)$$

Tiempo de muestreo: 30000 segundos.

Los mejores ajustes se encuentran en la Tabla 14 con los datos de pruebas con señales de entrada PRBS y en la Tabla 23 con los datos de las pruebas con señales de entrada PRS; comparando los modelos estimados de ambas pruebas, se concluye que se han obtenido mejores ajustes con respecto a los datos de validación con las pruebas con señales de entrada PRS, esto se puede comprobar en el modelo “P2DZd” con 93.43% con respecto al modelo con mejor ajuste de la Tabla 14, “P3DZd” con 87.56%; asimismo, en ambos resultados gráficos se visualiza cómo los datos de estimación se adaptan mejor a los datos de validación cuando se trata de los experimentos con señal PRS.

Con un tiempo de muestreo de cinco segundos, se demuestra que no mejora el ajuste de los modelos a los datos de validación, tanto para las pruebas con señales de entrada PRBS como PRS, según las tablas 19, 20, 21 para PRBS y las tablas 28, 29 y 30 para PRS.

Los mejores ajustes de modelos se obtienen cuando se toman en cuenta las 30000 muestras; esto quiere decir que, para conocer mejor la dinámica, se deben analizar y contar con las 8 horas con 20 minutos que duró cada prueba.

A continuación, se compara el modelo lineal “P3DZd” con el modelo no lineal “nlarx1”, en base a datos de la respuesta a entrada PRBS.

Según la Figura 126, el modelo lineal “P3DZd” presenta un ajuste de 87.56%, mayor al ajuste del modelo no lineal “nlarx1” de 67.51%. En cuanto al primer gráfico de la Figura 127, se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados entre sí; no hay valores alrededor del cero debido a que no hay relación del residuo con respecto a sí mismo; por lo tanto, se evalúa la relación con residuos anteriores y posteriores, por eso es que hay muestras positivas y negativas, llamadas “lags”.

En el primer gráfico de la Figura 127 entre los residuos cercanos a cero, se tiene una alta relación con los instantes anteriores y posteriores, pero a medida que se van teniendo valores muy alejados o muy futuros esta relación se va disminuyendo.

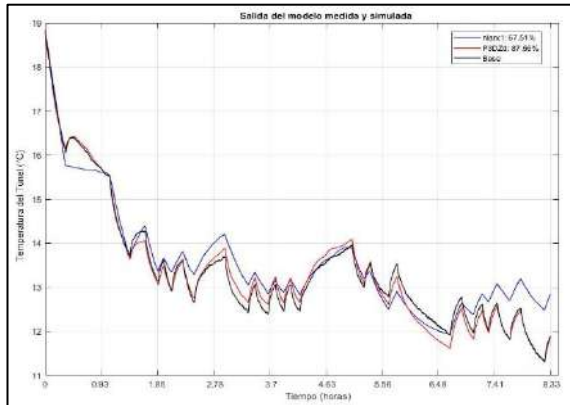


Figura 126. Ajuste de modelos experimentales.

Fuente: Elaboración Propia

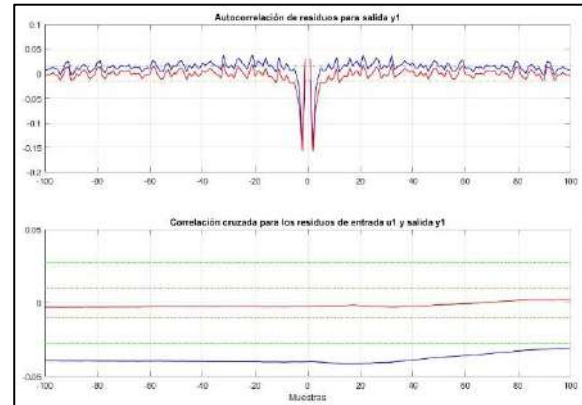


Figura 127. Análisis de residuos.

En cuanto a la correlación cruzada (segundo gráfico de la Figura 127), se evalúan los residuos de las salidas de los modelos estimados con respecto a los datos de entrada. Se genera un intervalo de confianza del 99.9% para ambos gráficos; es decir, los modelos aceptables serán aquellos cuyos residuos se encuentren entre el -0.01 y 0.01.

Por último, en cuanto al segundo gráfico de la Figura 127 (correlación cruzada), el modelo lineal se encuentra dentro del intervalo de confianza.

4.4 Análisis del diseño del controlador PID IMC

Para el diseño del controlador se ha decidido utilizar el modelo de ajuste llamado “P3DZd”, el cual significa que tiene tres polos, un cero, un retardo y un disturbio, deducido de las pruebas con entrada PRBS. Se ingresa el modelo mediante funciones de transferencia: una función de transferencia para el proceso con entrada de frecuencia del compresor en Hz y otra función de transferencia con la entrada de temperatura ambiente como disturbio; ambas funciones crean un subsistema como se puede ver en las Figuras 107 y 108 (apartado 3.3).

Asimismo, para continuar con la estructura de modelo de control interno (IMC) vista en el apartado 2.3.1, se ha considerado un modelo interno del proceso con una función de transferencia con un polo. Este modelo interno se obtuvo de las pruebas a entrada escalón en lazo abierto, explicadas en el apartado 3.1.1.

Una vez que se organizaron los bloques en Simulink siguiendo la estructura IMC; según la Figura 110, se ha tenido como *set point* inicial un valor de 12°C, a los 4,000 segundos, se reduce este valor en 1, quedando un setpoint final de 11°C. Al final del proceso se agrega un valor constante de 24°C para compensar al valor de la señal de entrada escalón. El tiempo total de simulación es de 10,000 segundos.

Debido a que la variable para la sintonización es el determinado por el filtro τ_f , se hace una comparación con la variación de este (véase Tabla 31). Según las ecuaciones de los parámetros de control deducidas en el apartado 2.3.1.1.

Tabla 31.

Valor de los parámetros de control
por la variación del filtro τ_f .

τ_f	Kp	Ti
5	- 13.836	1980 s
10	- 6.918	1980 s
15	- 4.61	1980 s

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se reduce el tiempo de simulación a 400 segundos, se aplica el cambio de *set point* en el segundo 200; por lo tanto, se presentan las siguientes gráficas comparativas.

En primer lugar, se compara la salida del controlador, la cual es la entrada al sistema de frecuencia del compresor en Hz, en la Figura 128, se puede apreciar que, a medida que aumento el valor de K_p se requiere un mayor valor de frecuencia en el transitorio del actuador.

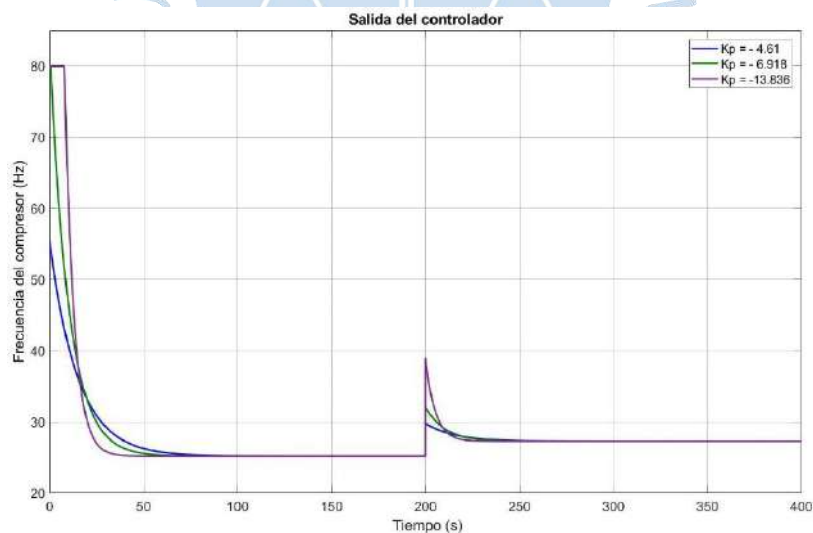


Figura 128. Salida del controlador del sistema – Frecuencia del compresor (Hz).

Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, se comparan las señales del error del sistema frente a cambios en el valor proporcional del controlador (K_p), como se muestra en la Figura 129, el transitorio

presenta mayor *overshoot* cuando el K_p es mayor, en este caso $K_p = -13.836$; por lo tanto, se considera el más óptimo.

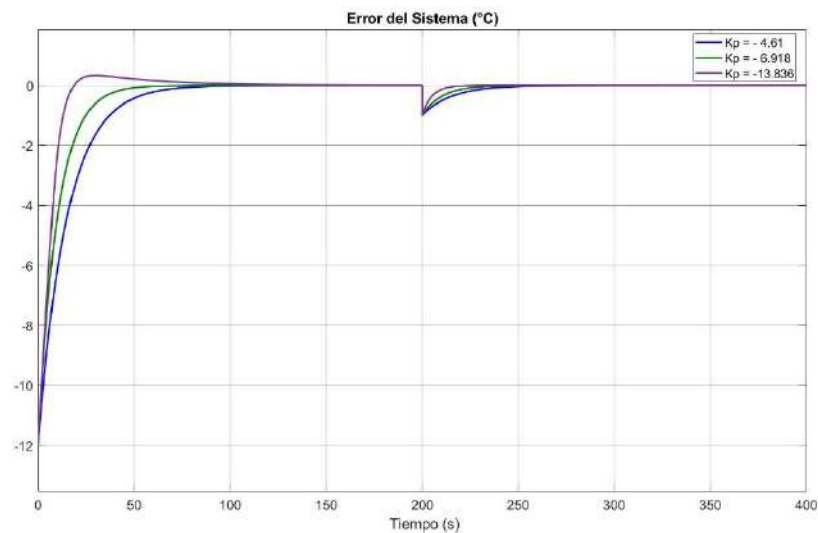


Figura 129. Error del sistema (°C). Diferencia entre la respuesta del sistema y el *set point*.

Fuente: Elaboración propia.

En tercer lugar, se tiene una comparación en la respuesta del sistema; como se muestra en la Figura 130, el transitorio de la señal de temperatura del túnel se ve influenciada por el aumento de K_p .

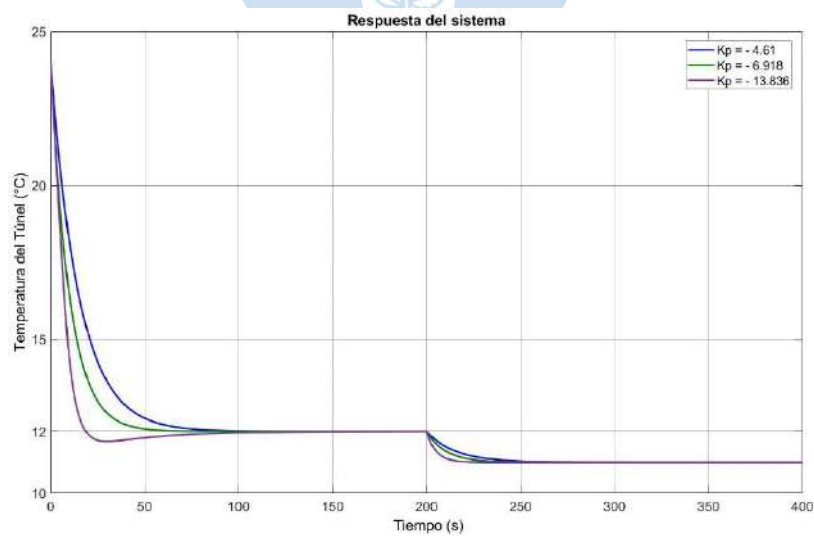


Figura 130. Respuesta del sistema – Temperatura del Túnel (°C).

