

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Diseño del Algoritmo de Control del Sistema de Enfriamiento de
Motores Eléctricos AC de Tracción Aplicados a Camiones
Mineros de Acarreo de 372 Toneladas.

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería de
Control y Automatización que presenta:

Juan Carlos Vega Centeno Gamio

Asesor:

Ph.D., Ing Julio Cesar Tafur Sotelo


Lima, 2025

Informe de Similitud

Yo, Julio César Tafur Sotelo, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada "Diseño del Algoritmo de Control del Sistema de Enfriamiento de Motores Eléctricos AC de Tracción Aplicados a Camiones Mineros de Acarreo de 372 Toneladas", del autor Juan Carlos Vega Centeno Gamio,dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 12%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 22/08/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 22 de agosto del 2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Tafur Sotelo, Julio Cesar	
DNI:06470028 Número del documento de identidad	Firma: 
ORCID: 0000-0003-3415-1969	



Resumen

En la presente investigación se propone determinar la viabilidad de bajar la potencia de los equipos de 4000hp a 3700hp con la finalidad de conseguir disminuir el consumo de combustible durante la operación de acarreo superficial de camiones mineros de 372 Toneladas métricas; esta variación en la potencia del motor de combustión afecta el sistema de enfriamiento por ventilador de los motores eléctricos de tracción; en ese sentido se hace necesario buscar un algoritmo de control capaz de mantener un desempeño óptimo de dicho sistema de enfriamiento bajo este nuevo régimen de trabajo.

Para encontrar este nuevo algoritmo de control se partió por el modelamiento del sistema de enfriamiento, para ello se recolectó información de la máquina operando en condiciones reales, donde luego del análisis, se requirió seccionar dicha información según los diversos modos de trabajo u operación del equipo; pues el comportamiento observado en especial la temperatura del devanado de los motores presenta grandes diferencias; con los datos obtenidos se usó algoritmos de identificación de sistemas, los cuales permitieron obtener los modelos matemáticos para cada modo de operación; modelos que luego fueron validados con información operativa del equipo.

Una vez obtenidos los modelos para cada modo de operación se inició el diseño, o sintonización de controladores PID, donde luego de recurrir tanto a las herramientas clásicas de sintonización, como los algoritmos de sintonización automática se logró obtener las ganancias del controlador PID para cada modo de operación. Una vez validados dichos controladores mediante la simulación de estos se procedió a integrarlos mediante un algoritmo de control de ganancia programada (*gain scheduling*).

Así pues, las simulaciones demostraron que si es posible optimizar la operación y por ende el consumo de combustible de estos equipos asegurando la capacidad de enfriamiento de sus motores de tracción.

Summary

In this research, it is proposed to determine the feasibility of lowering the power of the equipment from 4000hp to 3700hp in order to reduce fuel consumption during the surface hauling operation of mining trucks of 372 metric tons; this variation in the power of the combustion engine affects the fan cooling system of the electric traction motors; in this sense, it is necessary to find a control algorithm capable of maintaining optimal performance of said cooling system under this new work regime.

To find this new control algorithm, we started by modeling the cooling system, for which we collected information from the equipment operating in real conditions, where after the analysis, it was necessary to section said information according to the various working or operating modes of the equipment; since the behavior observed, especially the temperature of the motor winding, presents great differences. With the data obtained, system identification algorithms were used, which allowed us to obtain the mathematical models for each operating mode; models that were then validated with operational information from the equipment.

Once the models for each mode of operation were obtained, the design or tuning of PID controllers began, where after resorting to both classical tuning tools and automatic tuning algorithms, the gains of the PID controller for each mode of operation were obtained. Once these controllers were validated by simulation, they were integrated using a gain scheduling control algorithm.

Thus, the simulations demonstrated that it is possible to optimize the operation and therefore the fuel consumption of these equipment while ensuring the cooling capacity of their traction motors.

Agradecimientos

Agradezco de manera especial a mi madre María Rosa y a mis tíos Carlos Fernando y Luis Ricardo, quienes siempre apostaron por mí y este proyecto no fue la excepción.

A mi asesor Julio Tafur, por su dedicada labor guiando el camino para concretar exitosamente este trabajo de investigación.

Dedicatorias

Este trabajo se lo dedico a mi esposa Margarita; y a mis hijos Alejandra y Luis Eduardo, cuyo amor es el motor que me impulsa a seguir avanzando.

Juan Carlos Vega Centeno

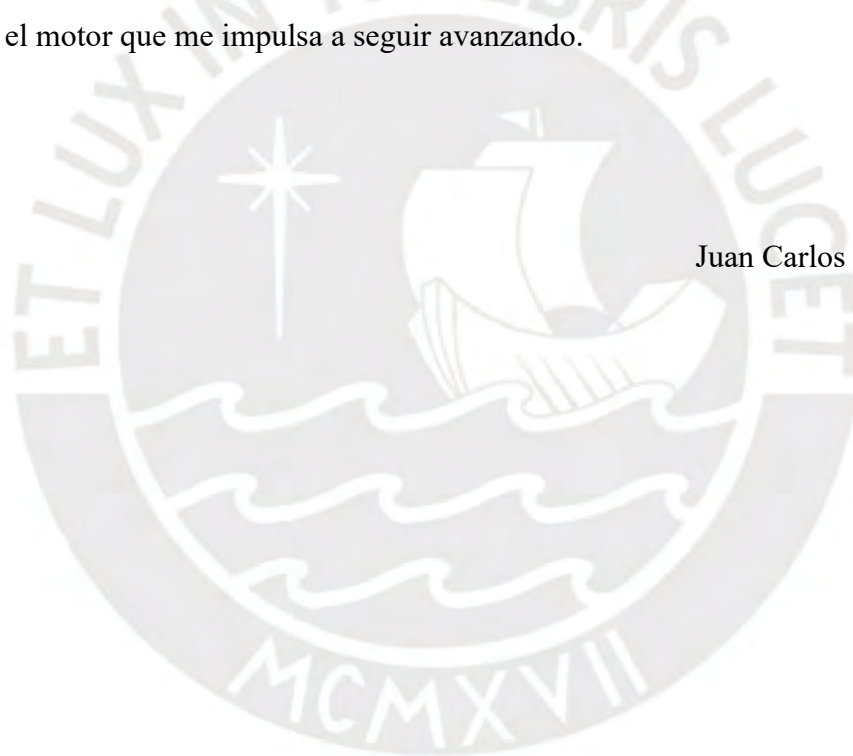


Tabla de Contenidos

Lista de Tablas.....	iv
Lista de Figuras	v
Capítulo I: Estado del Arte	1
Capítulo II: Definición de la Problemática	3
2.1. Antecedentes	3
2.2. Objetivo General	3
2.3. Objetivos Específicos.....	4
2.4. Descripción del Sistema	4
2.5. Propuesta de solución.....	5
2.6. Alcance de la Investigación.....	6
Capítulo III Marco Teórico	7
3.1 Identificación de Sistemas.....	7
3.1.1 Modelo Matemático	8
3.2 Sistemas de Control.....	12
3.2.1 Sistema de Control Retroalimentado.....	12
3.2.2 Controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo).	14
3.2.3 Sintonización de Controladores PID.	16
3.2.4 Indicadores de Respuesta de Controladores en el Dominio del Tiempo.....	17
3.2.5 Esquema de Control en Cascada	19
3.2.6 Control de Ganancia Programada (Gain Scheduling)	20
3.3 Resumen del Capitulo.	22

Capítulo IV Modelamiento del Sistema	23
4.1 Examen de Información.....	23
4.2 Modelamiento Físico.....	26
4.3 Experimentación.....	27
4.4 Selección de la Estructura.....	28
4.5 Estimación de Modelos.....	28
4.5.1 Estimación de Modelo de Planta en Modo Viajando Cargado	30
4.5.2 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Cargado	31
4.5.3 Estimación de Modelo de Planta en Modo Viajando Vacío	35
4.5.4 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Vacío	36
4.5.5 Estimación de Modelo de Planta en Modo Detenido.....	39
4.5.6 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Detenido.....	40
4.5.7 Estimación de Modelo de Planta en Modo Bajando Vacío.....	43
4.5.8 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Bajando Vacío.....	45
4.6 Validación de Modelos Planta y Actuador por Modo de Trabajo	47
4.6.1 Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Cargado.....	48
4.6.2 Validación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Cargado.....	49
4.6.3 Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Vacío.....	51
4.6.4 Validación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Vacío.....	53
4.6.5 Validación de Modelo de Planta en Modo Detenido	55
4.6.6 Validación de Modelo de Actuador en Modo Detenido.....	57
4.6.7 Validación de Modelo de Planta en Modo Bajando Vacío.....	57
4.6.8 Validación de Modelo de Actuador en Modo Bajando Vacío.....	59
4.7 Resumen de Modelos	61
4.8 Conclusiones del Capítulo.....	61

Capítulo V Diseño de Controlador	63
5.1. Sintonización de Controlador PID utilizando Ziegler Nichols	63
5.2. Sintonización y Simulación de Controlador PID con Sintonizador Automático	66
5.2.1 Sintonización y Simulación PID para la Planta Viajando Cargado.	66
5.2.2 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Viajando Cargado.	69
5.2.3 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Viajando Cargado.	72
5.2.4 Sintonización y Simulación PID para la Planta Viajando Vacío.	73
5.2.5 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Viajando Vacío	76
5.2.6 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Viajando Vacío.	79
5.2.7 Sintonización y Simulación PID para la Planta Detenido.....	80
5.2.8 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Detenido.....	83
5.2.9 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Detenido.	86
5.2.10 Sintonización y Simulación PID para la Planta Bajando Vacío.....	89
5.2.11 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Bajando Vacío.....	92
5.2.12 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Bajando Vacío.....	95
5.3. Resumen de Controladores por Modo de Trabajo	96
5.4. Control de Ganancia Programada	100
5.5. Conclusiones del Capítulo.....	102
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones.....	104
6.1 Conclusiones	104
6.2 Recomendaciones.....	105
Referencias.....	106

Lista de Tablas

Tabla 1. Factores de Sintonización PID mediante Ziegler Nichols	17
Tabla 2. Resumen de Variables y Modos de Trabajo para Modelamiento.	25
Tabla 3. Modelos de Planta y Actuador en Modo Viajando Cargado.....	34
Tabla 4. Modelos de Planta y Actuador en Modo Viajando Vacío.....	38
Tabla 5. Modelos de Planta y Actuador en Modo Detenido.	42
Tabla 6. Modelos de Planta y Actuador en Modo Bajando Vacío.	47
Tabla 7. Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Cargado.....	49
Tabla 8. Validación de Modelo Actuador en Modo Viajando Cargado.....	51
Tabla 9. Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Vacío.....	53
Tabla 10. Validación de Modelo Actuador en Modo Viajando Vacío.....	55
Tabla 11. Validación de Modelo Planta en Modo Detenido	56
Tabla 12. Validación de Modelo Actuador en Modo Detenido	57
Tabla 13. Validación de Modelo de Planta en Modo Bajando Vacío.....	59
Tabla 14. Validación de Modelo de Actuador en Modo Bajando Vacío.	60
Tabla 15. Resumen de Modelos de Planta y Actuador por Modo de Trabajo.	61
Tabla 16. Resumen de Cálculo de Ganancias PID basadas en Ziegler Nichols.....	65
Tabla 17. Resumen de Sintonización Automática de Controladores por Modo de Trabajo. ...	97
Tabla 18. Resumen de Respuestas al Escalón Unitario por Modo de Trabajo.	98
Tabla 19. Resumen Respuestas a la Simulación por Modo de Trabajo.	99

Lista de Figuras

Figura 1. Tren de Propulsión y Sistema de Enfriamiento de Camión con Tracción Eléctrica...	4
Figura 2. Diagrama de Bloques Sistema de Enfriamiento de Tren de Propulsión Eléctrico	5
Figura 3. Algoritmo para Modelado e Identificación de Sistemas.....	7
Figura 4. Señales de entrada, salida y perturbaciones del proceso	8
Figura 5. Pantalla principal aplicativo Identificación de Sistemas de Matlab.	11
Figura 6. Visualización de información de entrada y salida para cálculo del modelo.	11
Figura 7. Informe de cálculo de modelo incluido nivel de ajuste.	12
Figura 8. Ventana de Validación de Modelos Calculados	12
Figura 9. Esquema Sistema de Control Retroalimentado.	14
Figura 10. PID con Filtro Derivativo y Anti-Windup.....	16
Figura 11. Indicadores de respuesta de sistemas en el tiempo.	19
Figura 12. Esquema de Control en Cascada.....	20
Figura 13. Diagrama de Bloques de Planta y Actuador a Modelar.....	23
Figura 14. Temperaturas del Devanado de Motores Eléctricos y del Generador	24
Figura 15. Ciclos de Calentamiento-Enfriamiento por Modo de Trabajo.....	25
Figura 16. Ciclos de Enfriamiento Trabajando Vacío.....	25
Figura 17. Ciclos de Calentamiento-Enfriamiento de Motor Día 1.	27
Figura 18. Ciclos de Calentamiento-Enfriamiento de motor Día 2.....	28
Figura 19. Pantalla Principal para el Cálculo de los Modelos de Planta y/o Actuador.....	29
Figura 20. Información de Entrada para Modelos de Planta Viajando Cargado.....	30
Figura 21. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Viajando Cargado.	30
Figura 22. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Cargado.	31
Figura 23. Información de Entrada para Modelos de Actuador Viajando Cargado.....	32
Figura 24. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Viajando Cargado	32

Figura 25. Respuestas de Actuador Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Cargado.	33
Figura 26. Información de Entrada para Modelos de Planta Viajando Vacío.....	35
Figura 27. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Viajando Vacío.	35
Figura 28. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Vacío.	36
Figura 29. Información de Entrada para Modelos de Actuador Viajando Vacío.....	37
Figura 30. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Viajando Vacío.	37
Figura 31. Respuestas de Actuador Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Vacío.	38
Figura 32. Información de Entrada para Modelos de Planta Modo Detenido.....	39
Figura 33. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Modo Detenido.	39
Figura 34. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos en Modo Detenido.	40
Figura 35. Información de Entrada para Modelos de Actuador Modo Detenido.....	40
Figura 36. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Modo Detenido.	41
Figura 37. Respuestas de Actuador Medidas Vs Modelos Obtenidos en Modo Detenido.	41
Figura 38. Información de Entrada para Modelos de Planta Bajando Vacío.	43
Figura 39. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Bajando Vacío.	43
Figura 40. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos en Modo Bajando Vacío. .	44
Figura 41. Información de Entrada para Modelos de Actuador Bajando Vacío	45
Figura 42. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Bajando Vacío.	45
Figura 43. Respuesta de Actuador Medida Vs Modelos Obtenidos en Modo Bajando Vacío	46
Figura 44. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Cargado Dia 1.....	48
Figura 45. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Cargado Dia 2.....	48
Figura 46. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Cargado Dia 1.....	50
Figura 47. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Cargado Dia 2.....	50
Figura 48. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Vacío Dia 1.....	52
Figura 49. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Vacío Dia 2.....	52

Figura 50. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Vacío Dia 1.....	54
Figura 51. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Vacío Dia 2.....	54
Figura 52. Detalle Validación Modelos de Planta Modo Detenido Dia 1.....	55
Figura 53. Detalle Validación Modelos de Planta Modo Detenido Dia 2.....	56
Figura 54. Detalle Validación Modelos de Planta Bajando Vacío Dia 1.....	58
Figura 55. Detalle Validación Modelos de Planta Bajando Vacío Dia 2.....	58
Figura 56. Detalle Validación Modelos de Actuador Bajando Vacío Dia 1.....	59
Figura 57. Detalle Validación Modelos de Actuador Bajando Vacío Dia 2.....	60
Figura 58. Modelo de Sintonización Ziegler Nichols para Planta en Lazo Cerrado.....	63
Figura 59. Respuesta de Planta con Oscilaciones Constantes.....	64
Figura 60. Modelo de Sintonización Ziegler Nichols para Actuador en Lazo Abierto.....	64
Figura 61. Respuesta Sobreamortiguada de Actuador en Lazo Abierto.....	65
Figura 62. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Viajando Cargado.....	66
Figura 63. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Viajando Cargado.....	67
Figura 64. Respuesta al Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Viajando Cargado....	68
Figura 65. Simulación respuesta de PID para Planta en Modo Viajando Cargado.....	69
Figura 66. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Viajando Cargado.....	69
Figura 67. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Viajando Cargado.	70
Figura 68. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuador en Modo Viajando Cargado...	71
Figura 69. Simulación de Respuesta PID para Actuador en Modo Viajando Cargado.....	71
Figura 70. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Viajando Cargado.....	72
Figura 71. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Viajando Cargado.....	73
Figura 72. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Viajando Vacío.....	73
Figura 73. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Viajando Vacío.....	74
Figura 74. Respuesta Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Viajando Vacío.....	75