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Análisis de los resultados de la implementación del controlador PID IMC

Se han realizado cuatro pruebas en la planta piloto de refrigeración con el objetivo de implementar el controlador PID IMC. Se han variado los valores de τ_f , con lo que se varían los valores de K_p , asimismo, se ha estudiado el comportamiento del controlador frente a variaciones en el *set point*.

La primera prueba se realizó con un *set point* de 12°C, $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980s$, donde se llega al valor estacionario en tres horas con 10 minutos, un valor final de 34 Hz en el compresor y error nulo (véase la Figura 114).

La segunda prueba se realizó con un *set point* de 12°C, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980s$.

Como se puede apreciar en la Figura 115, se aumentó negativamente el valor de la ganancia proporcional de -6.918 a -13.836, para determinar su influencia en la respuesta del sistema, con lo cual se llegó al estacionario en una hora con 45 minutos, se tiene una diferencia de casi dos horas con respecto al tiempo de establecimiento de la primera prueba.

Luego de llegar al estacionario, se aprovecha la prueba para cambiar a un *set point* de 10°C a las 11:25am, para evaluar su comportamiento frente a cambios de *set point*, alcanza el *set point* luego de 20 minutos.

La tercera prueba se realizó con un *set point* de 14°C, $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980s$ donde se llega al valor estacionario en una hora con 10 minutos, un valor final de 34 Hz en el compresor y error nulo (véase Figura 116).

La cuarta prueba se realizó con un *set point* de 14°C, $K_p = -6.918$ y $T_i = 1980s$. Como se puede apreciar en la Figura 117, se reduce el valor de la ganancia proporcional de -13.836 a -6.918, para determinar su influencia en la respuesta del sistema, con lo cual se llega al estacionario en tres horas, se tiene una diferencia de casi dos horas con respecto al tiempo de establecimiento de la tercera prueba.

Tabla 32.

Comparación de datos característicos de las pruebas con la implementación de PID IMC en vacío.

Características	Prueba N°1	Prueba N°2	Prueba N°3	Prueba N°4
Fecha	23/01/2020	24/01/2020	03/02/2020	12/02/2020
Hora de inicio	07:12 am	07:25 am	07:04 am	7:13 am
Hora de fin	11:35pm	12:21 pm	11:20 am	12:14pm
Duración	4hr 23min.	4hr 56min.	4hr 16min.	5hr 1min.
Frecuencia inicial	70 Hz	70 Hz	70 Hz	45 Hz
Frecuencia final	34 Hz	34 Hz	34 Hz	34 Hz

Características	Prueba N°1	Prueba N°2	Prueba N°3	Prueba N°4
Temperatura Inicial del Túnel	23°C	20.4 °C	23.7 °C	20.49 °C
Set point	12°C	12 °C	14°C	14°C
τ_f	10	5	5	10
Kp	- 6.918	-13.836	-13.836	- 6.918
Ti	1980 s.	1980 s.	1980 s.	1980 s.
Tiempo de establecimiento	3hr 10min.	1hr 45min.	1hr 40min.	3hr.

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Tabla 32, en la segunda prueba para un *set point* de 12°C se llegó a este en una hora con 45 minutos, y en la tercera prueba, para un *set point* de 14°C, dicha temperatura se estableció en una hora con 40 minutos; es decir, independientemente del valor que se le asigne al *set point* se obtendrá el mismo tiempo de establecimiento, debido a que los parámetros del controlador son iguales para ambos casos.

En cuanto al valor final de frecuencia en el compresor, se visualiza en la Tabla 32 que en todas las pruebas realizadas con el PID IMC, independientemente de los parámetros del controlador, se cuenta con un promedio de 34 Hz como valor de frecuencia en el estacionario de la variable manipulable (*u*), la cual es la entrada al proceso.

De estas cuatro pruebas en vacío, se obtienen valores óptimos para el controlador PID IMC, los cuales son $K_p = -13.836$ y $T_i = 1980$ segundos. Por lo tanto, se realizan dos pruebas con carga de banano orgánico, variando el *set point*, como se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33.

Comparación de datos característicos de las pruebas con la implementación de PID IMC con carga.

Características	Prueba N°1	Prueba N°2
Fecha	28/02/2020	2/03/2020
Hora de inicio	07:35 am	07:45 am
Hora de fin	16:33pm	16:33 pm
Duración	8hr 58min.	8hr 52min.
Frecuencia inicial	70 Hz	70 Hz
Frecuencia final	34 Hz	34 Hz
Temperatura Inicial del Túnel	24 °C	25 °C
Set point	14 °C	12 °C
τ_f	5	5

Características	Prueba N°1	Prueba N°2
Kp	-13.836	-13.836
Ti	1980 s.	1980 s.
Tiempo de establecimiento	1hr 42min.	1hr 45min.

Fuente: Elaboración propia.

4.5.1 Consumo de energía

En esta sección, se explica el cálculo del consumo de energía comparando la estrategia de control PID IMC con respecto a un controlador *ON/OFF*.

En la siguiente tabla se muestran las características de ambas pruebas utilizando un *set point* de 12 °C.

Tabla 34.

Controlador *ON/OFF* vs *PID IMC*. *Set point*: 12 °C

Características	Prueba N°1	Prueba N°2
Tipo de control	<i>ON/OFF</i>	PID IMC
Fecha	26/02/2020	2/03/2020
Hora de Inicio y Fin	7:35-16:33	7:45-16:33
Set Point	12°C	12°C
Temperatura Estacionaria Alcanzada	11.97 °C	12.01 °C
Potencia promedio del compresor kW	6.31	2.3
Energía kWh	45.93	24.833

Fuente: Elaboración propia

El consumo de energía en kWh se calcula de la Figura 131 hallando el área bajo la curva para ambos casos. En el caso del controlador *ON/OFF* se tiene un consumo de 45.93 kWh. En el segundo caso, mediante el controlador PID IMC se obtiene un consumo de 24.833 kWh.

Por lo tanto, se demuestra un ahorro del 46% en cuanto a la potencia en el compresor de la prueba con controlador PID IMC, con respecto al control *ON/OFF*.

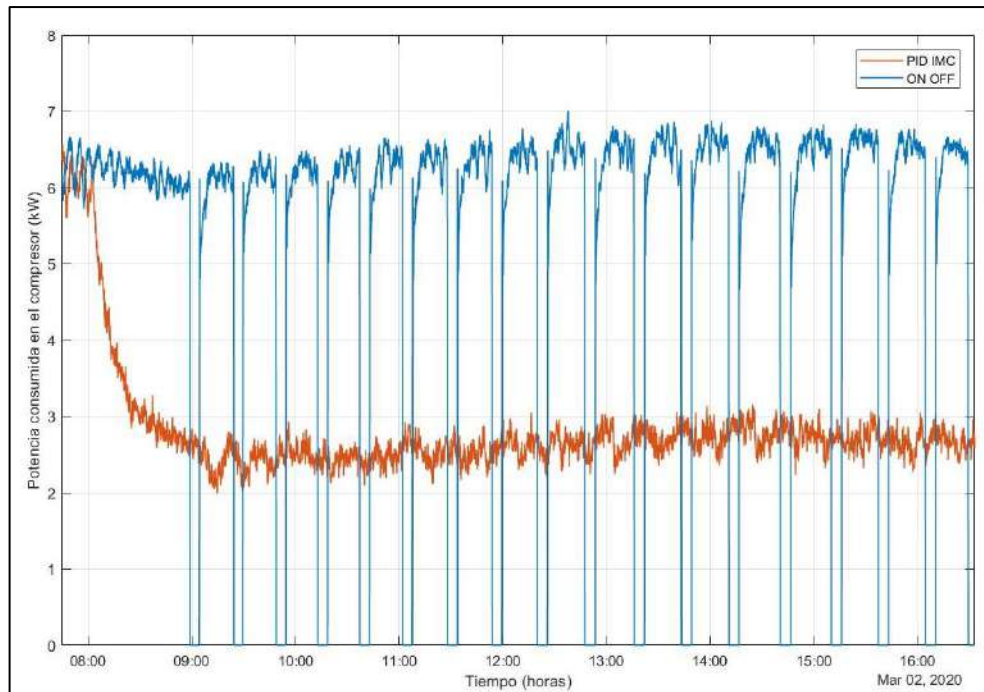


Figura 131. Potencia consumida en el compresor. En línea azul prueba con ON/OFF. En línea naranja prueba con PID IMC. Set point: 12 °C

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 35 se muestran las características de las pruebas con respecto a un set point de 14 °C.

Tabla 35.

Controlador ON/OFF vs PID IMC. Set point: 14 °C

Características	Prueba N°1	Prueba N°2
Tipo de control	ON/OFF	PID IMC
Fecha	27/02/2020	28/02/2020
Hora de Inicio y Fin	7:35-16:33	7:35-16:33
Set Point	14°C	14°C
Temperatura Estacionaria Alcanzada	13.9679676 °C	14.01 °C
Potencia promedio del compresor	kW	
Energía	kWh	
	6.31	2.3
	37.982	18.711

Fuente: Elaboración propia

El consumo de energía en kWh se calcula de la Figura 132 hallando el área bajo la curva para ambos casos. En el caso del controlador ON/OFF se tiene un consumo de 37.982 kWh. En el segundo caso, mediante el controlador PID IMC se obtiene un consumo de 18.718 kWh.

Por lo tanto, se demuestra un ahorro del 51% en cuanto a la potencia en el compresor de la prueba con controlador PID IMC, con respecto al control *ON/OFF*.

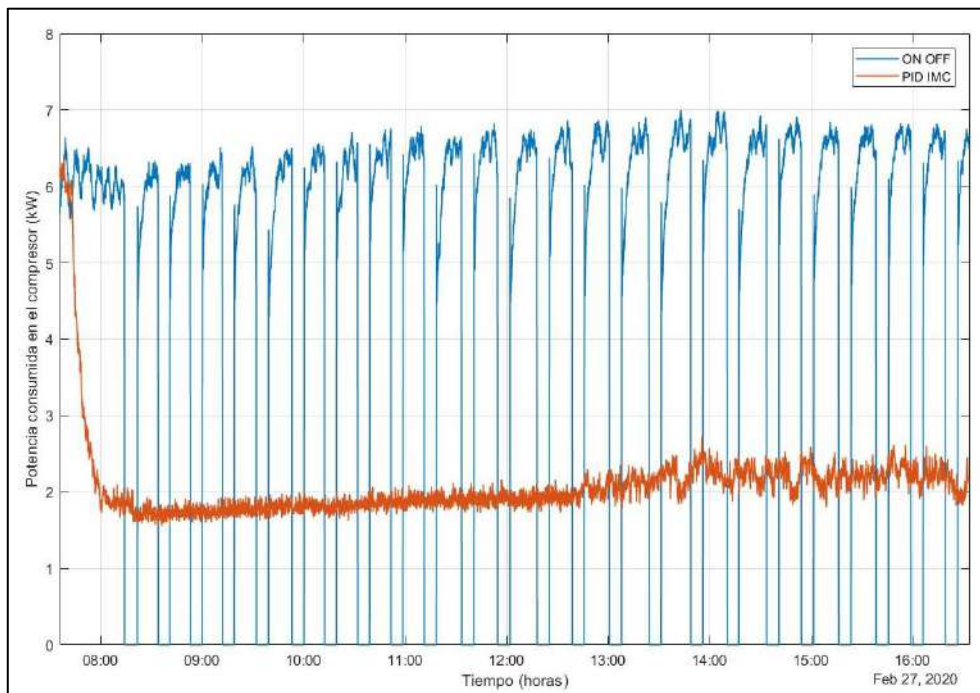


Figura 132. Potencia consumida en el compresor. En línea azul prueba con *ON/OFF*. En línea naranja prueba con PID IMC. Set point: 14 °C

Fuente: Elaboración propia

Con relación al impacto en el consumo de energía del sistema, se trabajaron con dos valores de *set point*, uno de 12 °C y otro de 14 °C.

En la Tabla 36 se muestran los resultados de la reducción de consumo energético para un *set point* de 12 °C. Se obtuvo un ahorro de consumo para el compresor de 45.9% y una reducción en el consumo total del sistema del 19.8%.

Tabla 36.

Evaluación de consumo de energía con set point 12 °C.

Energía kWh	Pruebas <i>ON/OFF</i>	Pruebas PID IMC	Reducción de consumo	Reducción porcentual
Compresor	45.93	24.83	21.10	45.9%
Resto Sistema	60.56	60.56	0.00	0.0%
Total Sistema	106.49	85.40	21.10	19.8%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 37 se muestran los resultados de la reducción de consumo energético para un *set point* de 14 °C. Se obtuvo un ahorro de consumo para el compresor de 50.7% y una reducción en el consumo total del sistema del 19.6%.

Tabla 37.

Evaluación de consumo de energía con set point 14 °C.

Energía kWh	Pruebas ON/OFF	Pruebas PID IMC	Reducción de consumo	Reducción porcentual
Compresor	37.98	18.71	19.27	50.7%
Resto Sistema	60.56	60.56	0.00	0.0%
Total Sistema	98.54	79.27	19.27	19.6%

Fuente: Elaboración propia



Conclusiones

1. Con el primer experimento (apartado 4.1 Análisis de los experimentos con entrada escalón), se logró identificar que el intervalo de trabajo del compresor oscila entre 25 Hz y 35 Hz, rango en el cual el túnel llega al intervalo de temperaturas de entre 12 a 14°C, con este dato se realizó el segundo experimento (apartado 4.2.1.2). Según los resultados mostrados en la Tabla 12, se concluye que a medida que aumenta la frecuencia del compresor la temperatura del túnel descende; por lo que son inversamente proporcionales.
2. Del segundo experimento (apartado 4.2.1.2), pruebas con señales de entrada PRBS, dentro del Grupo N° 2, el modelo lineal óptimo es el llamado “P3DZd”, el cual es un proceso con tres polos, un cero, un retardo y un disturbio, debido a que tiene un porcentaje de ajuste de 87.56% con respecto a los datos de validación, además resultó que sus residuos se encuentren dentro del intervalo de confianza (véase Figura 41).
3. De acuerdo con las pruebas realizadas con señales PRBS, se concluye que mientras mayor es la cantidad de datos que cubra el proceso, mayor es el porcentaje de ajuste para validar los modelos. Se analizó 5,240 muestras del rango estacionario, con un tiempo de muestreo de 5 segundos, y el ajuste no fue el ideal.
4. Para el tercer experimento (apartado 4.3.1.2), con señales de entrada PRS, dentro del Grupo N°5, el modelo que quedó dentro del rango aceptable es el llamado “P2DZd”, el cual es un proceso con dos polos, un cero, un retardo y un disturbio, que a su vez tiene un porcentaje de ajuste de 93.43% con respecto a los datos de validación, además sus residuos se encuentren dentro del intervalo de confianza (véase Figura 73).

5. En los experimentos con señal de entrada PRS se han obtenido ajustes a los datos de validación de los experimentos con señales de entrada PRBS, conforme al resultado obtenido para el modelo lineal “P2DZd” con 93.43% de ajuste para entrada PRS, mientras que para el modelo lineal “P3DZd” con entrada PRBS, el resultado fue de 87.56% de ajuste, habiéndose adoptado este último para el control PID IMC por su señal de entrada PRBS para identificar modelos lineales.
6. La parte de simulación y experimental ha demostrado que el PID IMC, a pesar de trabajar con un modelo lineal, ha dado muy buenos resultados, lo cual demuestra la robustez y versatilidad de ese tipo de controlador. Sin embargo, se hace notar que estos buenos resultados han sido porque el rango de trabajo en el cual se ha usado el dispositivo ha sido un rango de trabajo tolerable (25 Hz – 70Hz, 12°C – 14°C). Para controladores con mayor rango de trabajo si se sugiere en sucesivas investigaciones y experimentos utilizar otro tipo de controlador que incluya el modelo no lineal, como puede ser controles predictivos, una aproximación Wiener-Hammerstein u otras alternativas que hay en la literatura.
7. Para el logro del segundo objetivo específico, “Sintonización de un PID IMC en Simulink de MATLAB”, se definió un diagrama de bloques en Simulink de MATLAB siguiendo la estructura IMC, donde se agregaron las funciones de transferencia del proceso identificado anteriormente y se sintonizó el control PID IMC obteniendo un buen comportamiento frente a cambios de *set point* y presentó un error nulo con respecto a la temperatura deseada (véase las Figuras 128, 129 y 130).
8. El tercer objetivo específico, “Implementación del control PID basado en una estructura IMC en un túnel de enfriamiento de un sistema de refrigeración industrial”, se cumple mediante la implementación de este controlador PID basado en una estructura IMC, cuando el $\tau_f = 5$ y el $K_p = -13.836$, por su buen desempeño en alcanzar el *set point* con error nulo y se evaluó su buen comportamiento frente a cambios en dicha temperatura estacionaria en el túnel en °C.
9. En cuanto al valor estacionario de frecuencia en el compresor, se visualiza en la Tabla 32 que en todas las pruebas realizadas con el PID IMC, independientemente de los parámetros del controlador, se cuenta con un promedio de 34 Hz como valor de frecuencia

en el estacionario de la variable manipulable (u), la cual es la entrada al proceso. Los valores máximo y mínimo oscilaron entre 32 Hz y 35 Hz, respectivamente.

10. Del análisis de la performance del sistema de refrigeración industrial de la planta piloto, se determinó que con la implementación del control PID IMC se pueden obtener ahorros de energía eléctrica para el compresor de 45.9% para un *set point* de 12°C y de 50.7% para un *set point* de 14 °C. El impacto del ahorro del compresor en el sistema total de refrigeración representa una reducción de consumo de energía de 19.8% para un *set point* de 12 °C y de 19.6% para un *set point* de 14 °C.





Recomendaciones

1. Del primer experimento a entrada escalón en lazo abierto, se deduce un sistema de ganancia variable, lo cual serviría para investigaciones futuras, como un control adaptativo para ganancias variables de un sistema.
2. Se puede realizar un análisis superior para un sistema no lineal, donde es recomendable realizar el diseño de un control avanzado con un modelo de sistema no lineal, para lo cual se pueden considerar más variables de entrada y salida.
3. El presente trabajo se basó en el registro de tres variables: frecuencia actual del compresor, temperatura del cuarto, temperatura externa. Se recomienda para posibles necesidades futuras, el análisis de otros datos del sistema, entre los que se tienen:
 - Los parámetros del *lodam ecostar*: tiempo y hora, capacidad del ventilador del compresor, velocidad del condensador, entrada de corriente del ventilador, entrada de la entrada del túnel, entrada de la temperatura externa, entrada de la temperatura del compresor, entrada de la temperatura de descarga, entrada de la presión de succión, entrada de la presión de descarga, capacidad de la temperatura de *set point*, frecuencia del compresor.
 - Datos del sistema Scada: voltaje, corriente, potencia, energía, temperatura del cuarto, voltaje del inversor y frecuencia del inversor.
4. Se recomienda implementar este sistema de control en los sistemas de refrigeración de las industrias de exportación en la región Piura, con los equipos de control especializados y la implementación de este control PID IMC en reemplazo de un control *ON/OFF*, que caracteriza a los sistemas de refrigeración convencionales en la actualidad; esto implicaría generar una mayor tecnología en sus industrias y un mayor ahorro en el consumo de su energía.



Referencias bibliográficas

- Automation Direct*. (Febrero de 2019). Obtenido de Programmable Logic Controllers: <https://cdn.automationdirect.com/static/catalog/1-clickplc-plc-programmable-logic-controller.pdf>
- Barrett, D., Somogyi, L., & Ramaswamy, H. (2005). *Processing Fruits. Science and Technology*. USA: CRC Press.
- Bequette, B. W. (1999). THE IMC-BASED PID PROCEDURE. En B. W. Bequette, *Process Control: Modeling, Design and Simulation* (págs. 163-191). New Jersey: Prentice Hall PTR.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica (8th ed.)*. Ciudad de México: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA.
- Duka, A.-V., Dulau, M., & Oltean, S.-E. (2015). IMC based PID Control of a Magnetic Levitation System. *9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering*, (págs. 592-599). Tirgu-Mures, Romania.
- Dulanto B., J. A. (2014). *Experiencias en el manejo agronómico del cultivo de banano orgánico de exportación en el Valle del Chira - Sullana a nivel de pequeños productores*, 104.
- Herrera, A. (19 de Junio de 2019). Instalarán 2 mil nuevas hectáreas de banano orgánico en la región Piura.
- Ipanaqué Alama, W. (2012). *Control Automático de Procesos*. Lima, Perú: CONCYTEC.
- Jin, Q., Wang, Q., & Hao, F. (2013). A multivariable IMC-PID method for non-square large time delay systems using NPSO algorithm. *Journal of Process Control*, 649-663.
- Kader, A. A. (1996). *Banana: Recommendations for Maintaining Postharvest Quality. Perishables Handling*.
- Keesman, K. J. (2011). *System Identification: An Introduction*. London: Springer.
- Kozák, S. (2012). 13th International Carpathian Control Conference (ICCC). *Advanced control engineering methods in modern technological applications*, (págs. 392-397). High Tatras, Slovakia.
- Kumar, M., Prasad, D., Shekher Giri, B., & Sharan Singh, R. (2019). Temperature control of fermentation bioreactor for ethanol production using IMC-PID controller. *Biotechnology Reports*, 1-10.

- Ljung, L. (1987). *System Identification: Theory for the user*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ljung, L. (Abril de 2019). *System Identification Toolbox*. Obtenido de Mathworks.
- Morari, M., & Zafiriou, E. (1989). *Robust Process Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Okoro, I. S., & Enwerem, C. (2019). Internal Model Control a DC Motor. *IEEE 1st International Conference on Mechatronics, Automation & Cyber-Physical Computer Systems*, (págs. 1-5). Nigeria.
- Rivera, D. E., Morari, M., & Skogestad, S. (1985). Internal Model Control. *American Chemical Society*, 252-265.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2004). *Process Dynamics and Control*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Shah, A. K., Markana, A., & Parikh, N. N. (2010). Performance analysis of IMC based PID controller tuning on approximated process model. *Nirma University Journal of Engineering and Technology*, 51-54.
- Shahrokhi, M., & Zomorodi, A. (2012). Comparison of PID Controller Tuning Methods. 1-12.
- U, E. 4. (s.f.). *On Off Control Theory*. Obtenido de Electrical 4 U: <https://www.electrical4u.com/on-off-control-theory-controller/>
- Vijaya Selvi, J., Radhakrishnan, T., & Sundaram, S. (2007). Performance assessment of PID and IMC tuning methods for a mixing process with time delay. *ISA Transactions* 46, 391-397.
- Zeng, W., Zhu, W., Hui, T., Chen, L., Xie, J., & Yu, T. (2020). An IMC-PID controller with Particle Swarm Optimization algorithm for MSBR core power control. *Nuclear Engineering and Design*, 1-7.
- Zhu, Y. (2011). *Multivariable System Identification for Process Control*. Eindhoven: Elsevier Science & Technology Books.