Figura 75. Simulación de Respuesta PID para Planta en Modo Viajando Vacío.	76
Figura 76. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Viajando Vacío.....	76
Figura 77. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Viajando Vacío.....	77
Figura 78. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuador en Modo Viajando Vacío.....	78
Figura 79. Simulación de Respuesta PID para Actuador en Modo Viajando Vacío.	78
Figura 80. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Viajando Vacío.....	79
Figura 81. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Viajando Vacío.....	79
Figura 82. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Detenido	80
Figura 83. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Detenido.....	81
Figura 84. Respuesta Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Detenido.....	82
Figura 85. Simulación de Respuesta PID para Planta en Modo Detenido.....	83
Figura 86. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Detenido	83
Figura 87. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Detenido	85
Figura 88. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuador en Modo Detenido.....	85
Figura 89. Simulación de Respuesta PID para Actuador en Modo Detenido	86
Figura 90. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Detenido.....	87
Figura 91. Configuración/Sintonización de PID para Sistema Cascada en Modo Detenido ...	88
Figura 92. Respuesta Escalón Unitario de PID para sistema Cascada en Modo Detenido.....	88
Figura 93. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Detenido	89
Figura 94. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Bajando Vacío.....	89
Figura 95. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Bajando Vacío.....	91
Figura 96. Respuesta Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Bajando Vacío.....	91
Figura 97. Simulación de Respuesta PID para Planta en Modo Bajando Vacío.....	92
Figura 98. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Bajando Vacío	93
Figura 99. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Bajando Vacío	94

Figura 100. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuador en Modo Bajando Vacío.....	94
Figura 101. Simulación de Respuesta PID para Actuador en Modo Bajando Vacío.....	95
Figura 102. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Bajando Vacío.	96
Figura 103. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Bajando Vacío.....	96
Figura 104. Modelo Simulink de Controlador PID de Ganancia Programada.....	100
Figura 105. Configuración PID para Controlador de Ganancia Programada.	101
Figura 106. Matriz de Familia de Controladores PID declarada en Matlab.	101
Figura 107. Simulación de Respuesta de Controlador en Modo de Ganancia Programada...	102



Capítulo I: Estado del Arte

Se ha podido identificar los siguientes documentos que configuran el estado del arte de la presente investigación iniciando con lo más reciente:

“Control descentralizado adaptativo con PI por Ganancia Programada de un sistema de refrigeración por compresión de vapor” presentado por Lara, Garrido Vázquez en el 2018 donde se diseña un controlador adaptativo utilizando diferentes modelos lineales identificados en varios puntos de operación.

“Control en cascada de la temperatura de un reactor continuo de tanque agitado encamisado” presentado por Llácer en 2018 donde describe el desarrollo de un sistema de control en cascada flujo temperatura para un tanque encamisado operando alrededor de un punto de funcionamiento.

“Control PI adaptativo por Ganancia Programada del nivel de un tanque de sección trapezoidal” presentado por Lara, Garrido, Ruz y Vázquez en el 2018 donde se diseña un controlador PI adaptativo utilizando diferentes modelos lineales identificados en varios puntos de operación para un sistema no lineal.

“Diseño e implementación de un control adaptativo para temperatura de un motor de combustión interna utilizando la técnica de identificación basada en mínimos cuadrados recursivos” presentado por Portilla en el 2017 donde muestra el sistema de control de ganancia programada como una opción adaptativa para el control de sistemas de temperatura complejos.

“Diseño e implementación de un sistema de control en cascada en la planta de intercambio térmico -PIT000” presentada por Álvarez, Moreno y Ramírez en el 2016 donde se plantea una estrategia de control en cascada para el control de un sistema de flujo y temperatura pasando por la definición de las condiciones de operación del proceso y el modelado del lazo de control mediante funciones de transferencia utilizando Matlab para la sintonización del controlador.

“Control multimodal en entornos inciertos usando aprendizaje por refuerzos y procesos gaussianos” presentado por De Paula, Ávila, Sánchez y Acosta en el 2015 que demuestra que para sistemas complejos es posible descomponer la tarea de control en diferentes modos de control donde cada uno implementa una ley de retroalimentación en función a la ocurrencia de un evento interno o externo.

“Estudio comparativo de algoritmos de auto-ajuste de controladores PID” publicado por Romero, Arrieta, Reynoso, García & Balaguer en el año 2012 donde nos muestra un análisis de las bondades que ofrecen los diferentes algoritmos de auto sintonización de controladores PID ampliamente demandados en la industria.

“Procedimiento para el cálculo de los parámetros de un modelo térmico simplificado del motor asíncrono” presentado por Gomez & Viego en el año 2010; donde se encuentra un modelo paramétrico, cuyos valores se ajustan con el apoyo de un algoritmo genético.

“Control óptimo del sistema de enfriamiento de motores de inducción” presentado por Juárez en 2009 donde se ha diseñado el sistema de control para el enfriamiento de un motor de inducción.

“Identificación Paramétrica de Modelos Térmicos en Espacio Estado de Motores de Inducción”² presentado como Tesis de Maestría de José Aquino en México DF donde se logra modelar el calor generado en motores de inducción utilizando una ecuación diferencial de segundo orden para luego pasar al espacio estado.

Capítulo II: Definición de la Problemática

Este capítulo busca establecer el problema de control automático a resolver aplicado al sistema de enfriamiento de los motores de tracción del tren de propulsión eléctrico de camiones de acarreo de 372 toneladas métricas para minería superficial.

2.1. Antecedentes

Dada la necesidad de las empresas mineras de reducir por un lado su huella de carbono producto de las emisiones con efecto invernadero asociadas a sus actividades operativas (Valencia, 2023), y por el otro optimizar sus costos de producción, dentro de los cuales el consumo de combustible diésel representa alrededor del 23% de los costos generados por la maquinaria pesada (camiones gigantes, excavadoras), constituyendo estos así la partida más importante; surge pues la necesidad de optimizar el trabajo de camiones de acarreo de 372 toneladas con tracción eléctrica aplicados en minería de tajo abierto, buscando balancear por un lado la velocidad de desplazamiento atada a la potencia generada y al consumo de combustible y por ende la productividad; y por otro lado controlar la temperatura interna de los devanados de los motores eléctricos de tracción AC, atada al flujo de corriente y la consecuente durabilidad y costo de los componentes; dado que los materiales y barnices aislantes del motor se degradan de forma exponencial por cada 10°C por encima de la temperatura máxima de la clase de aislamiento, reduciendo así la vida útil de estos componentes hasta en la mitad (Pillay & Manyage, 2006).

2.2. Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es encontrar un nuevo algoritmo de control para el sistema de enfriamiento del tren de propulsión del camión que permita que los motores AC de tracción trabajen en condiciones de potencia y temperatura óptima.

2.3. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que se desprenden del objetivo general son: (1) Identificar un modelo que describa aceptablemente el comportamiento de la temperatura de devanados de los motores de tracción, considerando los efectos del generador, así como la cabina inversora en función a la velocidad del ventilador y su señal de actuación para diversas condiciones de operación del equipo; (2) Diseñar un controlador que sea capaz de mantener una temperatura óptima de los motores de tracción; (3) Simular el comportamiento del sistema.

2.4. Descripción del Sistema

En la Figura 1 se muestra el tren de propulsión del camión minero de 372 toneladas métricas (Ton); el cual está constituido por un motor diésel adosado a un generador, donde ambos producen la energía eléctrica que luego será enviada a la cabina inversora la cual según la demanda de torque y velocidad de operación del equipo proveerá energía hacia los motores eléctricos de tracción, cuyo movimiento finalmente pasará por una reducción planetaria antes de llegar a las llantas y al terreno para desplazar el vehículo. La Figura 1 resalta en color amarillo la ubicación del sistema de enfriamiento por aire, el cual busca controlar la temperatura de los componentes mayores que forman parte del tren de propulsión con mando eléctrico de un camión.

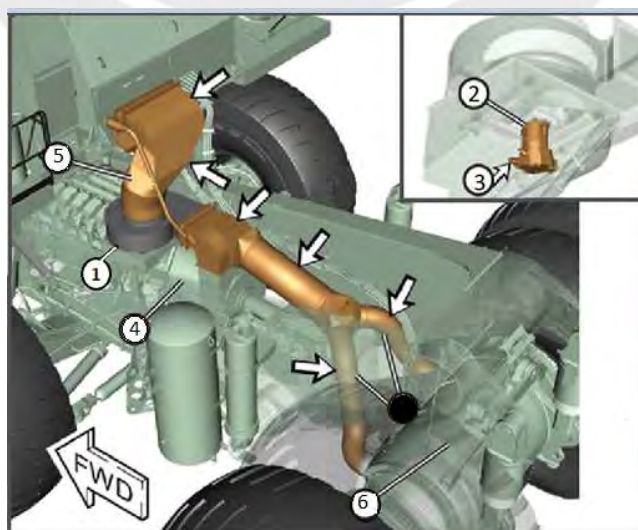


Figura 1. Tren de Propulsión y Sistema de Enfriamiento de Camión con Tracción Eléctrica.

En la Figura 2 se muestra esquematizado el sistema de enfriamiento por aire del tren de propulsión el mismo que está constituido por: un ventilador (1) accionado por un motor hidráulico de caudal variable (2) manipulado mediante un solenoide (3); este ventilador provee aire de enfriamiento a través del arreglo de tuberías tanto al generador (4), la cabina inversora (5) como a los motores eléctricos de tracción AC (6).

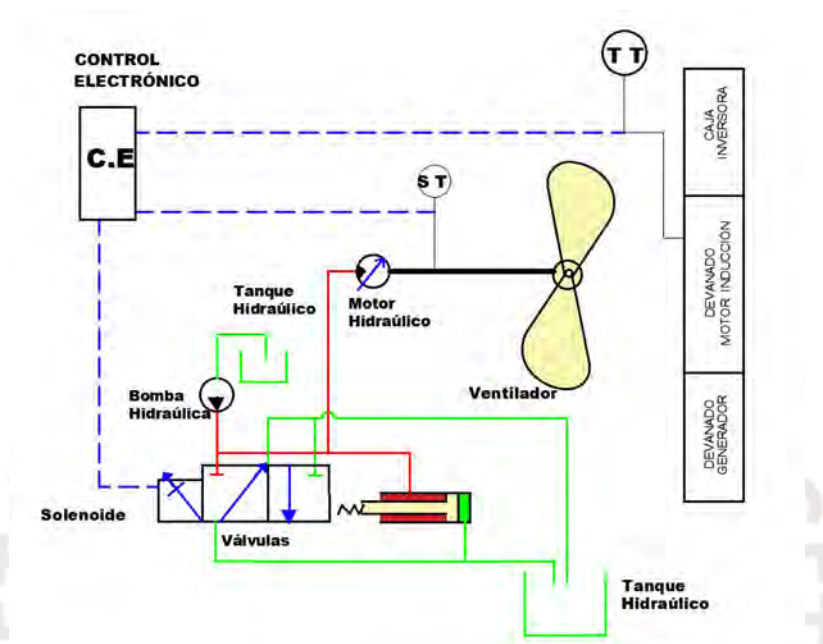


Figura 2. Diagrama de Bloques Sistema de Enfriamiento de Tren de Propulsión Eléctrico

2.5. Propuesta de solución.

Se plantea bajar la potencia del motor diésel de los 4000 Hp originales hasta los 3700 HP, pero dado que a raíz de este cambio las temperaturas de los devanados internos de los motores de tracción se elevan, se propone encontrar un algoritmo de control que sea capaz de mantener los motores de tracción AC a una temperatura de trabajo óptima ($< 215^{\circ}\text{C}$) bajo la potencia de motor reducida; para ello se buscará identificar un modelo experimental que describa el comportamiento de temperatura de los motores de tracción para que en base a ello ser capaz de diseñar el algoritmo de control requerido haciendo uso de los recursos que nos brinda la teoría de control y las herramientas de simulación.

2.6. Alcance de la Investigación

La presente investigación busca llegar hasta la simulación del sistema con un control optimizado luego de haber realizado por un lado por la identificación del modelo matemático de calentamiento de los motores de tracción y por el otro habiendo diseñado un algoritmo de control capaz de permitir el desempeño del sistema en condiciones de potencia reducida.



Capítulo III Marco Teórico

En el presente capítulo se detallan los conceptos más relevantes relacionados con la teoría a aplicar en el desarrollo de la presente tesis los cuales son:

3.1 Identificación de Sistemas

Son técnicas que permiten encontrar modelos matemáticos capaces de representar aceptablemente el comportamiento de un sistema dinámico basándose en la información medida de este. La Figura 3 muestra una secuencia de pasos planteada por (Andersson, et al.,1993) para modelado e identificación de sistemas; donde se puede apreciar que el proceso de identificación es iterativo teniendo que eventualmente regresar a repetir pasos anteriores; tener en cuenta que el orden de los bloques no representa una secuencia cronológica, pero si la influencia de uno a otro.

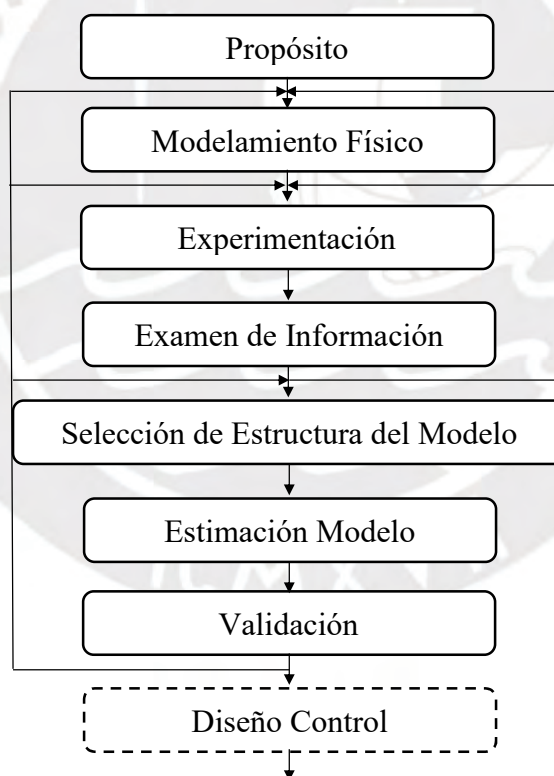


Figura 3. Algoritmo para Modelado e Identificación de Sistemas.

Tomado de “A Manual For System Identification”, por Anderson,R et al, 1993.

(<http://archive.control.lth.se/media/Education/EngineeringProgram/FRT041/2011/manuallab.pdf>).

A continuación, algunos conceptos básicos relacionados a la identificación de sistemas.

3.1.1 Modelo Matemático

Según (Ljung, 1987) un modelo matemático es una representación simplificada de un sistema físico real, capaz de capturar los aspectos más relevantes del mismo, como se muestra en la Figura 4 por un lado, determina las entradas, salidas y las perturbaciones a las que está sometido y por otro lado determina su comportamiento dinámico, pues la salida del sistema depende tanto de sus entradas como sus salidas presentes y pasadas. Según la aplicación dicha representación luego resulta muy útil para predecir o estimar comportamiento futuro, definir el momento adecuado de mantenimiento asegurando desempeño y seguridad, y para el caso de la presente investigación para diseñar y simular su sistema de control. (Matlab, 2022).