Apéndices



Apéndice A. Códigos en MATLAB

A.1 Generar señal PRBS

```
c=ones(1200,1); %% duración de la 1era entrada escalón
c=c*30;          %% escalón inicial de 30 Hz
Rango=[25,35];  %% Intervalo de frecuencias en Hz
Banda=[0 0.001];
u = idinput(30000,'prbs',Banda,Rango);
u = [c; u];
plot(u);        %% gráfica de la señal prbs
```

A.2 Generar señal PRS

```
max_level = 35;    %% Valor máximo en Hz
min_level = 25;    %% Valor mínimo en Hz
mid_level = 30;    %% Valor de Inicio en Hz
max_time = 1800;   %% Máxima duración de pulso
min_time = 300;    %% Mínima duración de pulso
init_time = 1500;  %% Tiempo de inicialización
n_levels = 6;      %% Niveles de la escalera
time = 30000;      %% Tiempo total de la señal
```

Apéndice B. Mediciones de temperatura de los experimentos

B.1 Experimentos con entrada escalón

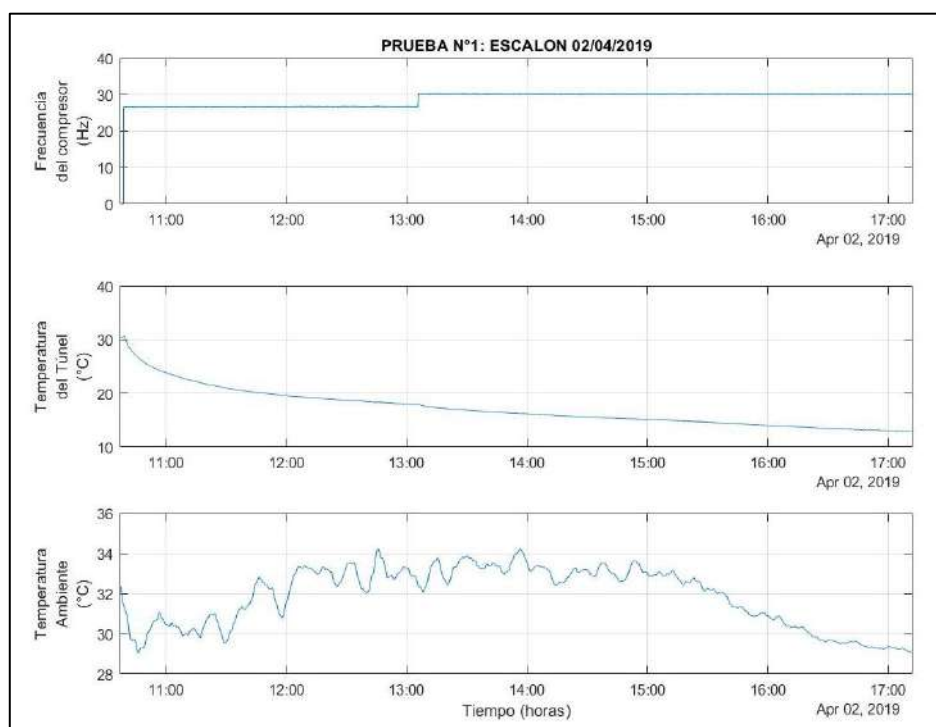


Figura 133. Resultados prueba del día 2/04/2019.

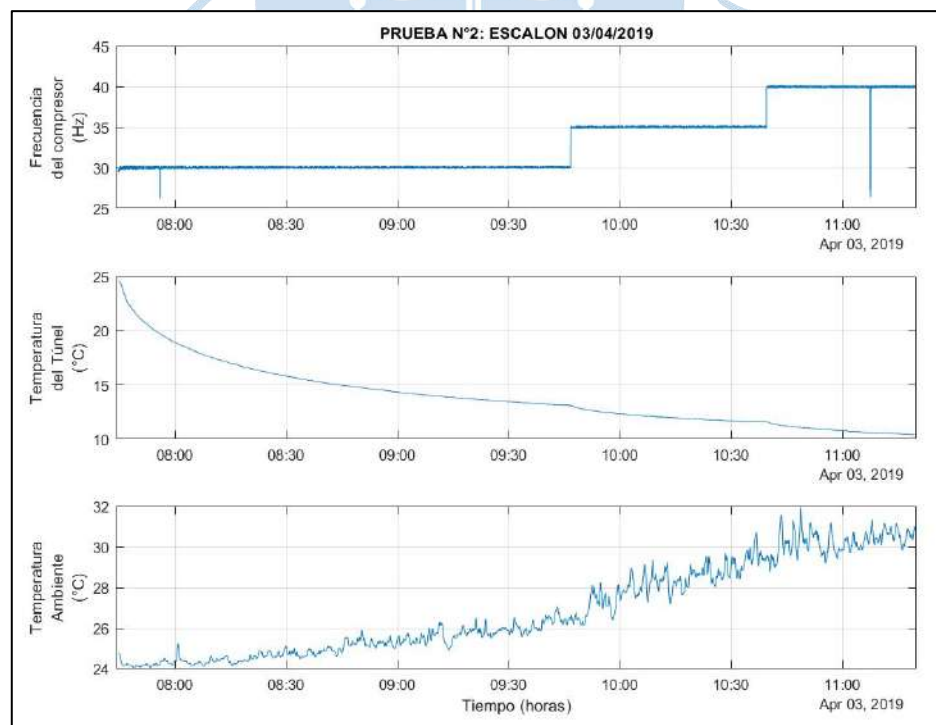


Figura 134. Resultados prueba del día 3/04/2019.

Fuente: Elaboración Propia.

B.2 Experimentos con entrada señal PRBS

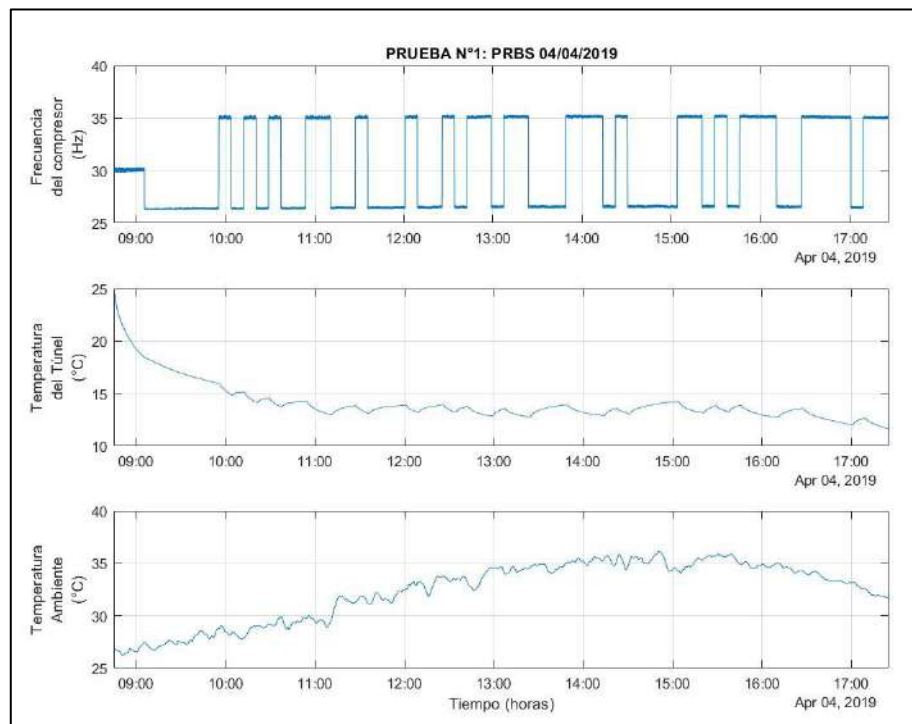


Figura 135. Resultados prueba del día 4/04/2019.

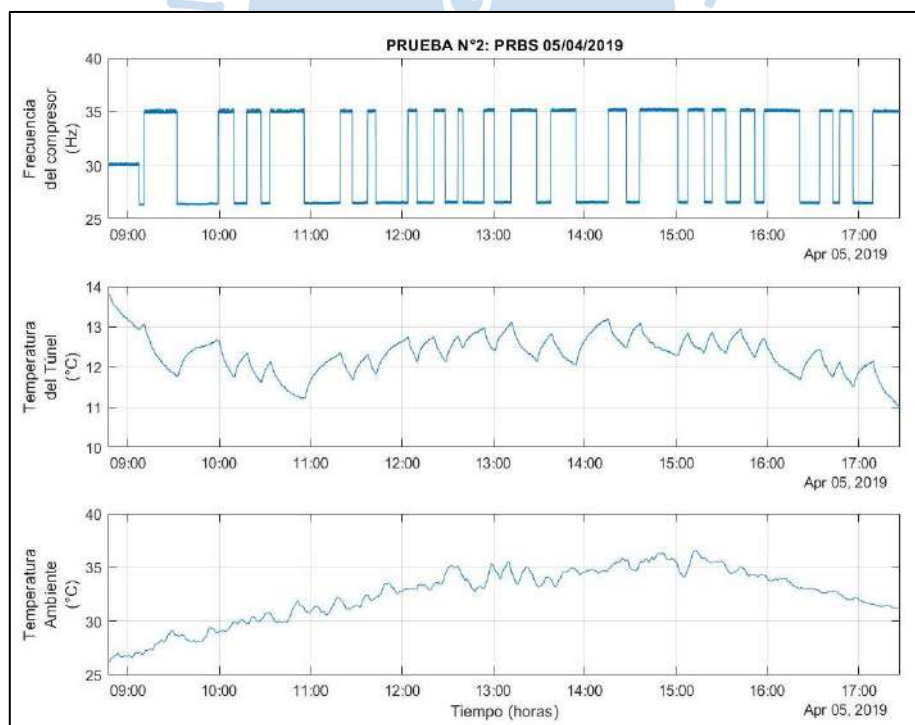


Figura 136. Resultados prueba del día 5/04/2019.

Fuente: Elaboración Propia

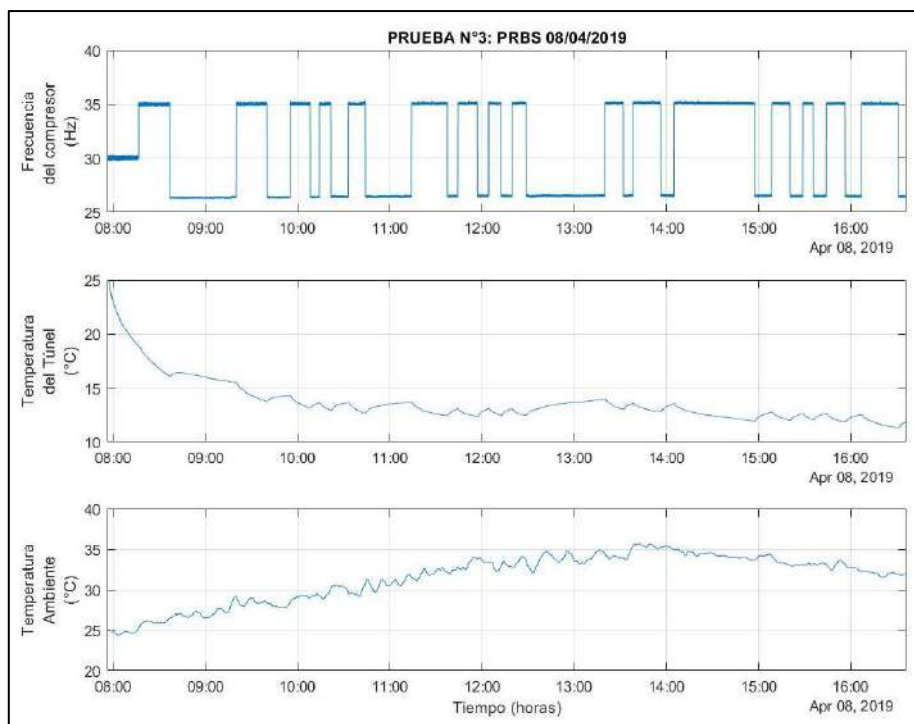


Figura 137. Resultados prueba del día 8/04/2019.