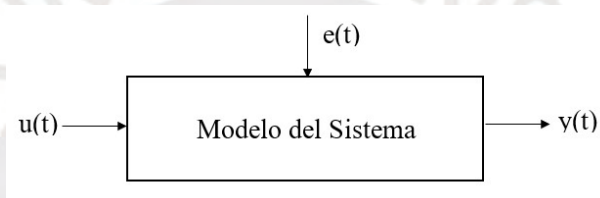


Figura 4. Señales de entrada, salida y perturbaciones del proceso

Los modelos lineales son los más utilizados, debido a: (1) la facilidad para entender la dinámica del sistema y verificar su estabilidad; (2) la disponibilidad de un gran número de herramientas para el diseño de controladores; y (3) acelerar el proceso de simulación (Matlab, 2022). Para utilizar un modelo como lineal se aplica el principio de superposición, el cual establece que la respuesta del sistema ante la aplicación simultánea de dos entradas diferentes es igual a la suma de las respuestas individuales; así como la invariabilidad en el tiempo implica que estos sistemas puedan ser representados por ecuaciones diferenciales de coeficientes constantes.

Los sistemas físicos generalmente presentan comportamientos no lineales, pero cuando la operación normal del sistema ocurre alrededor de un punto de equilibrio donde la variación de las señales involucradas puede considerarse pequeña alrededor de dicho punto es posible aproximar un modelo linealizado invariante en el tiempo (Ogata, 2010).

Un modelo en general está compuesto por una estructura y unos parámetros; donde la identificación pasará por definir una estructura para el modelo para luego ajustar los parámetros de dicha estructura hasta que la señal de salida real coincida lo suficiente con la salida medida. (Ljung, 1987).

Las estructuras de modelo más conocidas abarcan:

Funciones de Transferencia. - Utilizada ampliamente para la representación del comportamiento dinámico de procesos industriales en términos de Transformadas de Laplace permitiendo convertir ecuaciones diferenciales en ecuaciones polinómicas pudiendo ser normalizadas en algunos términos característicos como son la ganancia estática, las constantes de tiempo y el retardo tal como se muestra en la ecuación 1; es decir se presentan en la forma de polos y ceros donde los polos se relacionan con la salida y los ceros con la entrada.

$$P(s) = Ke^{-T_d s} \frac{1 + T_z s}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)}$$

Donde:

K = Ganancia estática.

T_{p1}, T_{p2} = Constantes de Tiempo

T_d = Retardo

(1)

Ecuaciones en Diferencia. - Como los modelos ARX con sus variantes conocidas como Output-Error (OE), ARMAX, FIR y Box-Jenkins (BJ) cuya representación se muestra en la ecuación 2.

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - n_k) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (2)$$

Donde $y(t)$ & $u(t)$ son las secuencias de salida y entrada, y $e(t)$ es la secuencia de ruido blanco con valor promedio 0. La definición de los polinomios A, B, C, D, F se muestra en la ecuación 3.

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + a_{nb} q^{-nb+1}$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{nd}q^{-nd}$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-n} \quad (3)$$

Las Representaciones en Espacio Estado. - Describen la misma relación lineal entre las entradas y las salidas, pero se encuentra reacomodada de manera que un solo retardo es utilizado en la expresión, para lograrlo se introducen algunas variables adicionales denominadas variables de estado, representadas en la ecuación 4.

$$x(t + 1) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + v(t) \quad (4)$$

Donde: $x(t)$ es el vector de las variables de estado.
 $y(t)$ es el vector de salida.
 $u(t)$ es el vector de entrada.
 $e(t)$ es el vector de error.
 $v(t)$ es el vector de error de medición.

Dependiendo si están disponibles los principios físicos de funcionamiento del sistema; es posible que las técnicas de modelamiento llamadas Caja Blanca puedan partir de allí; y de manera opuesta las técnicas de Caja Negra como las de identificación de sistemas no disponen de dicho conocimiento inicial; en un punto intermedio se encuentran las técnicas de Caja Gris.

Para validar un modelo se requiere verificar la precisión comparando la salida del modelo ajustado contra la salida real del proceso.

Los cálculos para hallar el modelo linealizado se harán a través del aplicativo de Identificación de Sistemas de Matlab, el mismo que nos permite asignar los datos de entrada y salida del modelo que queremos hallar como se observa en el lado izquierdo de la pantalla de dicho aplicativo mostrado de la Figura 5, cuyo detalle se muestra en la Figura 6, para luego proceder a calcular el modelo utilizando las diferentes estructuras disponibles obteniendo el nivel de ajuste tanto con la información utilizada para hallar el modelo como se muestra en la Figura 7 como con otros tramos de información como parte del proceso de validación tal como se muestra en la Figura 8.

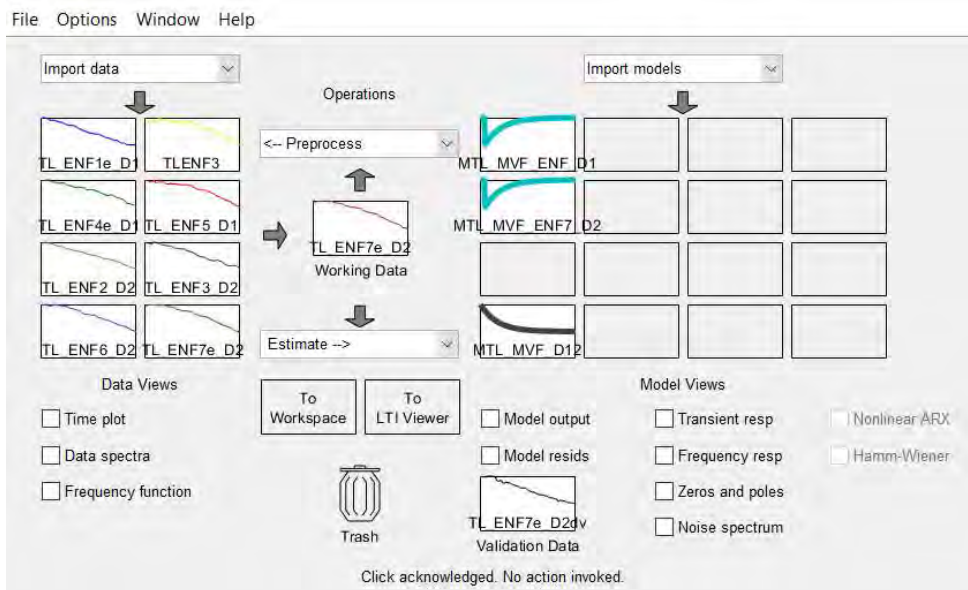


Figura 5. Pantalla principal aplicativo Identificación de Sistemas de Matlab.

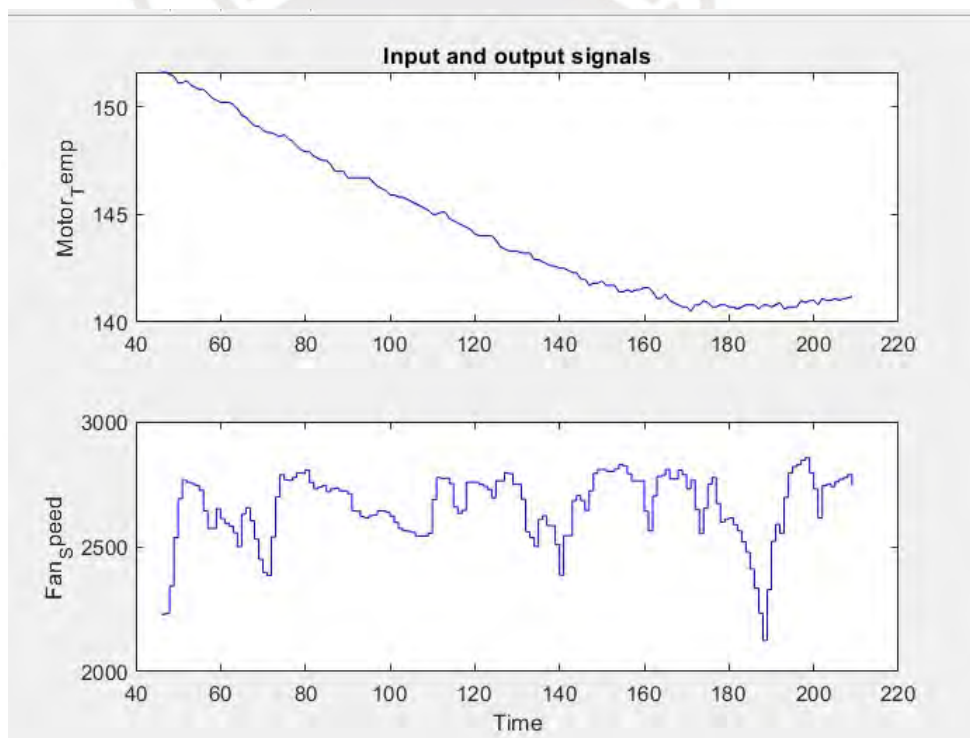


Figura 6. Visualización de información de entrada y salida para cálculo del modelo.

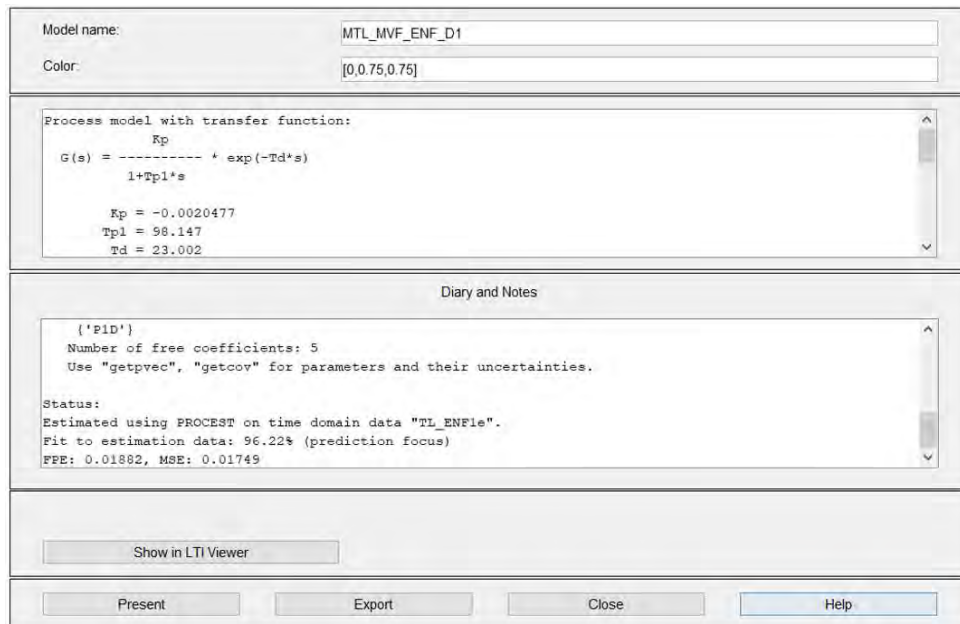


Figura 7. Informe de cálculo de modelo incluido nivel de ajuste.

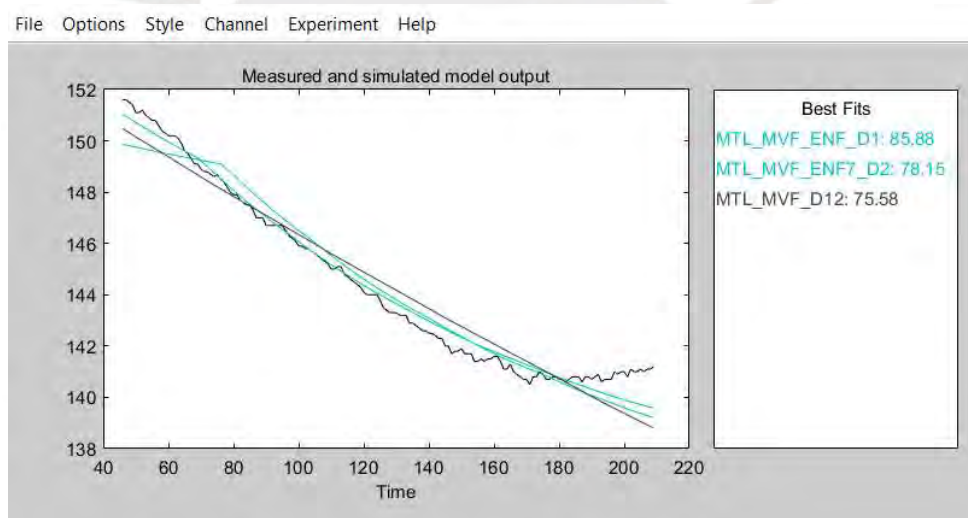


Figura 8. Ventana de Validación de Modelos Calculados

3.2 Sistemas de Control.

A continuación, algunas definiciones básicas relacionadas a los sistemas de control.

3.2.1 Sistema de Control Retroalimentado. -

También llamado de **Sistema de Control de Lazo Cerrado**, es aquel que está constituido por un conjunto de elementos que buscan reducir la diferencia entre la salida o respuesta y alguna señal deseada o de referencia, tomando dicha diferencia para realizar la

operación de control; como se observa en la Figura 9, siempre están presentes los siguientes elementos (Ogata, 2010):

Planta. - La cual puede ser parte de un equipo, es decir un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos y cuyo objetivo es efectuar una operación determinada. Es decir, se trata del objeto físico que se va a controlar; para el caso particular del presente trabajo la planta será el **Devanado del Motor de Tracción Eléctrico** de inducción.

Actuador. - Es el componente físico que recibe la señal de Manipulación del Controlador, encargado de ejecutar la acción o acciones para influir sobre la planta; en el caso particular de esta investigación estará constituido por el **Conjunto del Solenoide, Motor Hidráulico y Ventilador**. Vale la pena mencionar que los actuadores están sometidos a limitaciones físicas, es decir no pueden producir más movimiento más allá de su construcción a lo cual se le conoce como Saturación.

Controlador. - Es aquel que compara el valor real de la **Variable de Salida o de Proceso**, que requiere ser medida mediante un sensor, con la **Variable Deseada o de Referencia**, la diferencia entre ambas llamadas **Error** es utilizada por el algoritmo de control de este para determinar la **Señal de Manipulación** a ser aplicada sobre el Actuador y así alterar la respuesta de la **Variable de Salida** de la planta. En muchos casos, la salida del actuador no es la única variable que tiene un efecto en el sistema pues pueden existir **Perturbaciones** las cuales son variables que tienden a afectar el valor de la salida del sistema. Si dicha perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada. Por lo general, tratamos de diseñar el sistema de control para minimizar el efecto de las perturbaciones en la variable del proceso. (Ogata, 2010).

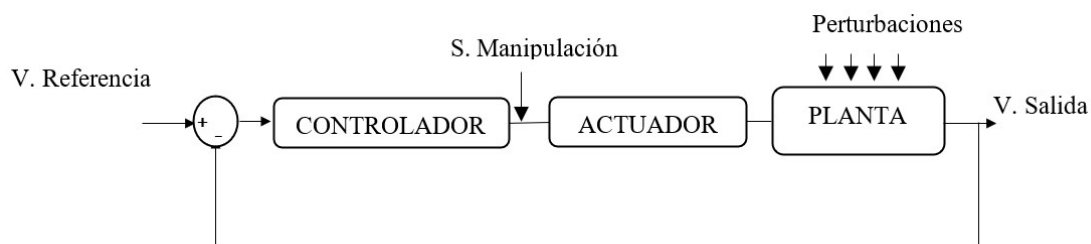


Figura 9. Esquema Sistema de Control Retroalimentado.

Entre los algoritmos de control lineales más conocidos tenemos:

3.2.2 Controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo).

Es el algoritmo de control más utilizado en la industria, situación atribuible por un lado a su buen rendimiento en una amplia variedad de aplicaciones y por el otro a su simplicidad funcional. Como su nombre lo indica el controlador PID consta de tres acciones de control básicas los cuales son: Proporcional, Integral y Derivativa. La ecuación 5 muestra el modelo matemático que representa a este controlador.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Por lo que sus representaciones clásicas en forma de función de transferencia luego de tomar la transformada de Laplace serán:

La ecuación 6 representa la estructura ideal:

$$C_i = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (6)$$

La ecuación 7 representa la estructura paralela:

$$C_p = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (7)$$

Donde sus componentes están indicados en la ecuación 8:

$$P = K_p \quad I = \frac{K_p}{T_i} \quad D = K_p T_d \quad (8)$$

Según Escobar & Barrero (2014), para la implementación de este algoritmo de control es importante tener en cuenta algunas estrategias de mejora de desempeño del controlador PID:

Con relación a la Acción Derivativa.- Esta se ve afectada por las oscilaciones del ruido generado por los sensores de medición de la señal a controlar, por lo que se hace necesario incluir en el algoritmo PID un filtro pasabajo por lo menos de primer orden mostrado en la ecuación 9, donde la constante del filtro N se elige de manera que elimine el ruido afectando la respuesta de la acción derivativa en el siguiente sentido: a mayor valor de N la acción derivativa se reduce por lo que el controlador será menos sensible a fluctuaciones del error, reduciendo oscilaciones y mejorando la estabilidad; a menor valor de aumenta la acción derivativa y por ende el controlador es más sensible a cambios rápidos del error, resultando en una respuesta más rápida pero con oscilaciones.

Por lo que la ecuación del filtro será

$$\frac{1}{\frac{T_d}{N}s + 1} \quad (9)$$

Resultando la función de transferencia del controlador PID mostrada en la ecuación 10.

$$C_{PID}(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\frac{T_d}{N} s + 1} \right]$$

$$C_{PID}(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{T_d}{N} s} \quad (10)$$

Con relación a la Acción Integral. - Esta se ve afectada por los cambios en la referencia pues la parte integral comienza a actuar mientras el error continúa haciendo que el termino integral se vuelva muy grande causando que el actuador se sature y no pueda responder a la señal de control a este fenómeno se le conoce como Windup. Para ello se recurre a diversos métodos que cual busca evitar que la acción de control siga incrementando cuando el sistema se encuentra en los límites de saturación del actuador pues ello puede llevar a un gran sobre impulso en la respuesta una vez que la saturación se libera, entre las técnicas Anti-Windup podemos mencionar según Rodríguez y Cote (2019).

Método de Recalculo (Back – Calculation). - El cual tiene como principio básico el ajuste o recalculo del término integral a través de un lazo de retroalimentación que mide la diferencia entre la salida del actuador y la acción de control, evitando que se supere el límite de saturación del actuador; teniendo la ventaja de que los cambios en la integral no son abruptos cuando se presenta saturación.

Método de Saturación de Integral (Camplng). - Consiste en detener la acumulación del error en el integrador cuando se cumplen ciertas condiciones definidas por el diseñador adoptando alguno de los siguientes enfoques: detener la acumulación del error en el integrador cuando la salida del controlador está saturada o detener la acumulación del integrador cuando supere algunos límites.

Método de Reinicio de la Integral. - Consiste en reiniciar el valor de la integral del error a un valor definido, cuando se alcancen ciertas condiciones. Esta metodología ajusta los parámetros del controlador PID para limitar el incremento del término integral durante la saturación; a continuación, en la Figura 10 se muestra el esquema de un controlador PID mostrando mejoras tanto en la acción derivativa (filtros) y en la acción integral (anti-windup).

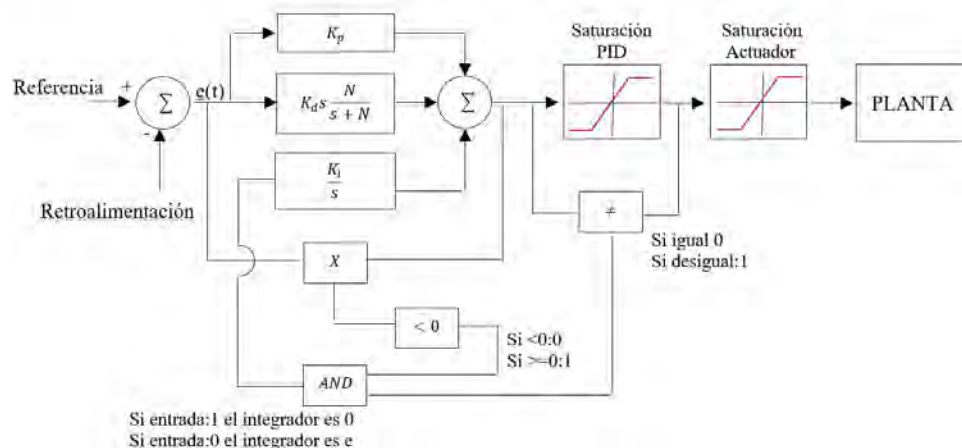


Figura 10. PID con Filtro Derivativo y Anti-Windup

3.2.3 Sintonización de Controladores PID.

La sintonización es el proceso de hallar las ganancias del controlador PID que permita lograr un comportamiento óptimo del sistema, existen métodos tanto manuales como

automáticos para lograrlo; entre los métodos manuales clásicos más conocidos se encuentran los planteados por Ziegler Nichols. El primer método se basa en las características del proceso en lazo abierto es decir la respuesta del sistema a una entrada escalón, especialmente cuando esta se presenta de una manera monótona, creciente y estable; también conocida como respuesta sobreamortiguada, en ese sentido toma que el sistema es de primer orden con retardo puro donde los tres parámetros a determinar son; ganancia en estado estacionario, constante tiempo y el retardo. Por otro lado, el segundo método o de lazo cerrado también conocido como oscilaciones sostenidas, busca determinar las características dinámicas del sistema a partir de su respuesta en frecuencia el cual consiste en ir incrementando la ganancia hasta obtener una respuesta con oscilaciones sostenidas, lo cual nos permitirá determinar la ganancia crítica y el periodo de oscilación mantenida. Una vez obtenidos dichos valores ya sea a partir del método en lazo abierto o el de lazo cerrado será posible para hallar los valores de sintonización del PID tal como lo indica la Tabla 1 de Dormido & Morilla, 2014:

Controlador	Parámetros	Lazo Abierto	Lazo Cerrado
PID	K_p	$1.2 \frac{T}{KL}$	$0.6k_{cu}$
	T_i	$2L$	$\frac{t_{cu}}{2}$
	T_d	$0.5L$	$\frac{t_{cu}}{8}$
Donde:	$K_p =$ Ganancia proporcional $T_i =$ Tiempo integral $T_d =$ Tiempo derivativo	$K =$ Ganancia estacionaria $T =$ Constante de tiempo. $L =$ Tiempo de retardo	$k_{cu} =$ Ganancia crítica $t_{cu} =$ Periodo con oscilacion sostenida

Tabla 1. Factores de Sintonización PID mediante Ziegler Nichols

3.2.4 Indicadores de Respuesta de Controladores en el Dominio del Tiempo

Normalmente las características deseadas de desempeño de un sistema de control se especifican en base a indicadores en el dominio del tiempo dado que los sistemas por su

capacidad de almacenar energía no responden instantáneamente y presentan respuestas transitorias cada vez que están sujetos a entradas o perturbaciones. En ese sentido dichas características de desempeño en el tiempo se expresan en términos de respuesta al escalón unitario, puesto que esta señal es fácil de generar. Para describir las características de respuesta transitoria de un sistema de control para una entrada escalón podemos hacerlo términos de los siguientes indicadores mostrados en la Figura 11:

Tiempo de Retardo t_d . - Equivalente al tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final.

Tiempo de Subida t_r . - Equivalente al tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final. Para sistemas subamortiguados de segundo orden por lo general se usa el tiempo de 0 a 100%, mientras que para sistemas sobre amortiguados suele usarse del 10% al 90%,

Tiempo de Pico t_p . - Es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico.

Porcentaje de Sobre impulso Máximo M_p . - Es el máximo valor de pico de la curva de respuesta medido a partir de la unidad.

Tiempo de Asentamiento t_s . - Es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (entre 2 a 5 %).

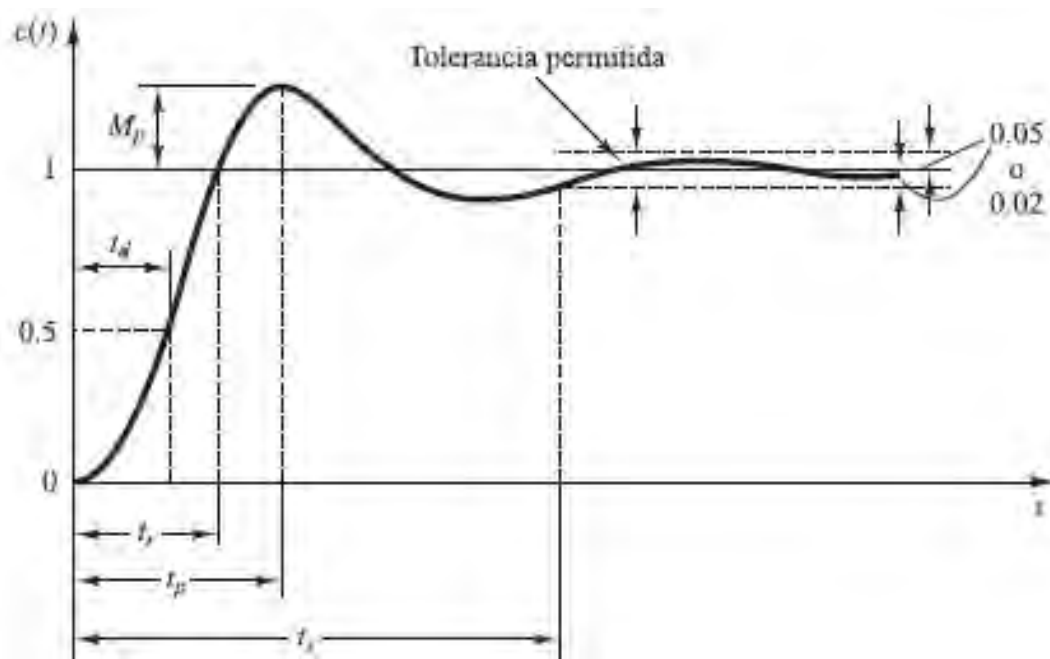


Figura 11. Indicadores de respuesta de sistemas en el tiempo.

3.2.5 Esquema de Control en Cascada

El control en cascada mostrado en la Figura 12 implica el uso de dos lazos de control. Este esquema proporciona una respuesta mejorada a las ganancias no lineales y perturbaciones del sistema. Según (Castaño, 2020) este esquema se puede utilizar cuando:

- El proceso por controlar posee varias partes o etapas.
- Se tiene puntos de medida intermedios dentro del proceso.
- Hay la posibilidad de actuar en forma de cascada, es decir que tenga mallas de control dentro de otra malla de control.

La dinámica de la variable principal a ser controlada es mucho más lenta que la dinámica de la variable intermediaria. Pues si la dinámica interna es más lenta, no se tiene ningún beneficio al realimentar esa malla interna pues a la salida del proceso no tendremos una respuesta de la dinámica externa beneficiosa desde el punto de vista de control. A continuación, se muestra el esquema de control en cascada:

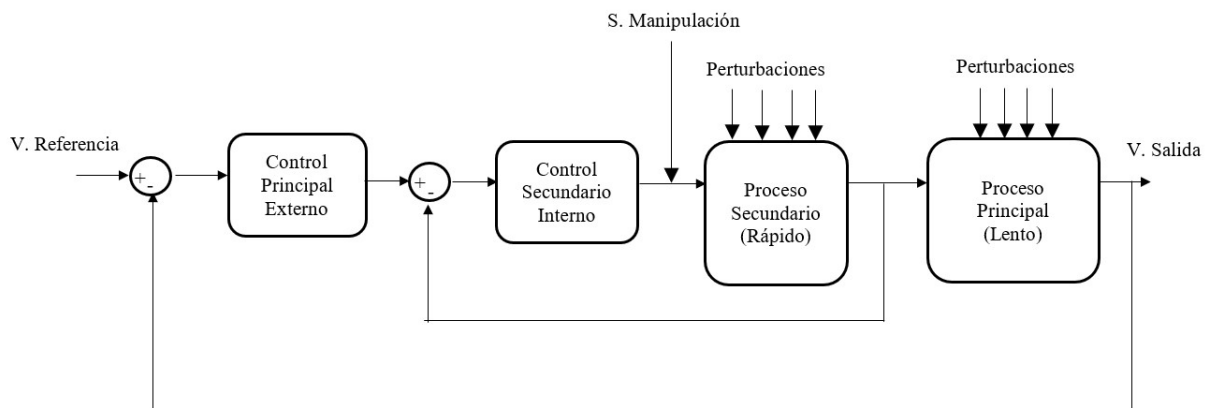


Figura 12. Esquema de Control en Cascada.

3.2.6 Control de Ganancia Programada (Gain Scheduling). -

Consiste en un esquema de control de sistemas no lineales utilizando una familia de controladores lineales, cada uno de los cuales proporciona un control satisfactorio para un punto operativo diferente del sistema. El control de ganancia programada generalmente se implementa utilizando un controlador cuyas ganancias se ajustan automáticamente en función de las variables de programación que describen el punto de operación actual. Dichas variables pueden incluir tiempo, condiciones operativas externas o estados del sistema como orientación o velocidad (Matlab, 2024).

Como este controlador utiliza varios controladores lineales para controlar un sistema no lineal es necesario entender cómo se construye una familia de modelos lineales a partir de un sistema no lineal trabajando con la linealización alrededor de diferentes puntos de equilibrio (Rugh & Shamma, 2000).

Para ello considere la planta no lineal descrita en la ecuación 11.

$$\dot{x} = a(x, u, w, v) \quad z = c_1(x, u, w, v) \quad y = c_2(x, w, v) \quad (11)$$

Donde x es el estado, u es la entrada, z denota una señal de error a ser controlada, finalmente y denota la salida medida disponible para el controlador. Tanto w y v denotan entradas exógenas a la planta. La señal w captura la dependencia paramétrica de una variable exógenas, mientras que la señal v representa funciones de entrada externa como señales de referencia, perturbaciones y ruido. Es importante mencionar que la ecuación 11 será linealizada con respecto a v y no con respecto a w . La metodología clásica es la obtenida a partir de la linealización jacobiana.

Donde x_e, u_e, w_e, v_e son puntos de equilibrio y

$x_e(\sigma), u_e(\sigma), w_e(\sigma), v_e(\sigma)$ son las familias de equilibrio de modo que se cumpla la ecuación 12.

$$a(x_e(\sigma), u_e(\sigma), w_e(\sigma), v_e(\sigma)) = 0 \quad (12)$$

Para obtener una familia de linealización de la planta se deberá construir la matriz de la ecuación 13.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_\delta \\ z_\delta \\ y_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(\sigma) & B_1(\sigma) & B_2(\sigma) \\ C_1(\sigma) & D_{11}(\sigma) & D_{12}(\sigma) \\ C_2(\sigma) & D_{21}(\sigma) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\delta \\ v_\delta \\ u_\delta \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde, por ejemplo:

$$A(\sigma) = \frac{\partial a}{\partial x}(x_e(\sigma), u_e(\sigma), w_e(\sigma), v_e(\sigma))$$

$$D_{12}(\sigma) = \frac{\partial c_1}{\partial u}(x_e(\sigma), u_e(\sigma), w_e(\sigma), v_e(\sigma))$$

Donde las variables de desviación en encuentran en la ecuación 14.

$$x_\delta(t) = x(t) - x_e(\sigma) \quad u_\delta(t) = u(t) - u_e(\sigma) \quad (14)$$

Los sistemas de control de ganancia programada a menudo se diseñan eligiendo un conjunto de puntos operativos, y diseñando un controlador lineal adecuado para cada punto. En funcionamiento, el sistema conmuta o interpola entre estos controladores según los valores actuales de las variables de programación; la ganancia programada es más adecuada cuando las variables de cambio son parámetros externos que varían lentamente en comparación con el ancho de banda de control. Debido a que el desempeño lineal local cerca de los puntos operativos no es garantía del desempeño global en sistemas no lineales, se requiere una validación exhaustiva basada en simulación.