Fuente: Elaboración Propia

B.3 Experimentos con entrada señal PRS

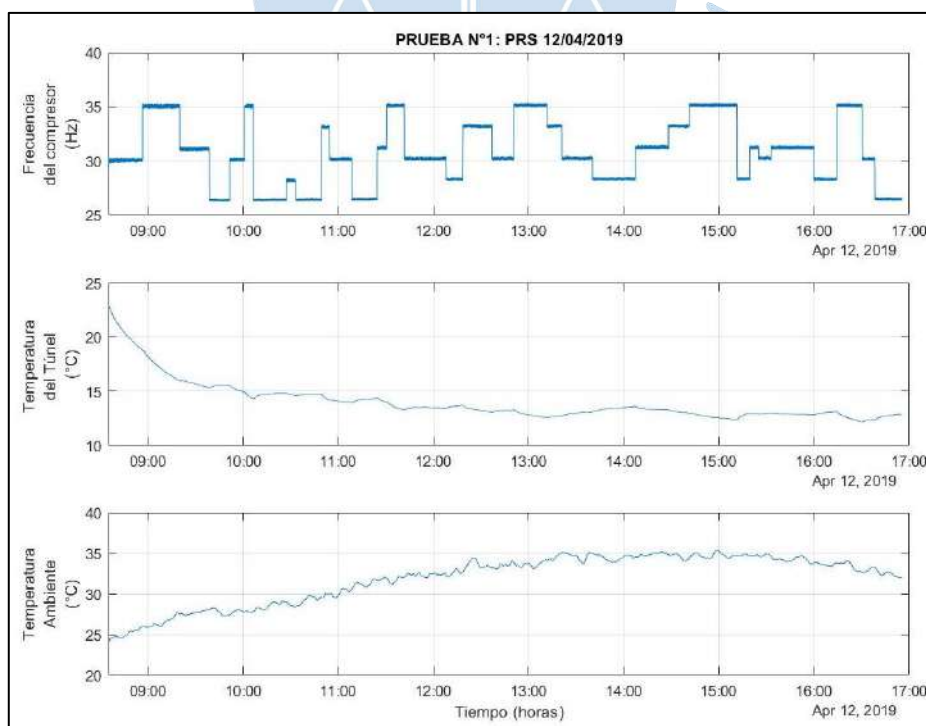


Figura 138. Resultados prueba del día 12/04/2019.

Fuente: Elaboración Propia

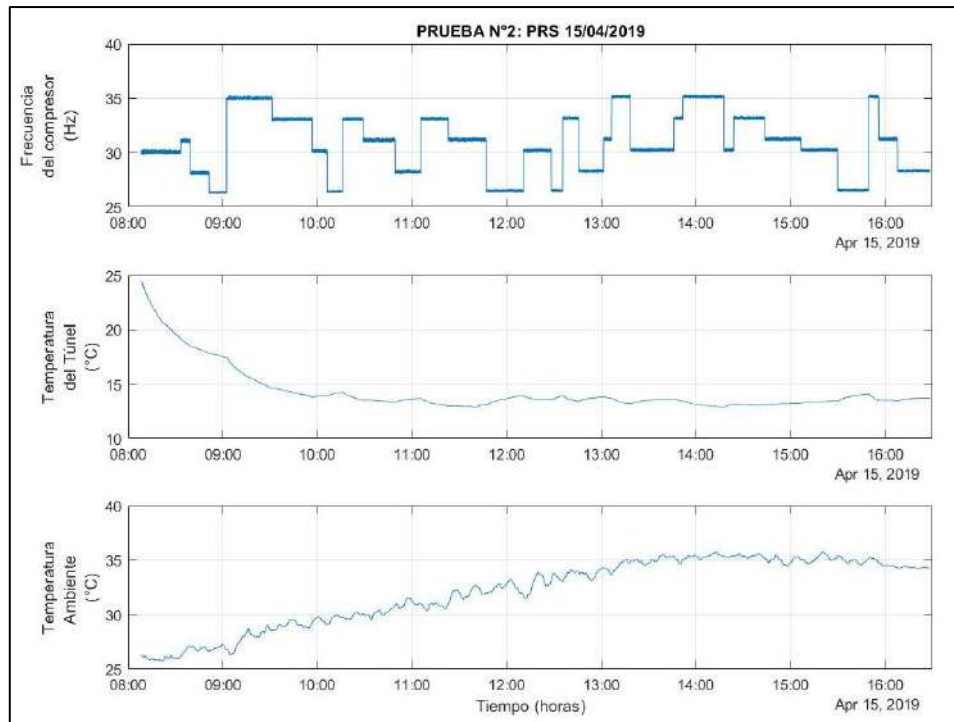


Figura 139. Resultados prueba del día 15/04/2019.

Fuente: Elaboración Propia

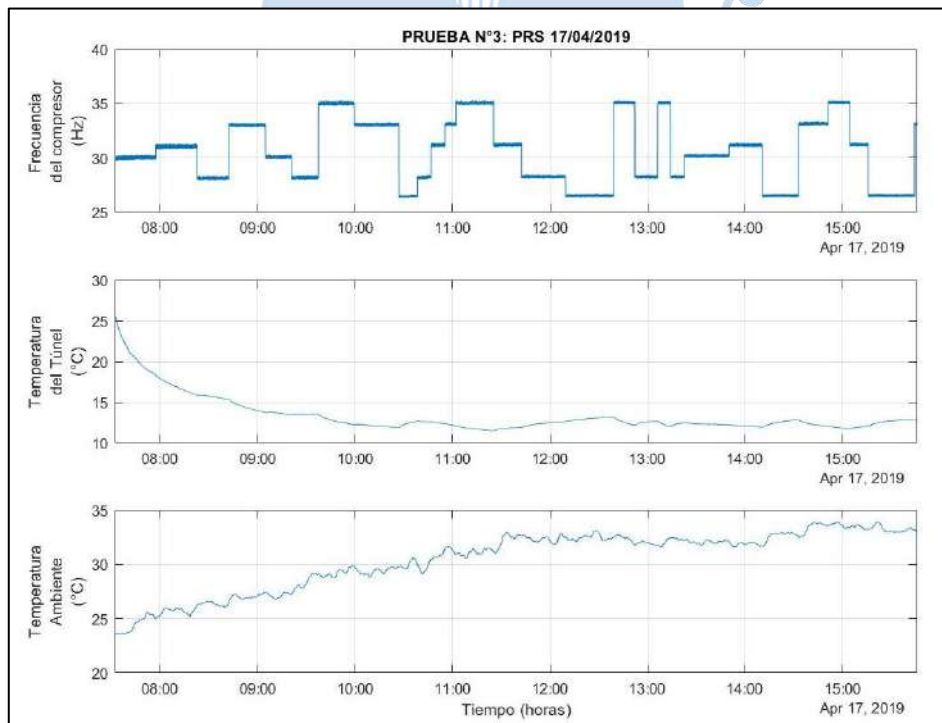


Figura 140. Resultados prueba del día 17/04/2019.

Fuente: Elaboración Propia

Apéndice C. Guía de operación del sistema

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANEJO DE SOFTWARE

PLANTA PILOTO DE REFRIGERACION INDUSTRIAL

Paso 1: Proceso de ingreso de la fruta.

La fruta a refrigerar llega a la planta piloto de refrigeración, se acomoda en cajas, las cuales son pesadas e ingresadas al túnel.



Mango



Banano Orgánico

De igual manera, se insertan los sensores de temperatura de la pulpa; en caso se necesite monitorear dicha variable.



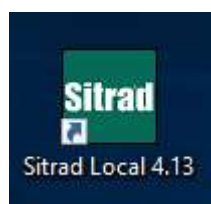
Mango



Banano Orgánico

Paso 2: Inicializando Sitrad

Se le da doble clic al siguiente ícono ubicado en el escritorio principal.



Aparece la siguiente ventana, la cual indica la estación a localizar; una vez con las estaciones localizadas, se le da clic en “Interrumpir” y luego en “Cerrar”.

Posterior a esto, aparece una ventana donde se visualizan las medidas de los sensores dentro del túnel de enfriamiento; dos sensores de pulpa y un sensor de ambiente al interior. Mediante el SITRAD, se tienen unas medidas en tiempo real, donde dice “Status” se debe indicar siempre un estado “Online”, durante los experimentos que se desee realizar.

Direc	Descripción	Temp. 1	Temp. 2	Temp. 3	Difer	Média	Alarmas	Status
001	Estación 1	21.7	21.3	22.9		21.9	---	Online
002	Estación 2	21.0	21.2			21.1	---	Online

Paso 3: Encendido del Túnel

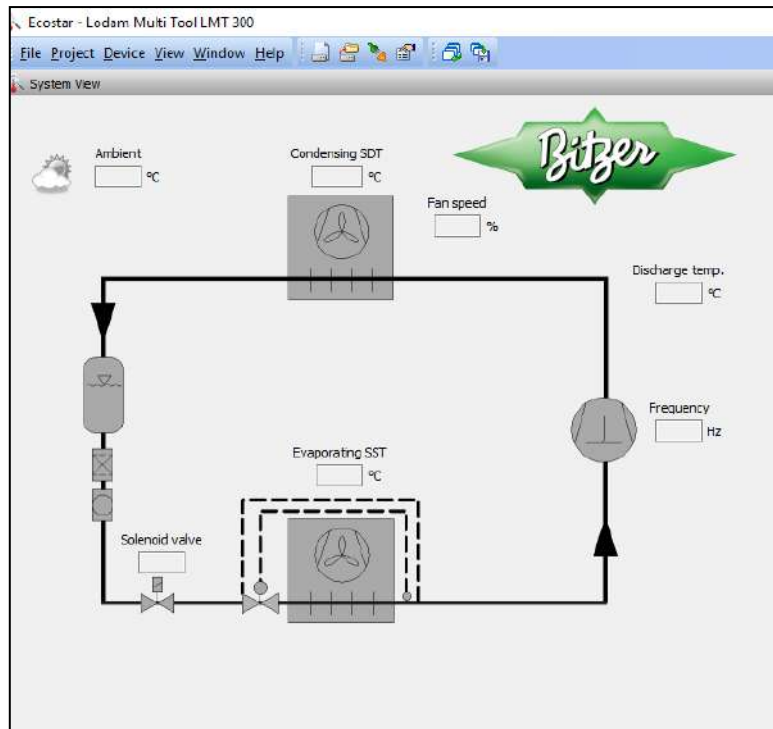
En el tablero, se tienen tres llaves: Resistencias, Solenoides y el Ventilador.

Para encender el túnel, primero se gira la llave del ventilador interno del evaporador y luego la llave de la válvula solenoide.

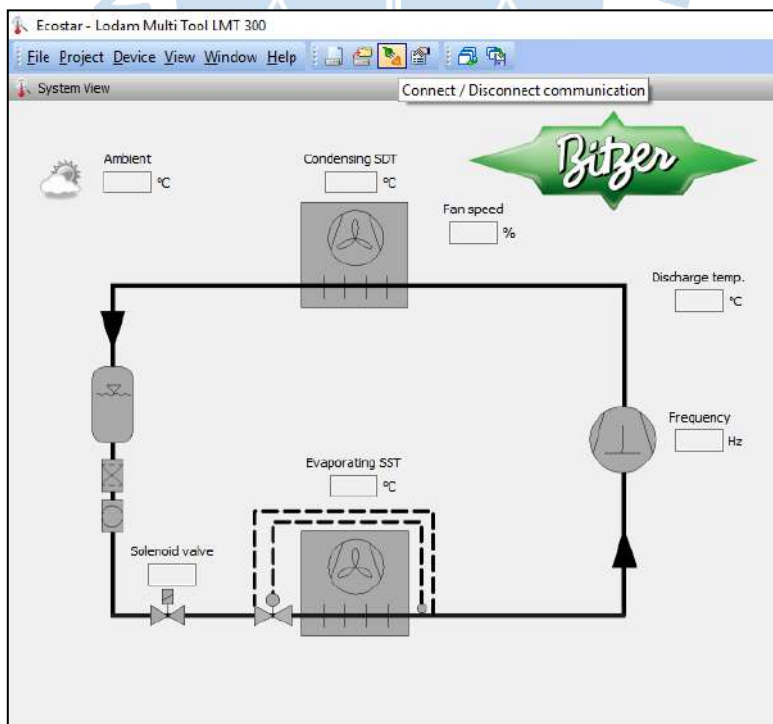
**Paso 4:** Inicializando Ecostar

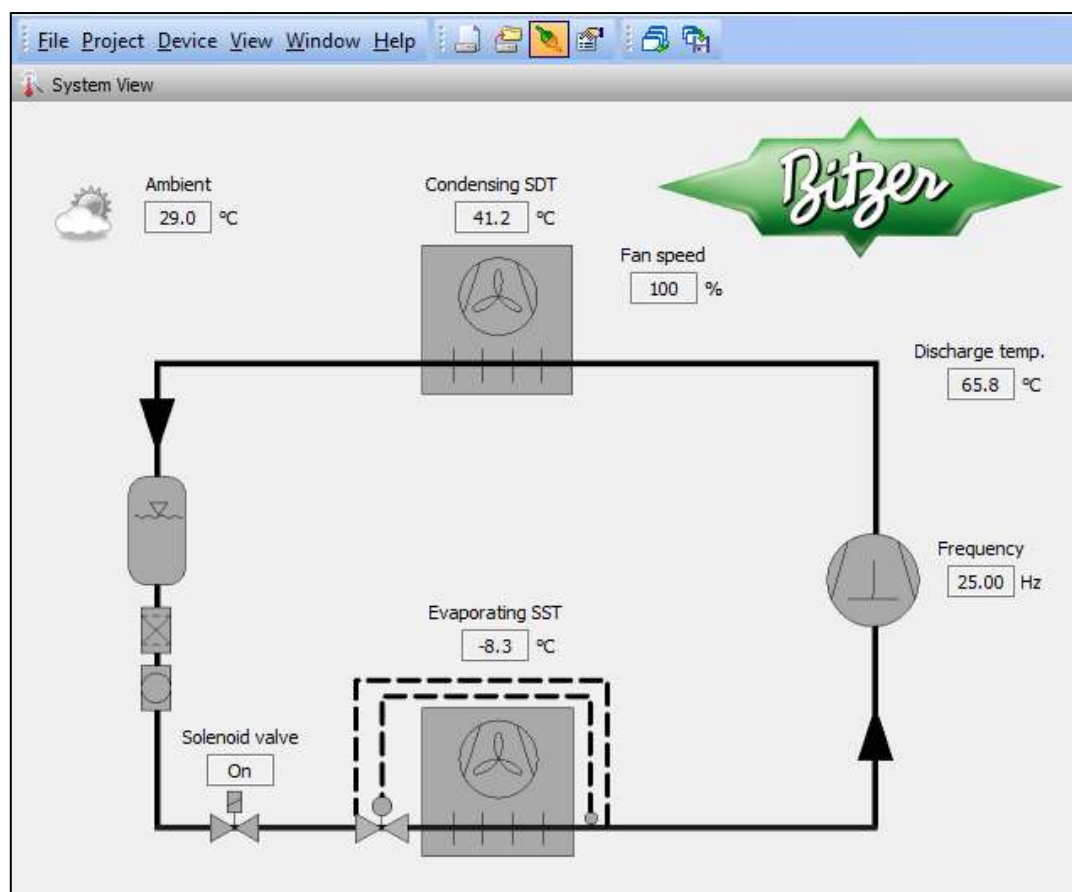
Al momento de iniciar el Ecostar, aparecen las siguientes imágenes:





Para empezar con los experimentos, se debe dar clic en el comando “Connect” como se muestra en la siguiente imagen.





Para configurar el modo de funcionamiento se va a la pestaña inferior dentro del Ecostar, en “Mode”, se da doble clic y aparece una pequeña ventana donde se debe asignar el modo “On”.

User - Dataset View			
Save values Print			
Name	Value	Unit	Description
Language	Spanish		
Mode	Off		Unit Off, On or Manual
Control mode	Temperature Control		Room or suction pressure
Suction pressure	22.08	°C	
Room temperature	23.55	°C	
Ambient temperature	30.31	°C	
Condensing temperature	31.98	°C	
Online 8/01/2019 9:02 a. m.			

Enter value

Mode

☐ Off
 ☒ On
 ☐ Manual

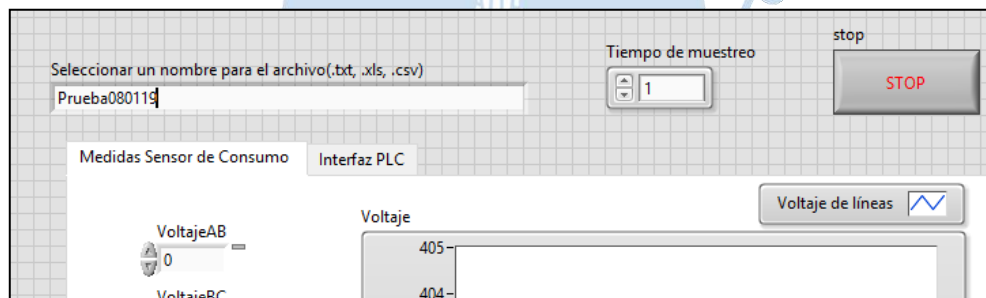
OK

Cancel

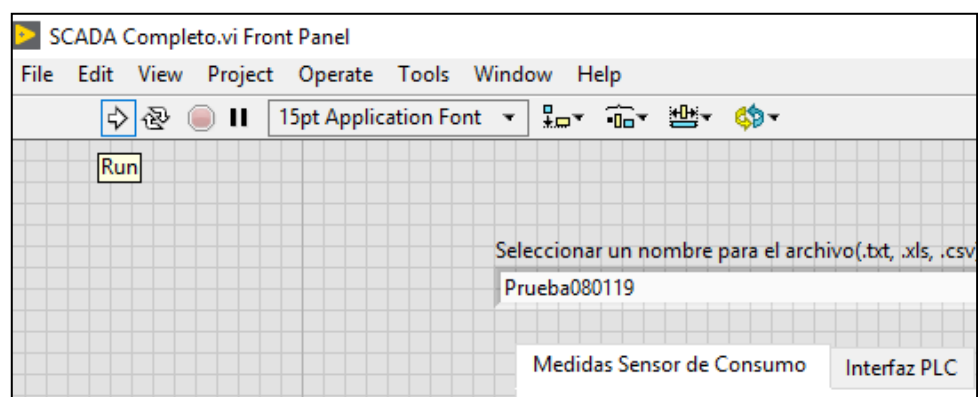
Paso 5: Inicializando el SCADA



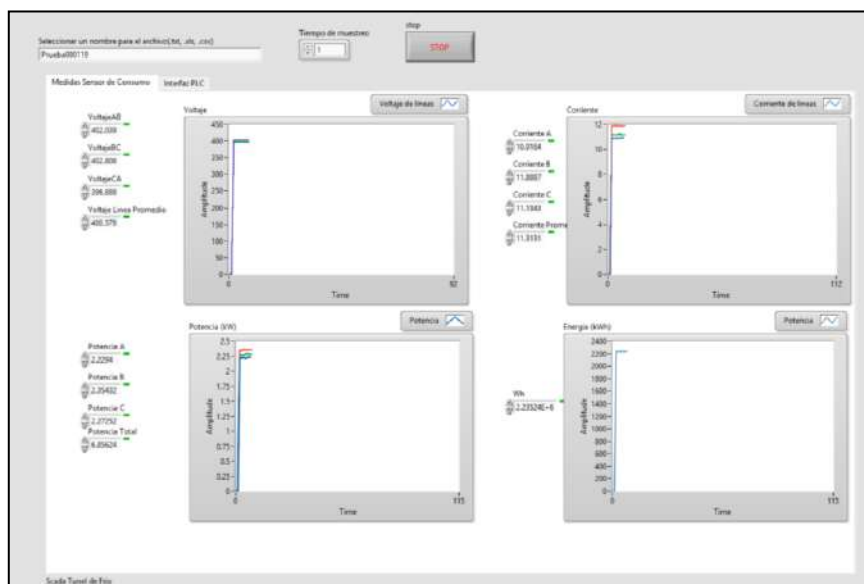
Se le asigna un nombre a la prueba que se desee realizar en el SCADA:



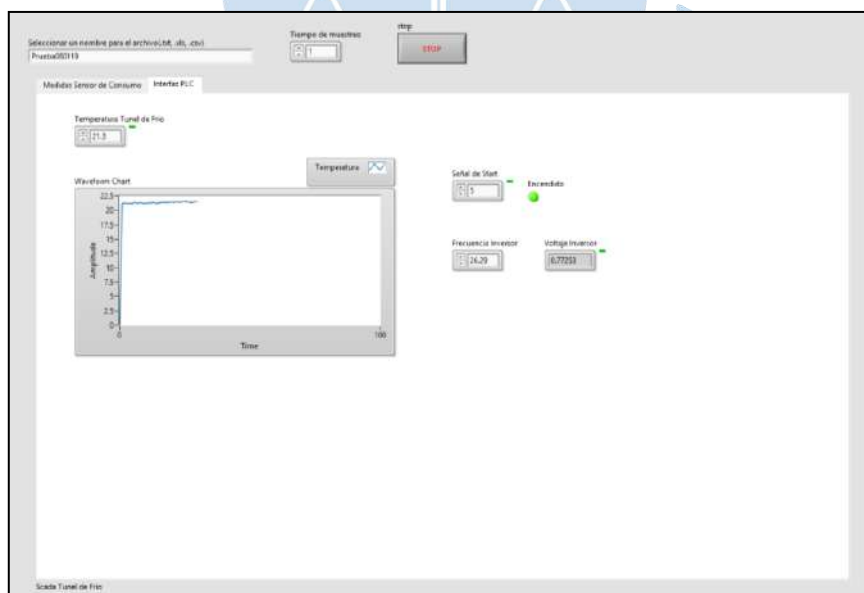
Y se da clic en la flecha; es decir en “Run”.



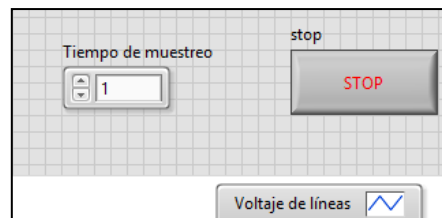
En la siguiente pantalla se muestra cómo el sistema empieza a recolectar los datos.



Se pueden modificar los datos de la frecuencia del compresor en la siguiente ventana; hay que tomar en cuenta que funciona dentro de un rango de 25 – 85 Hz. Si en caso se ingresara un valor mayor, se regresa al valor mínimo real que es 26.29Hz.