Los pasos por seguir para diseñar un sistema de control de ganancia programada son:

(a) Un rango operativo, definido como un conjunto de rangos dentro de los cuales los valores de los parámetros relevantes del sistema permanecen durante el funcionamiento. (b) Algunas variables medibles que indican en qué parte del rango operativo se encuentra el sistema en un momento dado. La ganancia programada comprende las fórmulas o tablas de datos que devuelven las ganancias apropiadas del controlador para valores dados de las variables de programación (Matlab,2024).

3.3 Resumen del Capítulo.

Este capítulo nos presenta teoría relacionada a Modelamiento e Identificación de Sistemas indicándonos los diferentes modelos matemáticos utilizados para representar sistemas dinámicos; para luego brindarnos información relacionada a Sistemas de Control, indicando como es que se estructuran, como es que se mide su desempeño, así como la sintonización o diseño del controlador, para finalmente poder simular su comportamiento valiéndonos del software Matlab - Simulink.

Capítulo IV Modelamiento del Sistema

En el presente capítulo se detalla el proceso de modelamiento del sistema de enfriamiento del tren de propulsión con motores eléctricos de tracción para un camión de acarreo de 372 toneladas, el mismo que se realizará utilizando información operacional recurriendo a la metodología de Identificación de Sistemas valiéndonos de Matlab como herramienta de cálculo.

4.1 Examen de Información.

Antes de iniciar cualquier nivel de análisis y desarrollo debemos entender como está constituido el sistema y representarlo en diagrama de bloques para así poder representarlo matemáticamente en términos de funciones de transferencia. En ese sentido se tienen los dos bloques mostrados en la Figura 13, los cuales son:

Actuador. - El cual está constituido por un solenoide, un motor hidráulico y un ventilador, dicho conjunto recibe una señal de entrada de corriente que varía entre 0.2 y 0.6 amperios (amp), lo cual resulta en una salida de velocidad de ventilador con una relación inversa entre 3800 y 1225 revoluciones por minuto (rpm).

Planta. - La cual corresponde al devanado de motor de tracción AC, dicho motor recibe como entrada un flujo de aire proporcional a las revoluciones por minuto entre 1225 y 3800 rpm generadas por el ventilador lo cual produce una salida de temperatura en grados centígrados entre 105 y 215 grados centígrados.

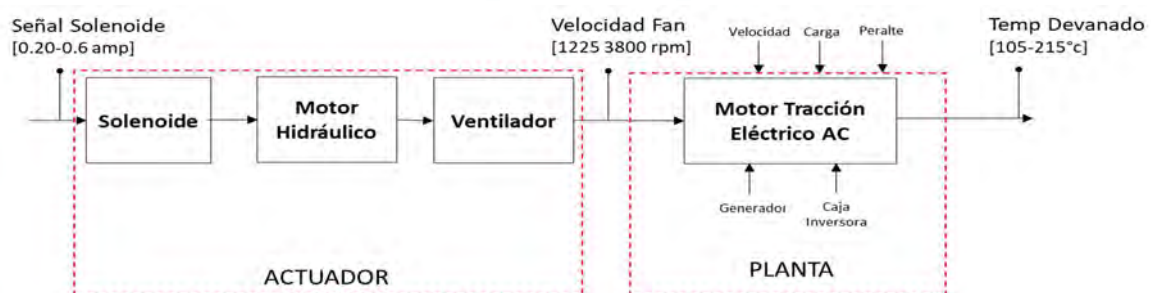


Figura 13. Diagrama de Bloques de Planta y Actuador a Modelar.

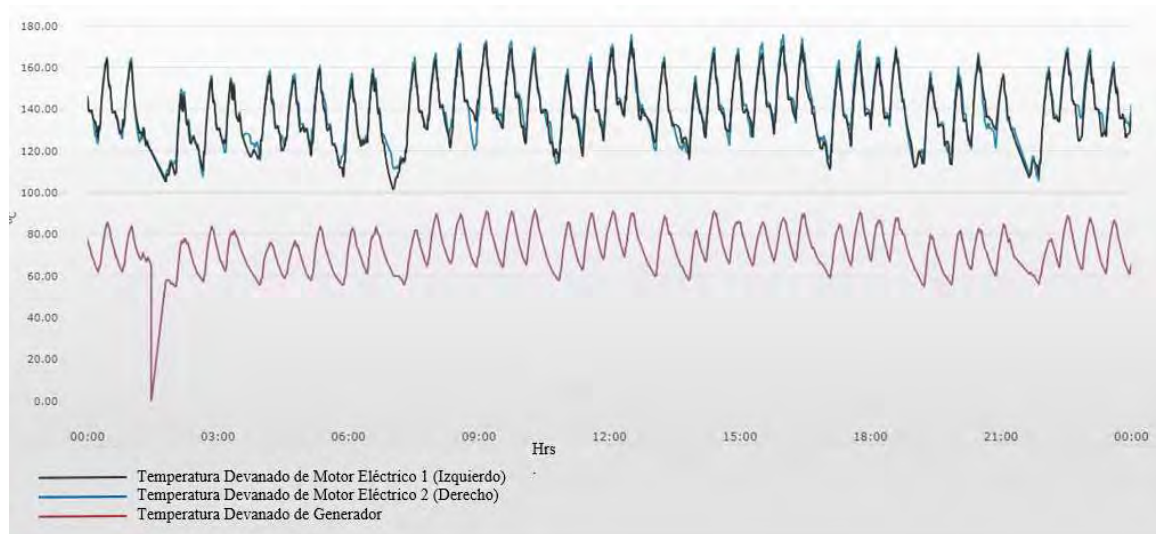


Figura 14. Temperaturas del Devanado de Motores Eléctricos y del Generador

Vale la pena considerar tal como se muestra en Figura 14, por un lado, tanto el motor eléctrico de tracción derecho como el izquierdo presentan temperaturas similares y por el otro lado, la temperatura del devanado del generador siempre se mantiene aproximadamente a la mitad de temperatura de los motores por lo que el trabajo de modelamiento y diseño estará enfocado en un solo motor de tracción.

Otra consideración a tomar en cuenta es que el sistema presenta ciclos que involucran un tramo de calentamiento y otro de enfriamiento; donde además dentro de cada ciclo el equipo trabaja bajo diferentes modos de operación, por lo que para efectos del modelamiento tomaremos el registro de las variables de entrada (corriente del solenoide, velocidad del ventilador) y salida (velocidad del ventilador, temperatura de devanado del motor) considerando los siguientes modos de operación: a) Viajando cargado, b) Viajando vacío, c) Detenido cargado o vacío y d) Bajando vacío; durante el tramo de enfriamiento de cada ciclo, tal como se aprecia en la Figura 15 y la Figura 16.

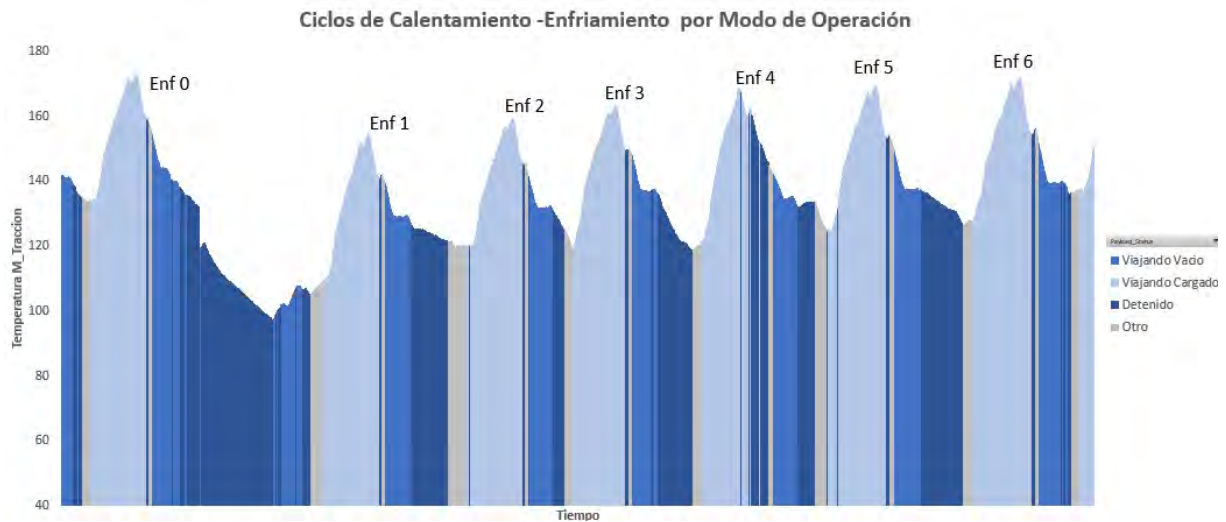


Figura 15. Ciclos de Calentamiento-Enfriamiento por Modo de Trabajo.

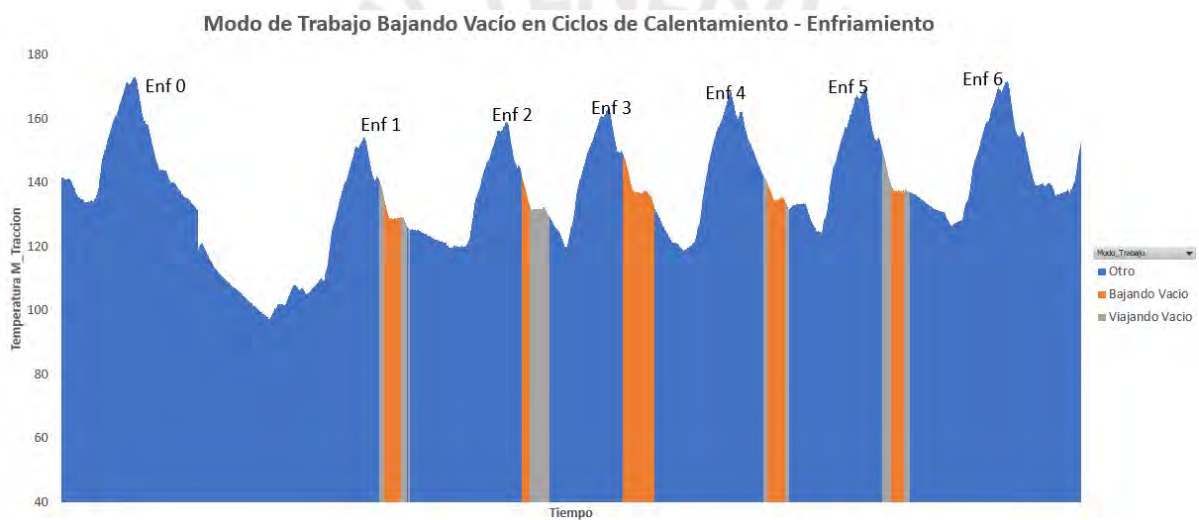


Figura 16. Ciclos de Enfriamiento Trabajando Vacío

A continuación, se resume la configuración y operación del sistema (ver Tabla 2).

	Modelo1: Actuador	Modelo2: Planta
	Solenoide+ Motor Hidráulico + Ventilador	Devanado Motor Eléctrico de Tracción
Variable Entrada	Corriente del Solenoide 0.2 - 0.6 amp	Velocidad del Ventilador 3800-1225 rpm
Variable Salida	Velocidad del Ventilador 1225-3800 rpm	Temperatura de Devanado 105-215°C
Perburbaciones	Velocidad del Motor	Variación de Velocidad, Carga y Peralte
Modos de Trabajo	Viajando Cargado	
	Equipo desplazándose con su carga nominal (alrededor de 400 ton)	
	Viajando Vacio	
	Equipo desplazándose sin carga.	
	Bajando Vacio	
	Equipo desplazándose sin carga pero en bajada.	
	Detenido Cargado / Vacio	
	El equipo se encuentra detenido independientemente si se encuentra cargado o vacío.	

Tabla 2. Resumen de Variables y Modos de Trabajo para Modelamiento.

4.2 Modelamiento Físico

Los motores eléctricos de tracción bajo estudio son de inducción con conexión trifásica; los mismos que están formados por dos armaduras metálicas: una fija (estator) y la otra móvil (rotor); donde para transformar la energía mecánica en eléctrica se genera un campo electromagnético giratorio. Así pues, es nuestro interés entender y modelar el comportamiento térmico de este sistema. Según Murillo (2015) existen hasta 5 estrategias para modelar el comportamiento térmico del motor siendo una de ellas la de un modelo de primer orden; modelo que según Gao (2006), es rápido y eficiente, presentando una buena estimación de la temperatura requiriendo solamente la corriente estática. Según Zocholl (2004) dicho modelo posee una estructura mostrada en la ecuación 15.

$$\theta = I^2 R R_{th} \left(1 - e^{\frac{-t}{R_{th} C_{th}}} \right) + \theta_A \quad (15)$$

Donde θ y θ_A son las temperaturas internas y la ambiental respectivamente, el termino $I^2 R$ representa la totalidad de pérdidas del motor, R_{th} representa una resistencia térmica equivalente y C_{th} representa la capacitancia térmica del motor.

Esta ecuación diferencial es posible representarla mediante una función de transferencia de primer orden, por lo que dicha estructura se utilizará para representar el comportamiento de del sistema.

A continuación, las especificaciones técnicas del fabricante:

- Peso: 4100 Kg (9039 lbs)
- Potencia Nominal en Propulsión: 1206 Kw
- Potencia Nominal en Retardo: 2430 Kw.
- Torque Máximo: 35523 Nm (26200 Lb-Ft).
- Velocidad Máxima de Trabajo: 3180 rpm.
- Voltaje a Plena carga: 1960V en propulsión y 2060V en retardo.
- Corriente Máxima: 1300Amp.

4.3 Experimentación.

En esta etapa se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- Operar la maquina por 2 días.
- Trabajar con la configuración de potencia del motor de combustión reducida de 4000 a 3700 Hp.
- Dividir el trabajo de la maquina en ciclos de calentamiento y enfriamiento; habiendo tomado 6 ciclos en el día 1 (Figura 17); y 7 ciclos en el día 2 (Figura 18).
- Dividir el trabajo de la maquina bajo diversos modos de operación, los cuales son: Viajando Cargado, Viajando Vacío, Detenido (Cargado o Vacío) y Bajando Vacío,
- En cada ciclo y modo de trabajo se tomaron los siguientes parámetros:
- Solenoide del actuador (amp), Velocidad del Ventilador (rpm), Temperatura de Motor de Tracción (°c), Estado Carguío, Altura GPS.
- Se tomo un valor por segundo de cada parámetro.