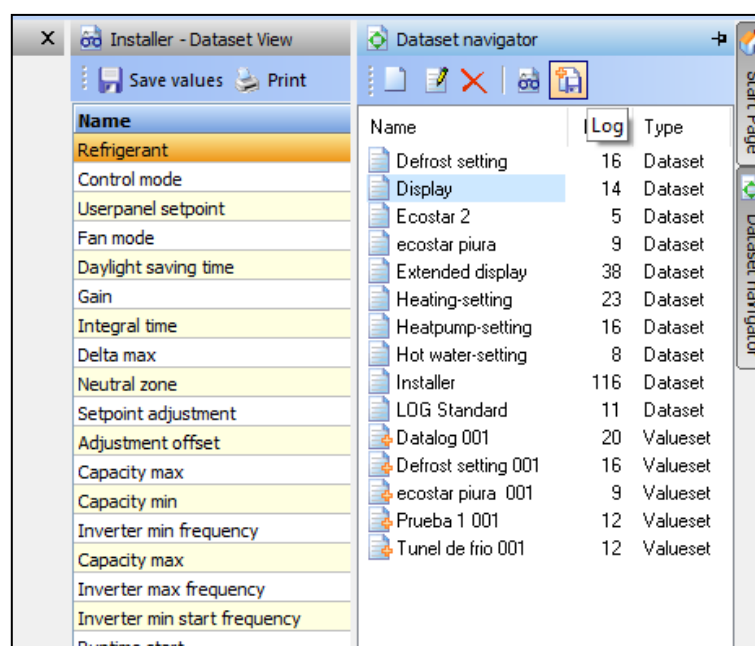


Si se desea finalizar con el experimento, se da click en “STOP”.

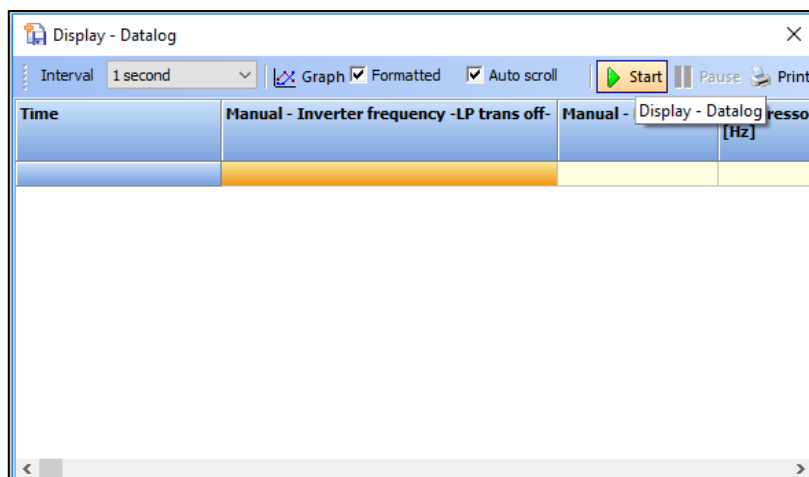


Paso 6:

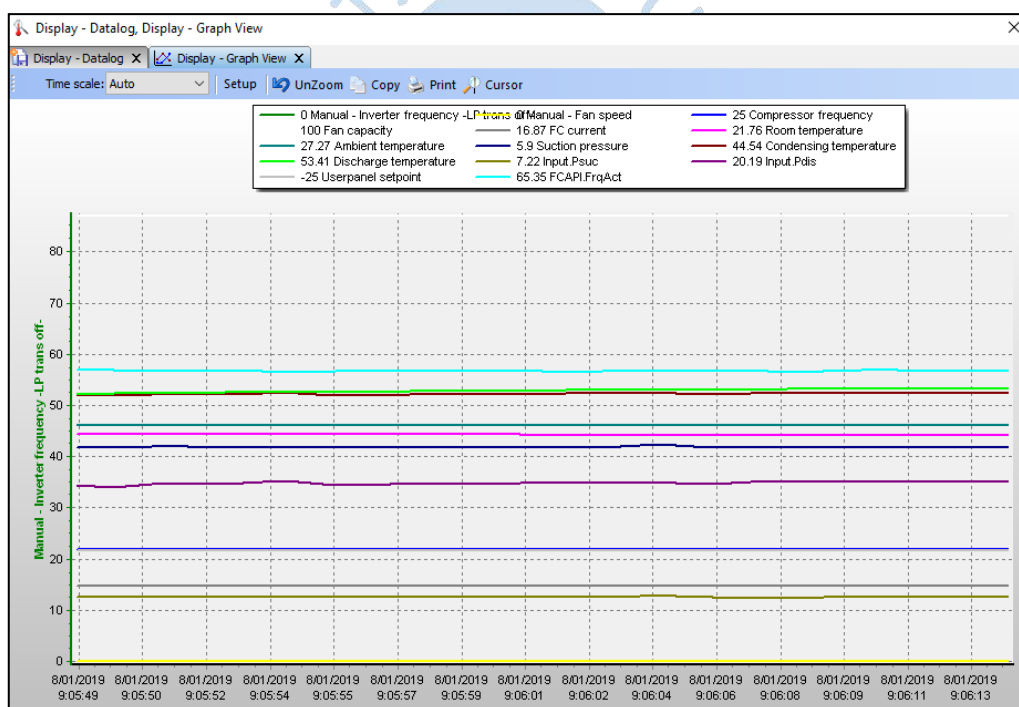
Si se desea tener una base de datos de la prueba que se esté realizando, se va a la pestaña de “Dataset Navigator” y luego clic en “Log”.



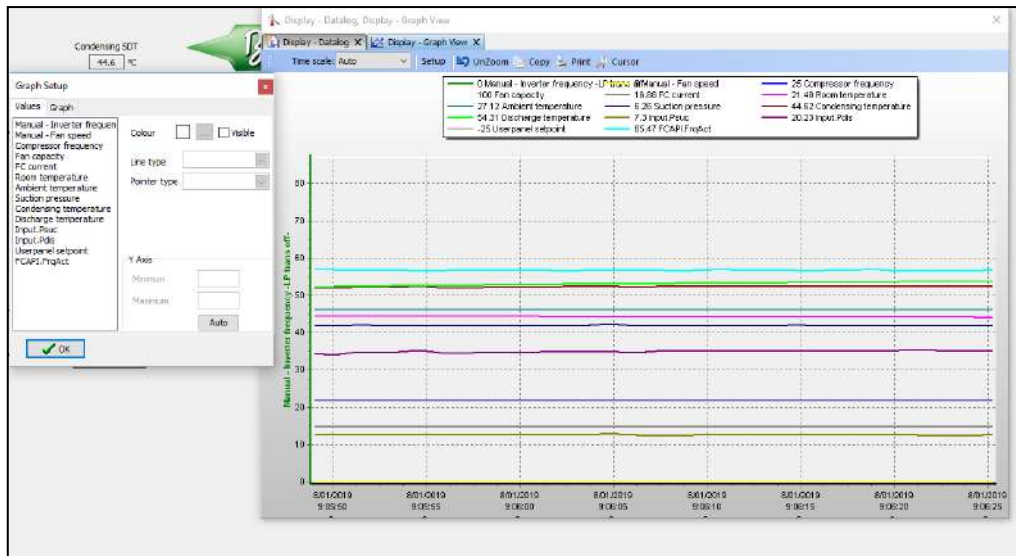
Aparece la siguiente ventana donde se mostrarán los datos medidos en tiempo real al momento de dar clic en “Start”. Para graficar se da clic en “Graph” y aparece una nueva pestaña llamada “Display – Graph View”.



Aparece la siguiente pantalla de medición de diversas variables:



Para omitir algunos valores graficados, se da clic en “Setup” y se le quita la marca de “Visible”, así solo se puede seleccionar la medición que se desea graficar en el instante de la prueba.

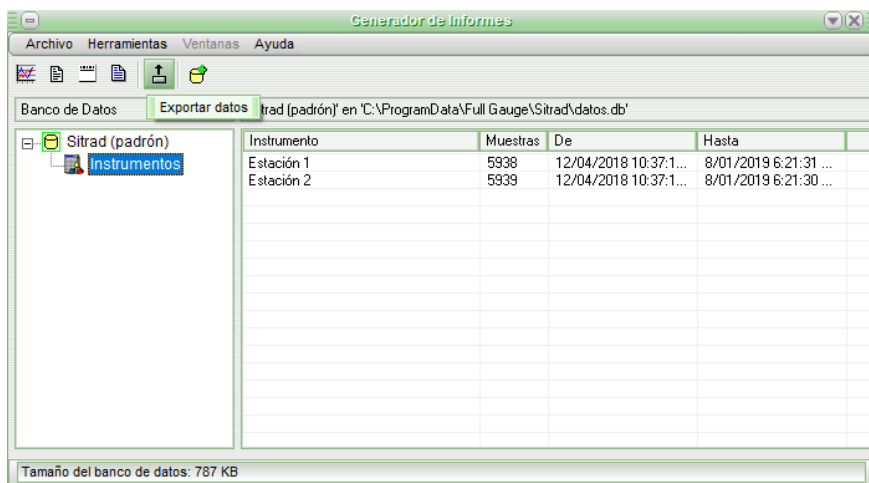


Paso 7:

Para cerrar el Sitrad, es necesario dar click en el comando “Historial”.



Aparece la siguiente imagen, se le da click en el ícono de flecha hacia arriba; lo que se guarda en una carpeta es un block de notas de las temperaturas registradas de los sensores de pulpa y temperatura ambiente asociados al Sitrad, con un tiempo de muestreo de 5 minutos, tanto de la estación 1 como de la estación 2.



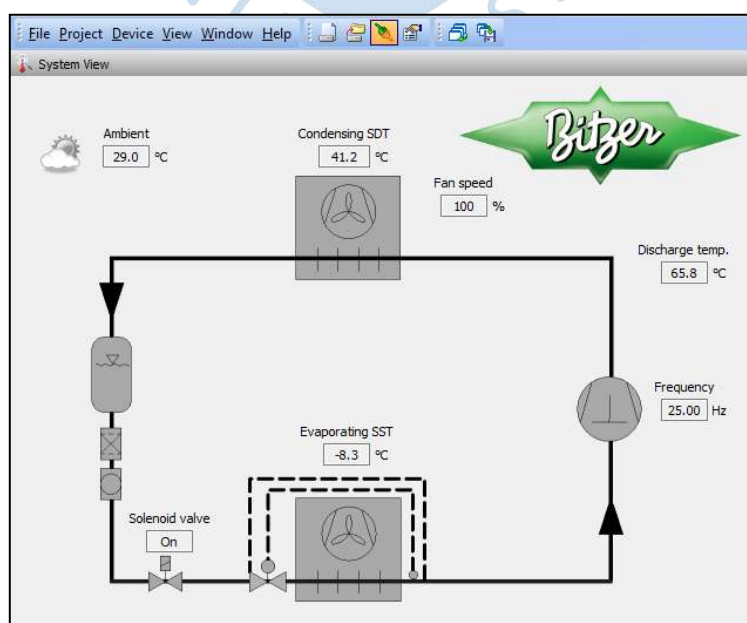
Paso 8: Desconexión del Ecostar

En la barra inferior, en “Mode”, se coloca Off para apagar el sistema:

Name	Value	Unit	Description
Language	Spanish		
Mode	Off		Unit Off, On or Manual
Control mode	Temperature Control		Room or suction pressure
Suction pressure	22.08	°C	
Room temperature	23.55	°C	
Ambient temperature	30.31	°C	
Condensation temperature	31.08	°C	