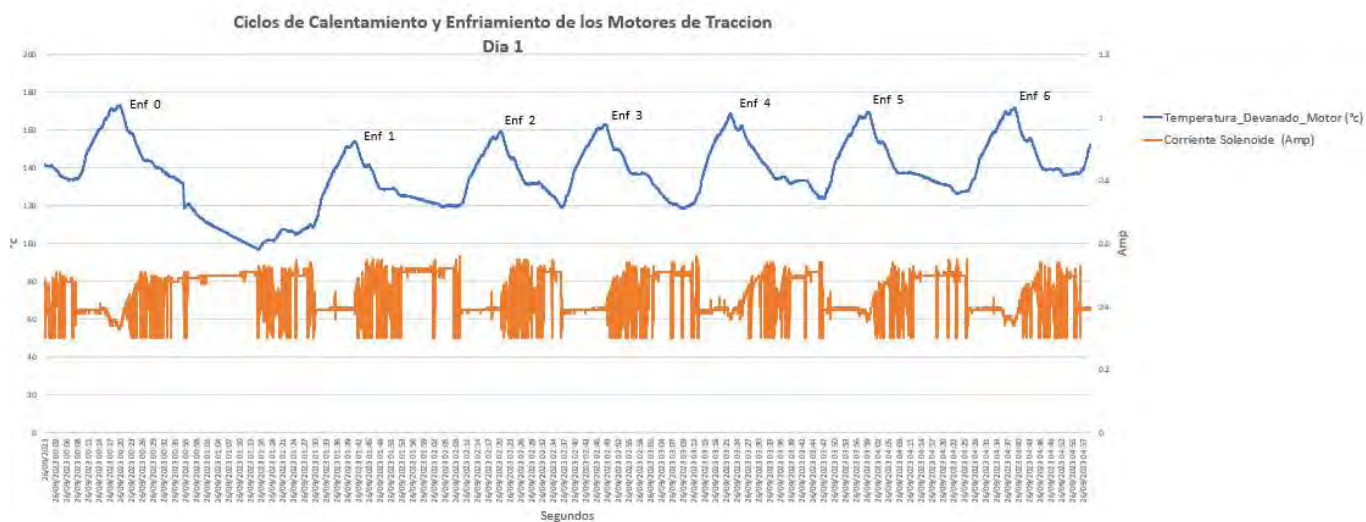


Figura 17. Ciclos de Calentamiento-Enfriamiento de Motor Día 1.

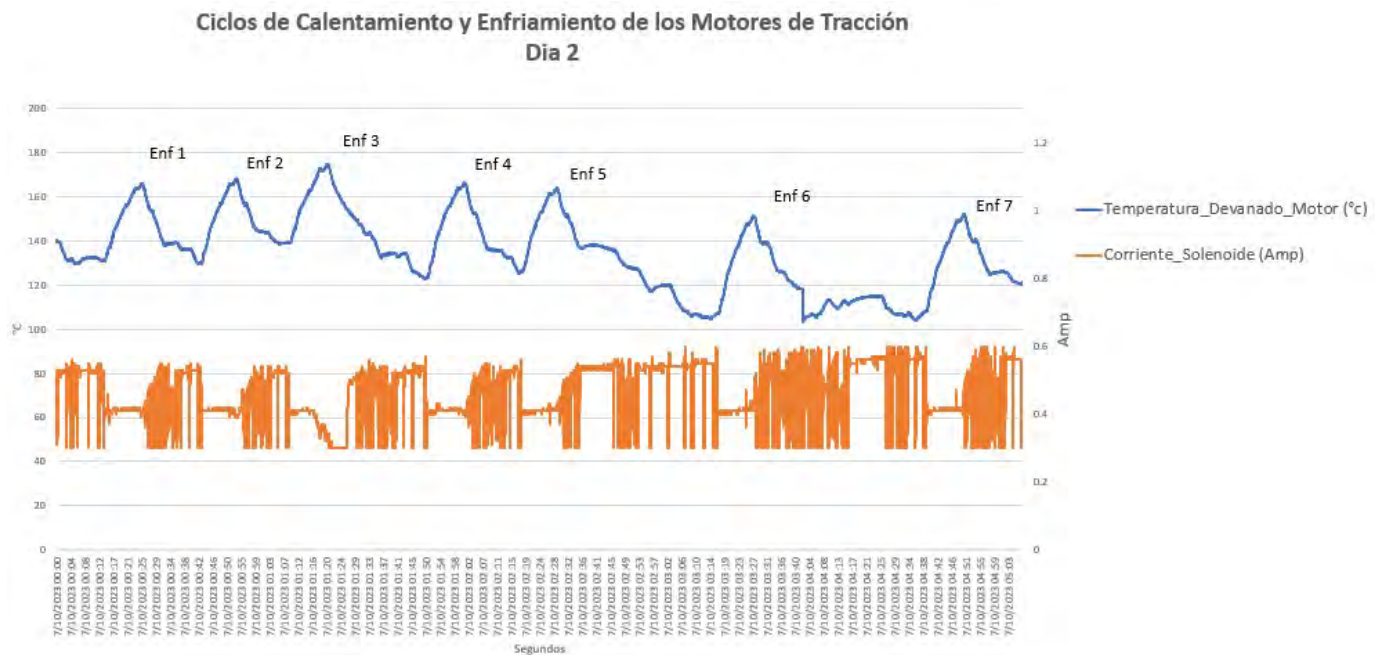


Figura 18. Ciclos de Calentamiento-Enfriamiento de motor Día 2.

4.4 Selección de la Estructura.

Dado que en la sección 4.2 se pudo determinar que la estructura de 1er orden describe adecuadamente el comportamiento del sistema se procedió a elegir el modelo de proceso mostrado en la ecuación 16.

$$P(s) = Ke^{-T_d s} \frac{1}{(1+T_{p1}s)} \quad (16)$$

Donde:

K = Ganancia estática.

T_{p1} = Constantes de Tiempo

T_d = Retardo

4.5 Estimación de Modelos

Para el cálculo de cada modelo a través del aplicativo de Identificación de Sistemas de Matlab se utilizó el comando “procest”; el cual utiliza un método de estimación iterativo que minimiza los errores de predicción para así obtener estimados de máxima verisimilitud. Se realizó tres cálculos para cada modelo por modo de operación; los dos primeros modelos fueron obtenidos para los días de trabajo 1 y 2; y el tercer modelo calculado resultó de la combinación

de la información de entrada de los dos primeros días tal como se muestra en la Figura 19.



Figura 19. Pantalla Principal para el Cálculo de los Modelos de Planta y/o Actuador.

Para cada uno de los modelos se encontró el porcentaje de ajuste primero con el mismo tramo de enfriamiento utilizado para su generación; para luego proceder con la validación utilizando tramos de enfriamiento diferentes; en ambos casos los tramos de enfriamiento corresponden a las pruebas del día 1 y 2. A continuación, se muestra la información detallada del cálculo de los modelos tanto de Planta como de Actuador para los cuatro modos de trabajo mediante Matlab.

4.5.1 Estimación de Modelo de Planta en Modo Viajando Cargado

En la Figura 20 se muestran los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como información de entrada para el cálculo de los modelos de Planta obtenidos en modo Viajando Cargado.

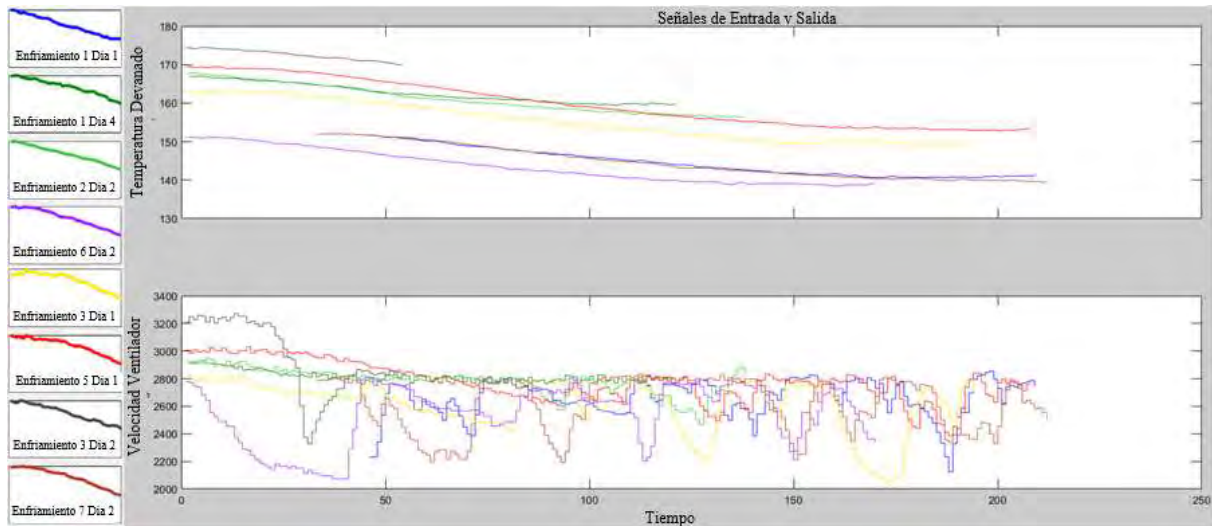


Figura 20. Información de Entrada para Modelos de Planta Viajando Cargado.

A continuación, en la Figura 21 se muestran los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como para el día 2 así como su combinación 1 y 2; donde se observa que se cuenta con funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su misma información de estimación; los cuales se encuentran alrededor de 96%.

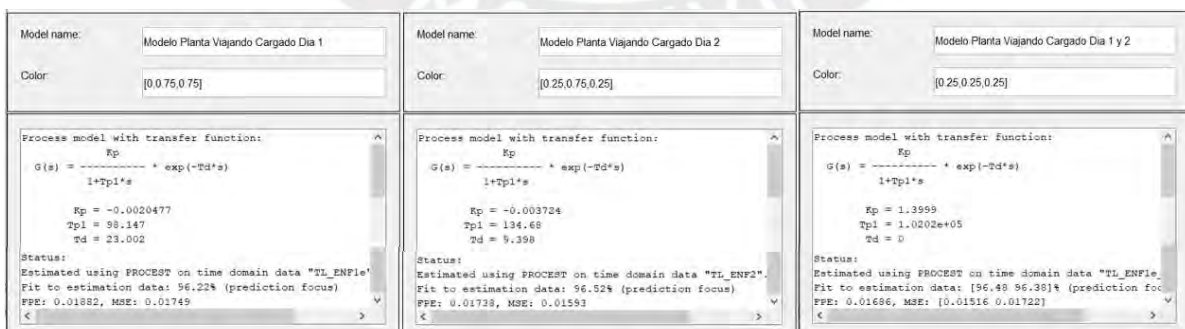


Figura 21. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Viajando Cargado.

En la Figura 22 se muestra una comparación gráfica de las respuestas de la Planta en el modo de trabajo Viajando Cargado; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

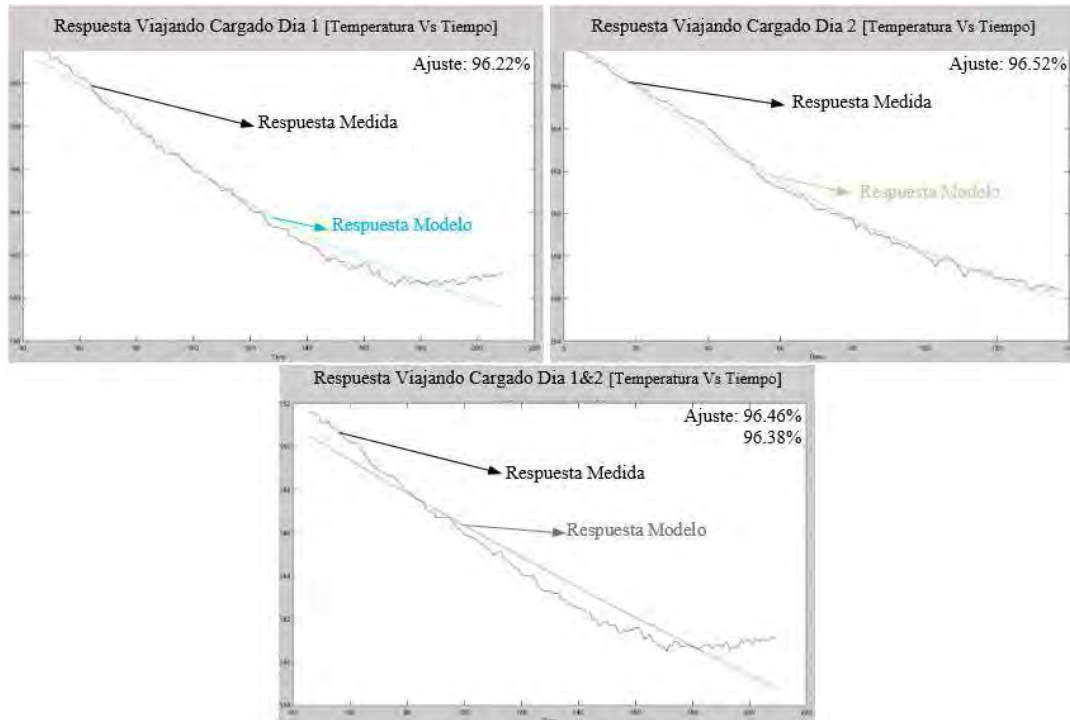


Figura 22. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Cargado.

4.5.2 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Cargado

En la

Figura 23 se muestra la asignación de los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como entrada para el cálculo de los modelos del Actuador obtenidos en modo Viajando Cargado.

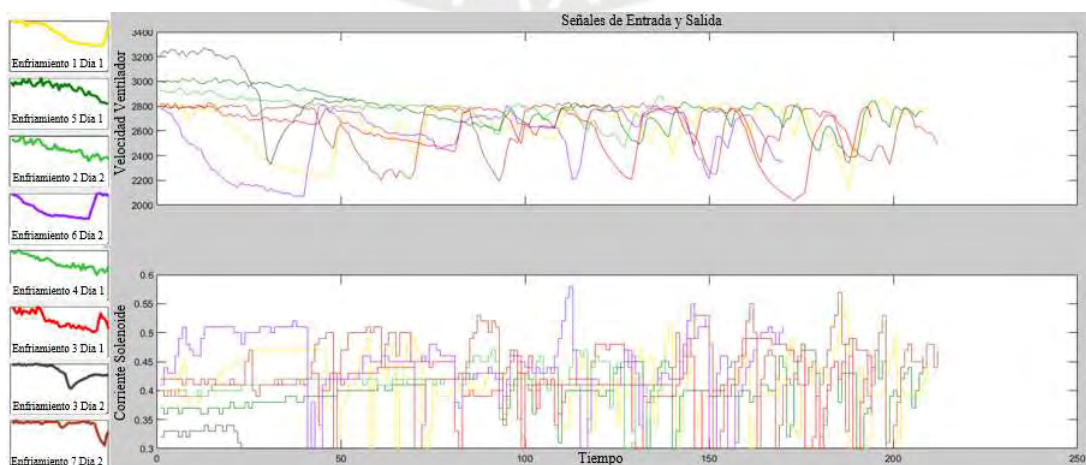


Figura 23. Información de Entrada para Modelos de Actuador Viajando Cargado

A continuación, en la Figura 24 muestra el detalle de los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como el día 2 así como la combinación de estos días 1 y 2; donde se observa que se obtuvo funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su propia información de estimación; los cuales varían entre 76% y 86%.