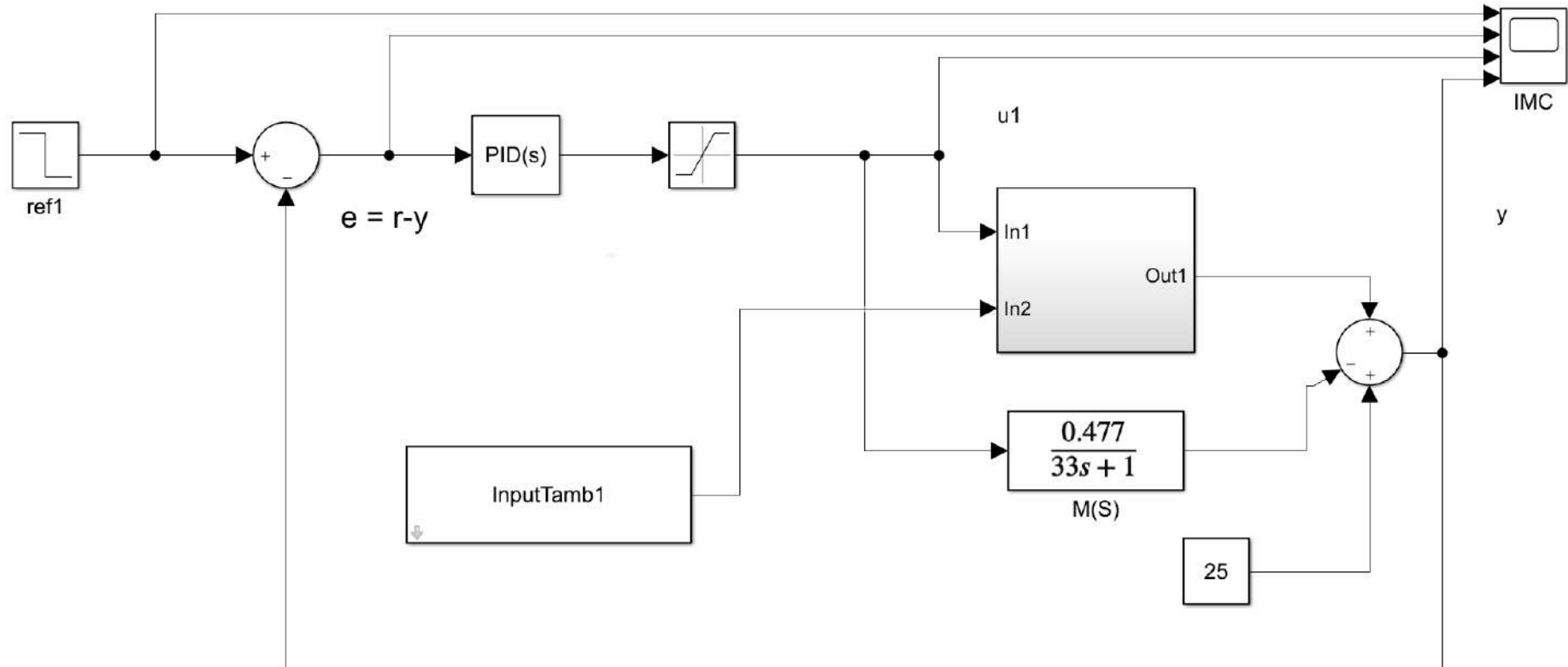
Online 8/01/2019 9:02 a. m.

Se da click en el comando “Disconnect”, para desconectar el sistema, como se muestra a continuación:

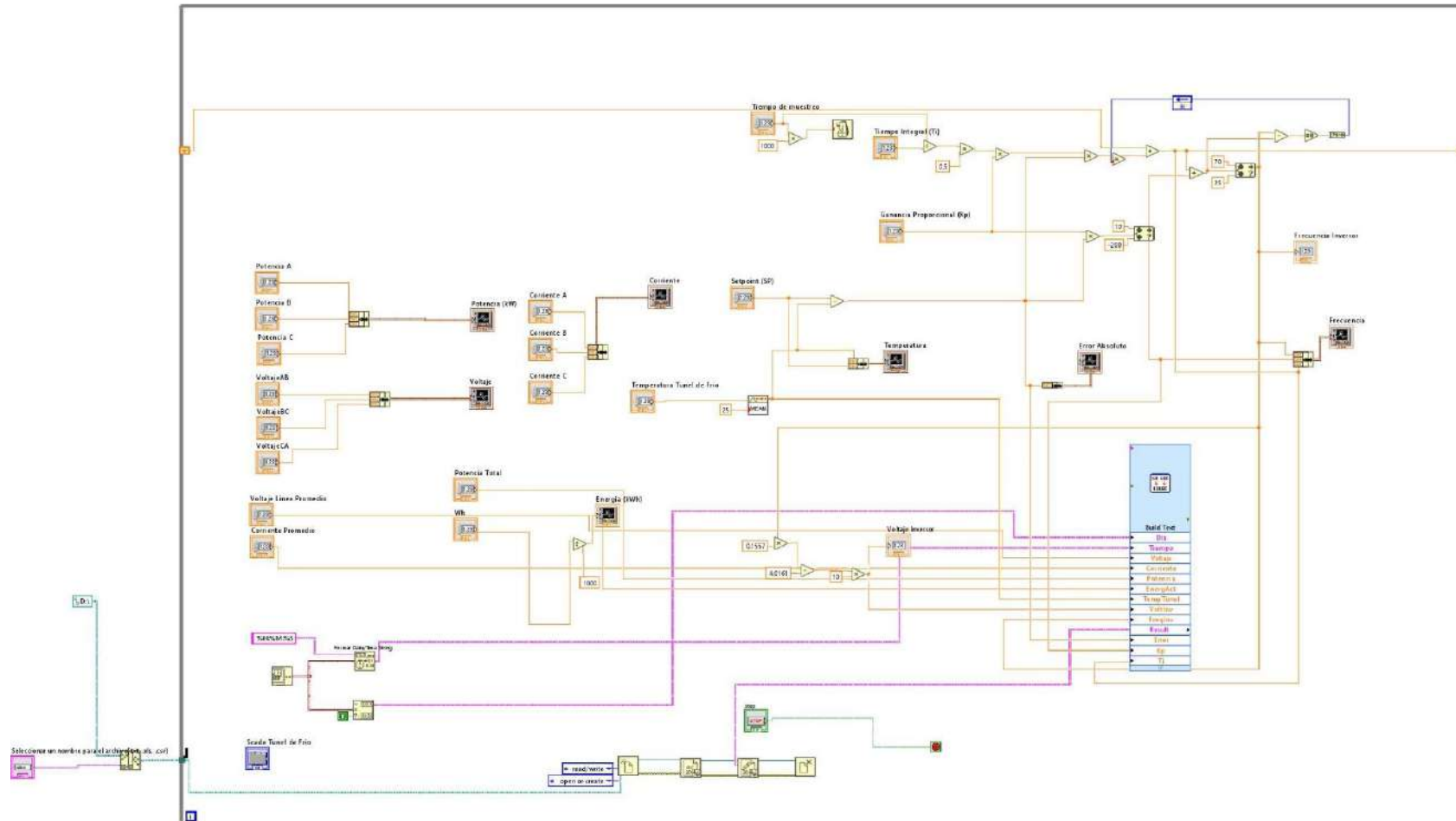


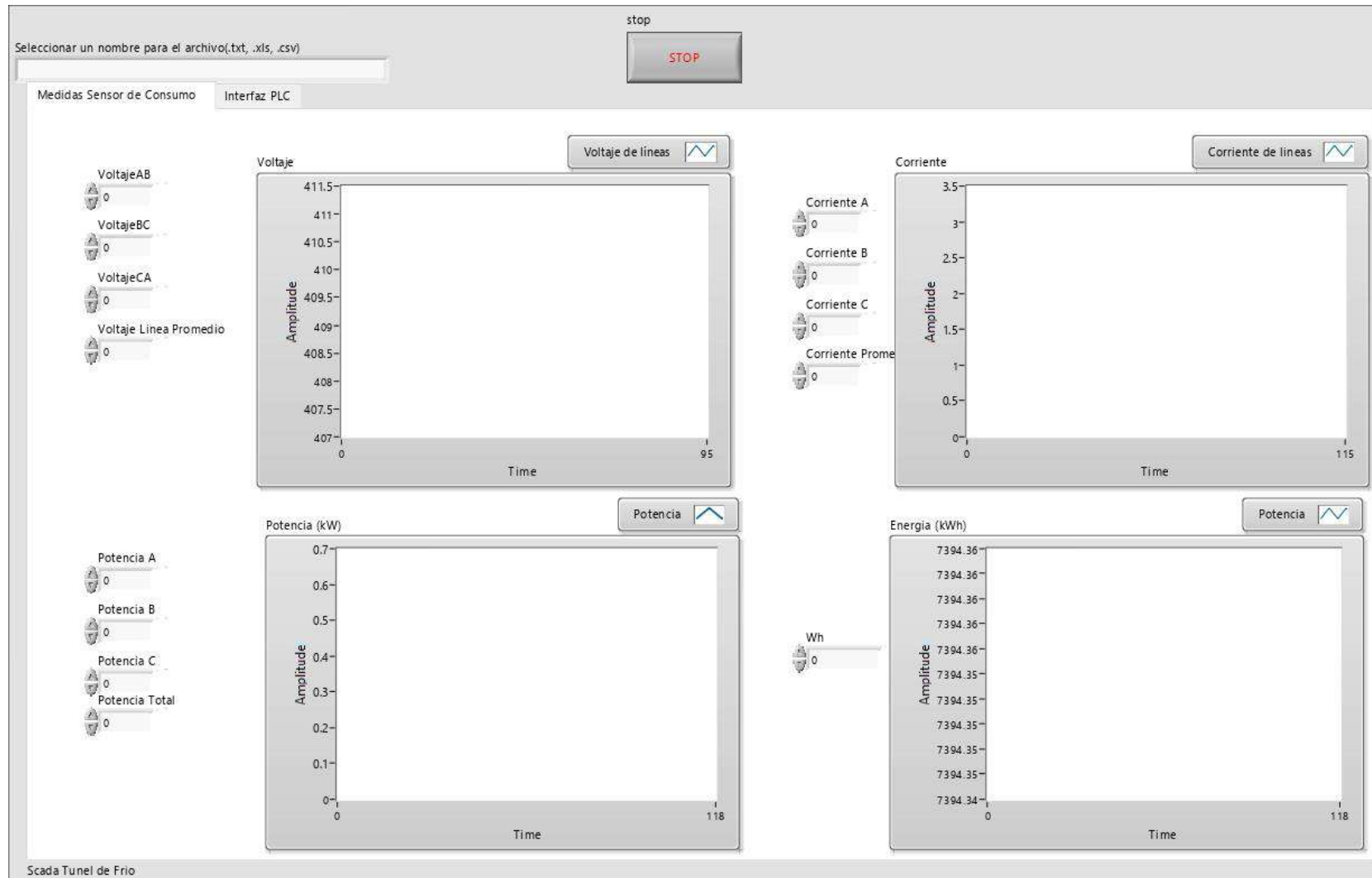
En la figura anterior, se muestra una captura de pantalla del sistema Bitzer, donde se van mostrando en tiempo real los valores de temperatura, de frecuencia y porcentaje de los distintos componentes del ciclo de refrigeración.



Apéndice D. Diagrama de bloques en SIMULINK – MATLAB

Apéndice E. Diagramas de bloques en LABVIEW



Apéndice F. Panel Frontal N°1 del diagrama de bloques en LABVIEW

Apéndice G. Panel Frontal N°2 del diagrama de bloques en LABVIEW