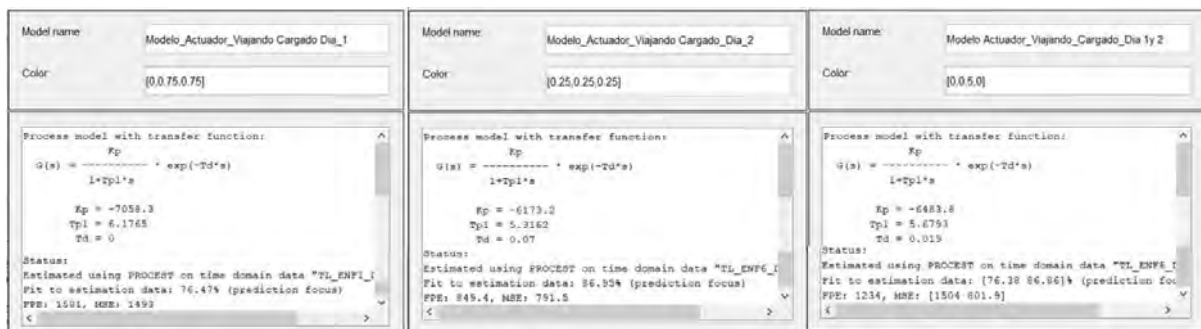


Figura 24. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Viajando Cargado

En la Figura 25 se muestra una comparación gráfica de las respuestas del Actuador en el modo de trabajo Viajando Cargado; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

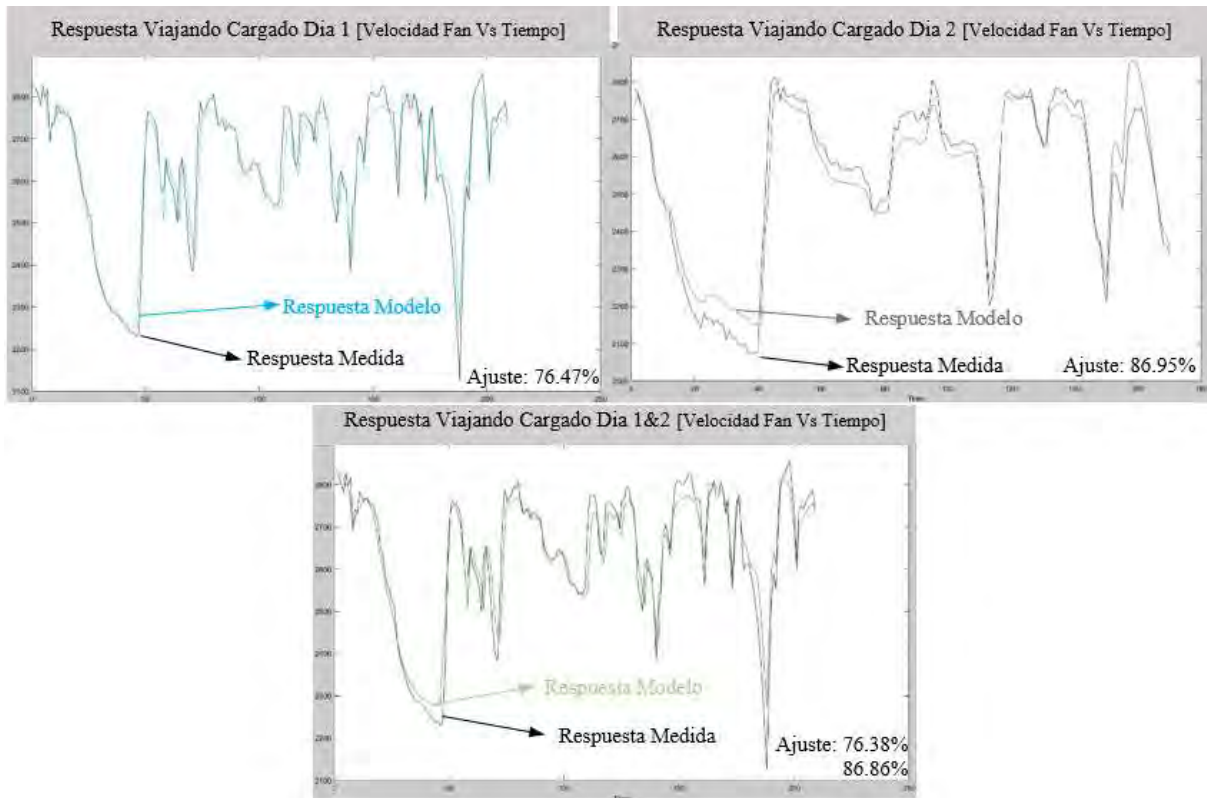


Figura 25. Respuestas de Actuador Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Cargado.

A continuación, se resume los diferentes modelos tanto para la Planta como el Actuador en modo Viajando Cargado, detallando los parámetros de la función de transferencia de primer orden K y T_{p1} con retardo T_d además del porcentaje de ajuste de cada modelo con relación a su propia información de estimación (Ver Tabla 3).

Modelos en Modo de Trabajo VIAJANDO CARGADO (En Enfriamiento)					
$P(s) = Ke^{-T_d s} \frac{1}{(1 + T_{p1}s)}$					
Modelo	Ciclo_Enfriamiento	K	Tp1	Td	Ajuste
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 1 Dia 1	-0.00205	98.147	23.00	96.20%
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 2 Dia 2	-0.00372	134.680	9.40	96.52%
Temp_Vs_FanSpeed	Combinado Dia 1 & Dia 2	1.39900	102020.000	0.00	96.48% 96.38%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 1 Dia 1	-7058.30	6.177	0.00	76.47%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 6 Dia 2	-6173.00	5.316	0.07	86.95%
FanSpeed Vs Solenoid	Combinado Dia 1 & Dia 2	-6483.80	5.679	0.02	76.38% 86.86%

Tabla 3. Modelos de Planta y Actuador en Modo Viajando Cargado.

El modelo de planta (Temp_Vs_FanSpeed) obtenido mediante la combinación de información del día1 & día2 es bastante distinto a los modelos separados obtenidos tanto del día 1 como del día 2 debido al valor de ganancia, tiempo y retardo tan disimiles; en la etapa de validación de modelos se verificará si requieren ser descartados.

4.5.3 Estimación de Modelo de Planta en Modo Viajando Vacío

En la Figura 26 se muestran los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como información de entrada para el cálculo de los modelos de Planta obtenidos en modo Viajando Vacío.

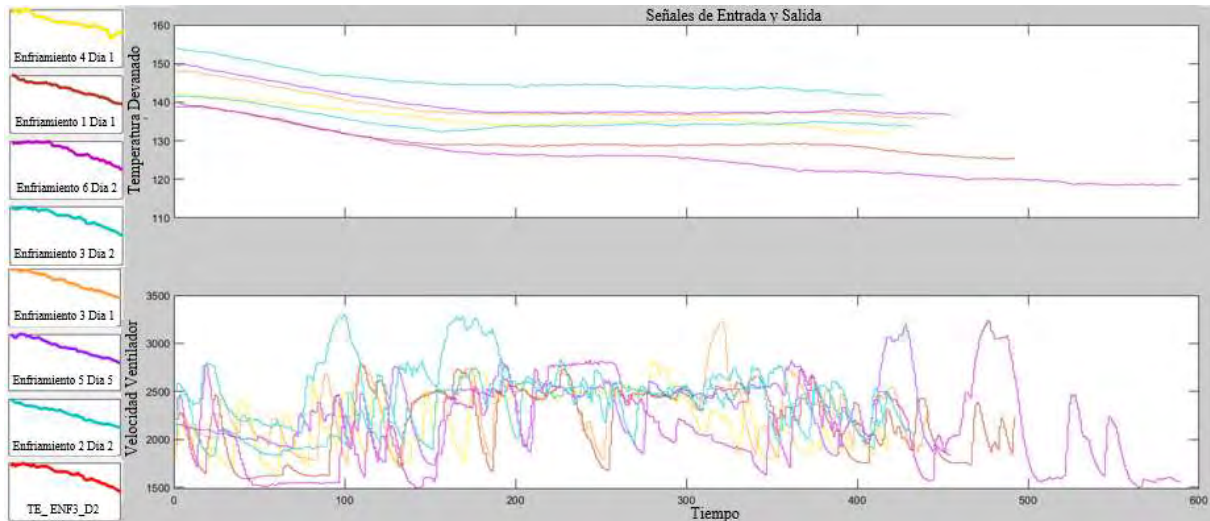


Figura 26. Información de Entrada para Modelos de Planta Viajando Vacío.

A continuación, en la Figura 27 se muestra los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como para el día 2 así como su combinación 1 y 2; donde se observa que se cuenta con funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su propia información de estimación; los cuales varían entre 68% y 97%.

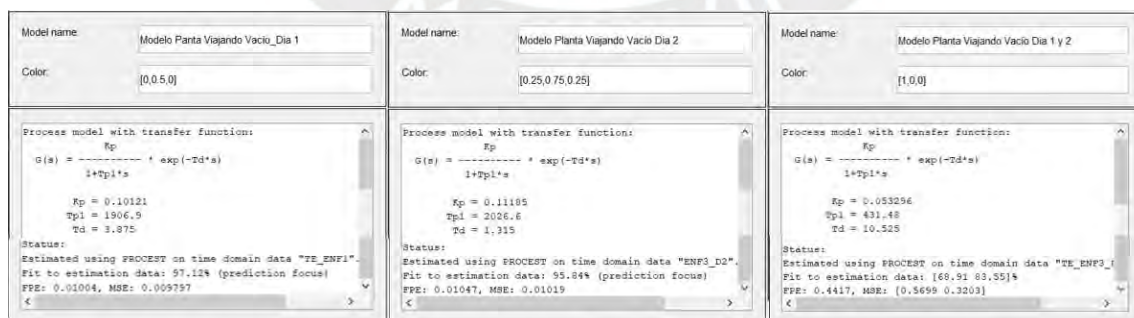


Figura 27. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Viajando Vacío.

En la Figura 28 se muestra una comparación gráfica de las respuestas de la Planta en el modo de trabajo Viajando Vacío; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

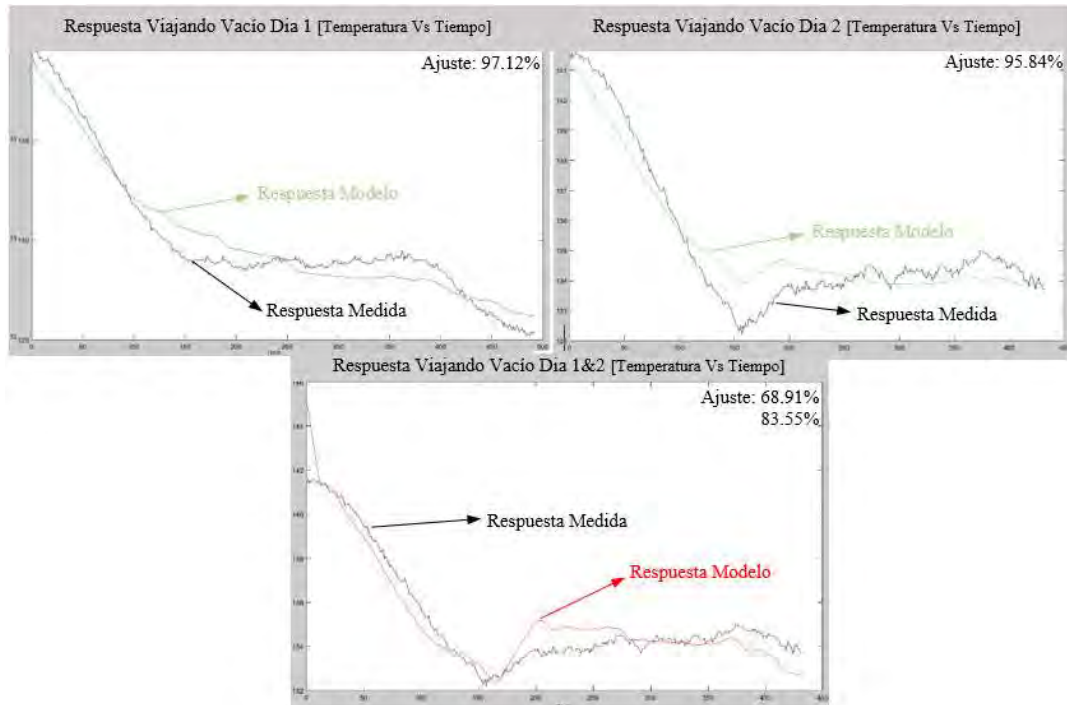


Figura 28. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Vacío.

4.5.4 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Vacío

En la

Figura 29 se muestran los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como información de entrada para el cálculo de los modelos de Actuador obtenidos en modo Viajando Vacío.

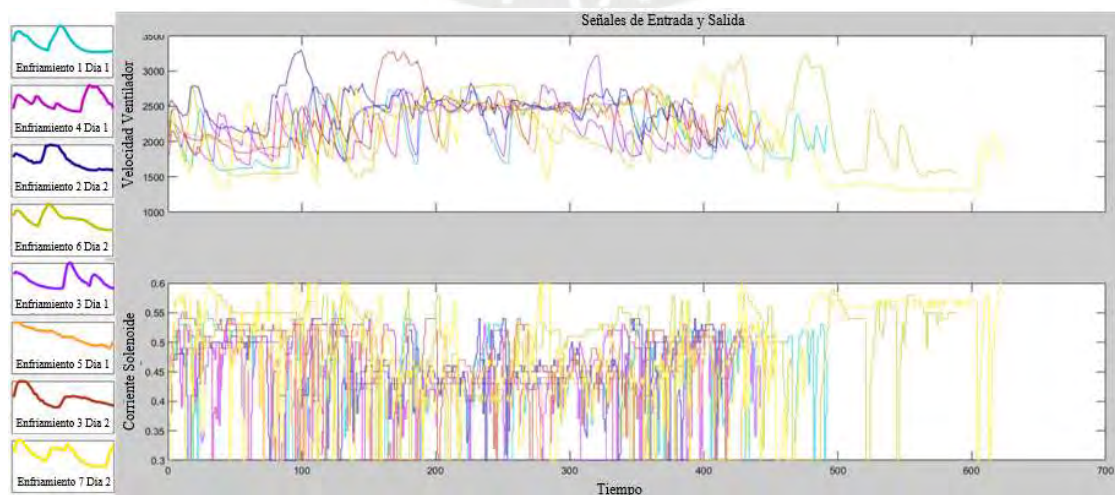


Figura 29. Información de Entrada para Modelos de Actuador Viajando Vacío.

A continuación, en la Figura 30 se muestra el detalle de los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como el día 2 así como la combinación de estos días 1 y 2; donde se observa que se obtuvo funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su propia información de estimación; los cuales varían entre 90% y 91%.

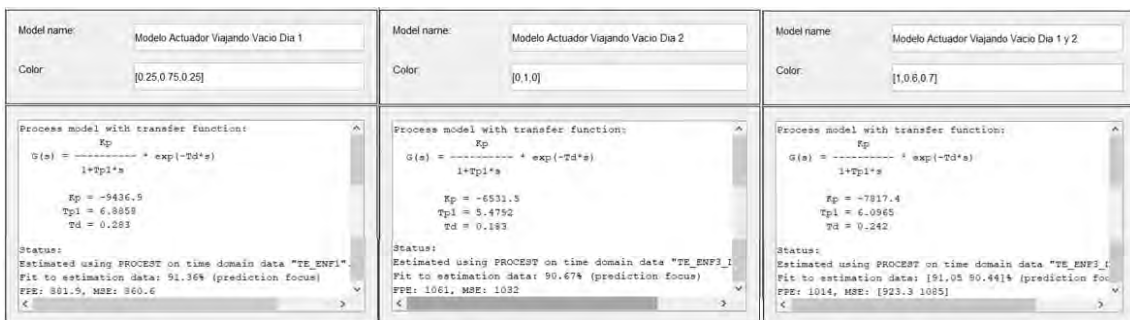


Figura 30. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Viajando Vacío.

En la Figura 31 se muestra una comparación gráfica de las respuestas del Actuador en el modo de trabajo Viajando Vacío; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

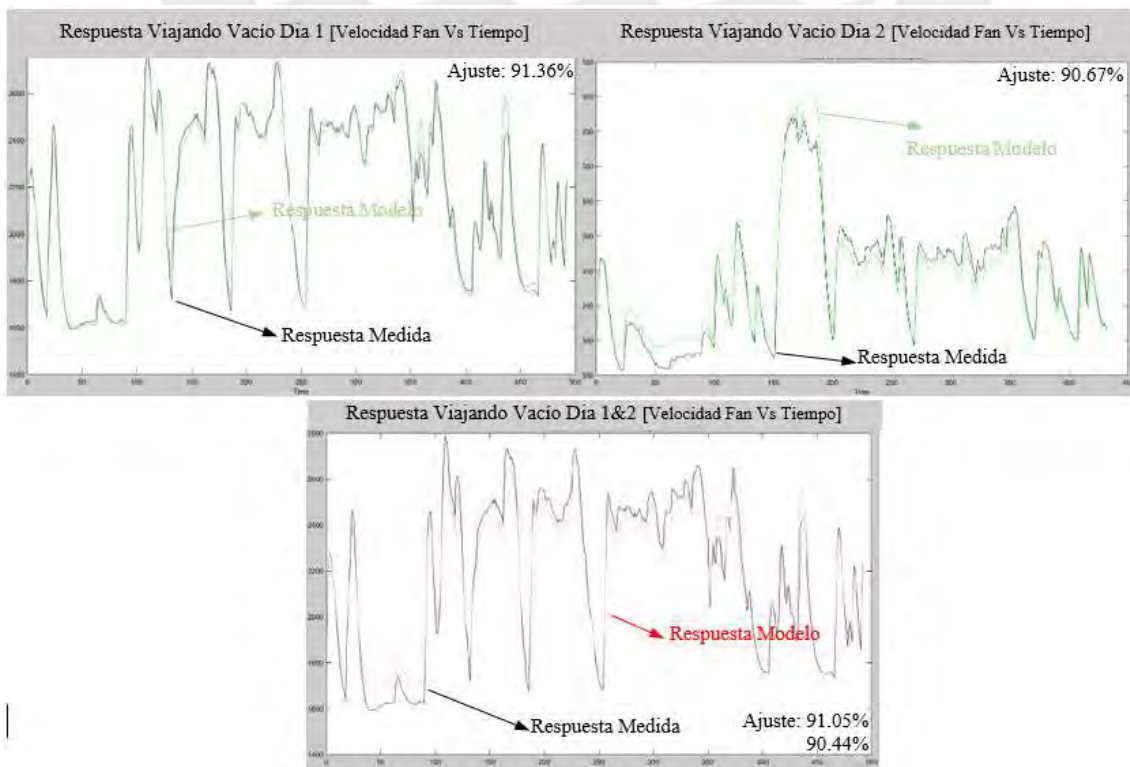


Figura 31. Respuestas de Actuador Medidas Vs Modelos Obtenidos Viajando Vacío.

A continuación, se resume los diferentes modelos tanto para la Planta como el Actuador en modo Viajando Vacío, detallando los parámetros de la función de transferencia de primer orden K y T_{p1} con retardo T_d además del porcentaje de ajuste de cada modelo con relación a su propia información de estimación (Ver Tabla 4).

Modelos en Modo de Trabajo VIAJANDO VACIO					
$P(s) = Ke^{-T_d s} \frac{1}{(1 + T_{p1}s)}$					
Modelo	Ciclo Enfriamiento	K	Tp1	Td	Ajuste
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 1 Dia 1	0.10121	1906.90	3.88	97.12%
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 3 Dia 2	0.11185	2026.60	1.32	95.84%
Temp_Vs_FanSpeed	Combinado Dia 1 & Dia 2	0.053296	431.48	10.53	68.91% 83.55%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 1 Dia 1	-9436.90	6.88580	0.28	91.36%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 3 Dia 2	-6531.50	5.47920	0.18	90.67%
FanSpeed Vs Solenoid	Combinado Dia 1 & Dia 2	-7817.40	6.09650	0.24	91.05% 90.44%

Tabla 4. Modelos de Planta y Actuador en Modo Viajando Vacío.

El modelo de Planta (Temp_Vs_FanSpeed) obtenido mediante la combinación de información del día1 & día2 es bastante distinto a los modelos separados obtenidos tanto del día 1 como del día 2 debido al valor de ganancia, tiempo y retardo tan disimiles; en la etapa de validación de modelos se verificará si requieren ser descartados.

4.5.5 Estimación de Modelo de Planta en Modo Detenido

En la Figura 32 se muestran los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como información de entrada para el cálculo de los modelos de Planta obtenidos en modo Detenido.

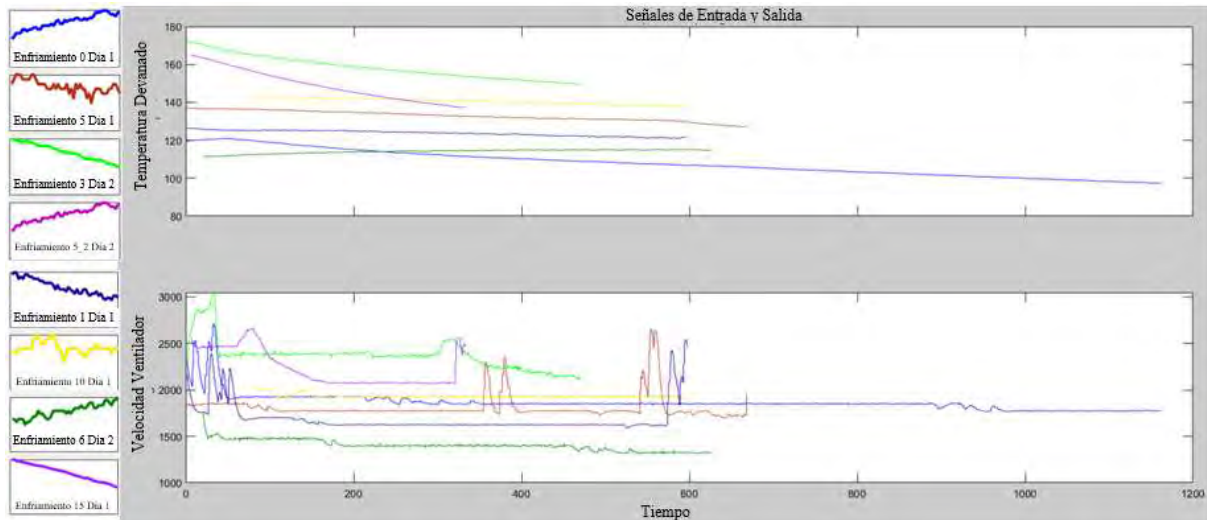


Figura 32. Información de Entrada para Modelos de Planta Modo Detenido.

A continuación, en la Figura 33 se muestra el detalle de los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como el día 2 así como la combinación de estos días 1 y 2; donde se observa que se obtuvo funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su propia información de estimación; los cuales varían entre 91% y 98%.

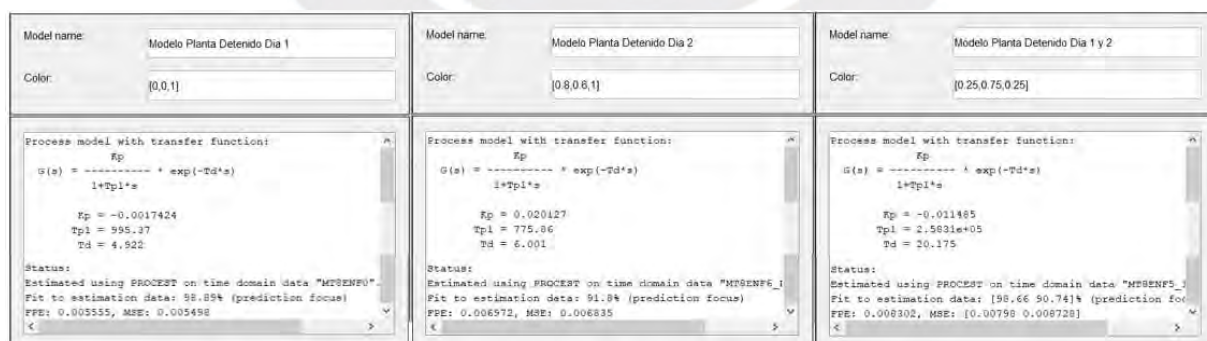


Figura 33. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Modo Detenido.

En la Figura 34 se muestra una comparación gráfica de las respuestas de la Planta en el modo de trabajo Detenido; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

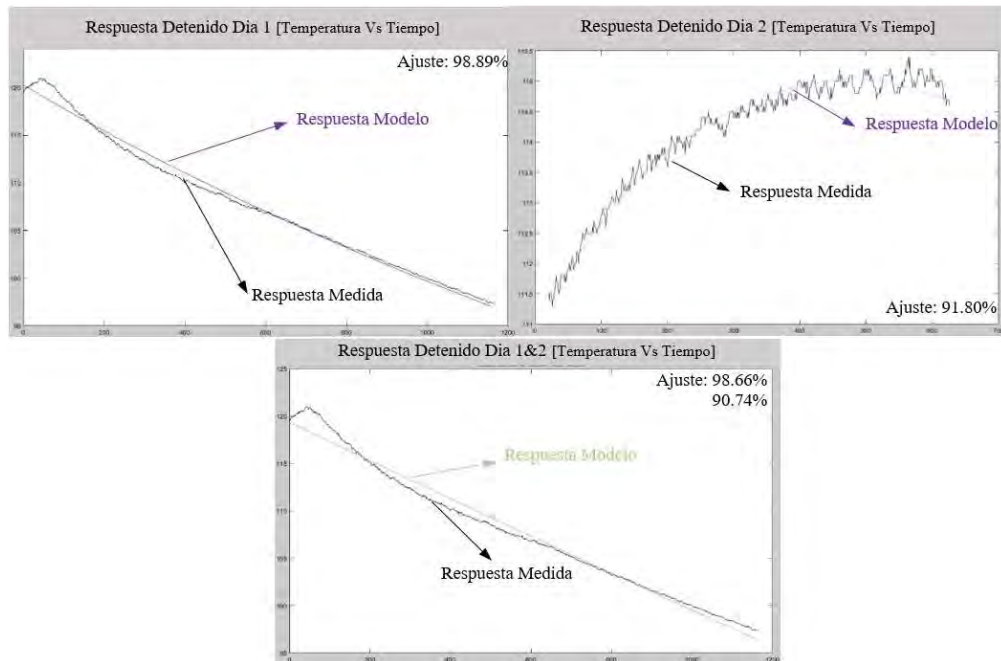


Figura 34. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos en Modo Detenido.

4.5.6 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Detenido

En la Figura 35 se muestran los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como información de entrada para el cálculo de los modelos del Actuador obtenidos en modo Detenido.

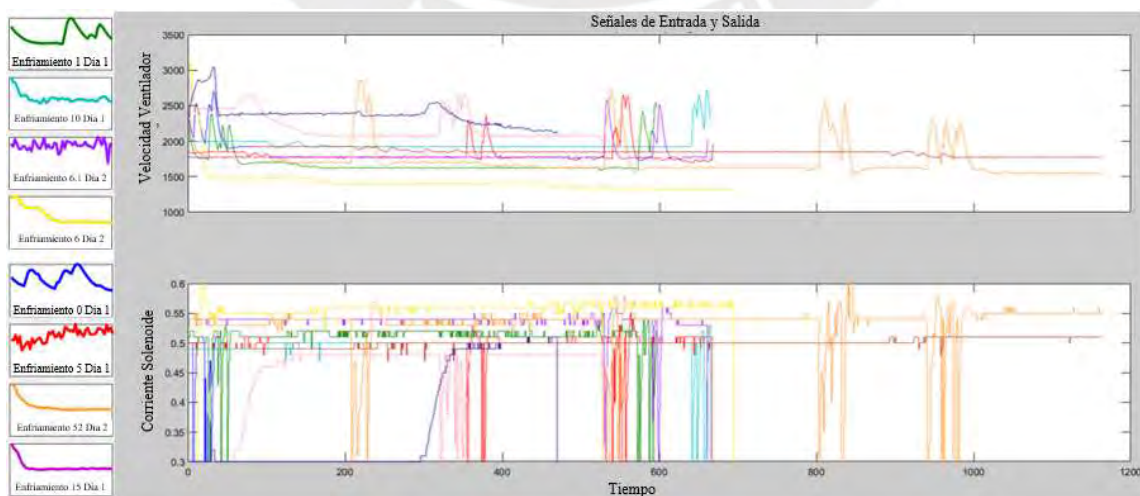


Figura 35. Información de Entrada para Modelos de Actuador Modo Detenido.

A continuación, en la Figura 36 se muestra el detalle de los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como el día 2 así como la combinación de estos días 1 y 2; donde se observa que se obtuvo funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su propia información de estimación; los cuales varían entre 56% y 87%.

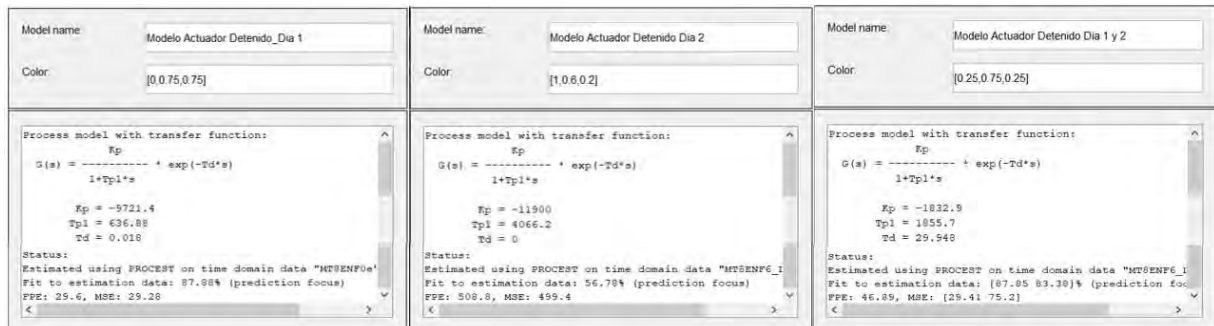


Figura 36. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Modo Detenido.

En la Figura 37 se muestra una comparación gráfica de las respuestas del Actuador en el modo de trabajo Detenido; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

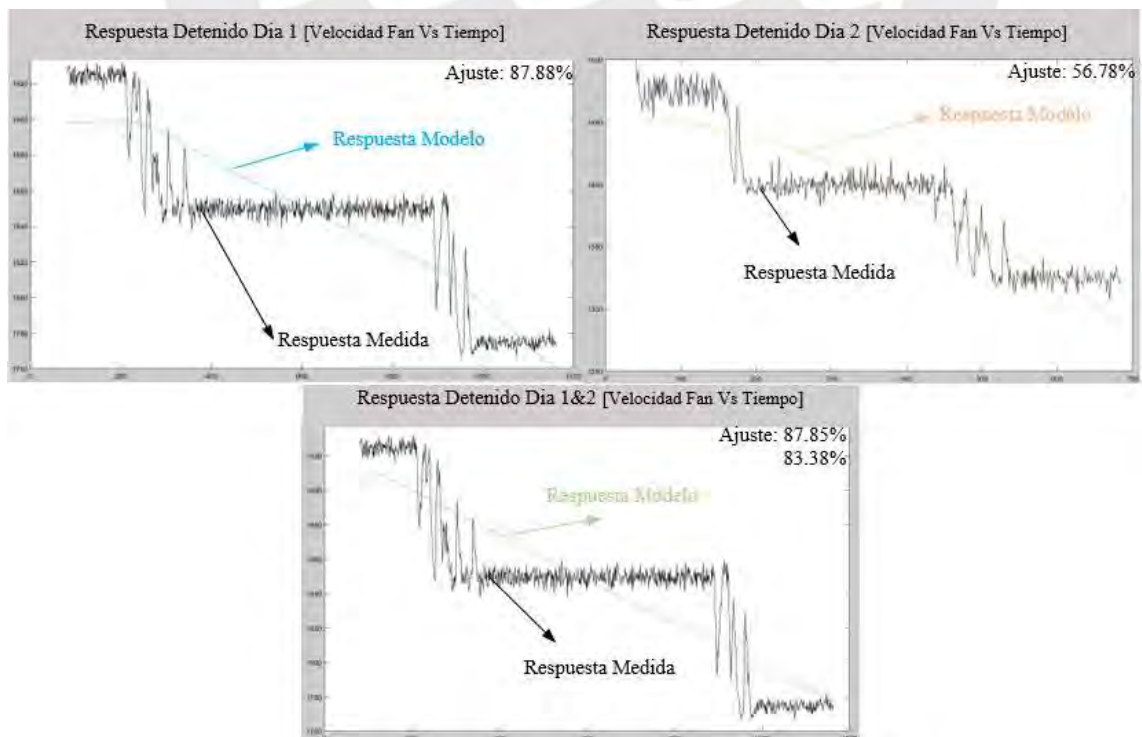


Figura 37. Respuestas de Actuador Medidas Vs Modelos Obtenidos en Modo Detenido.

A continuación, se resume los diferentes modelos tanto para la Planta como el Actuador en modo Detenido, detallando los parámetros de la función de transferencia de primer orden K y T_{p1} con retardo T_d además del porcentaje de ajuste de cada modelo con relación a su propia información de estimación (Ver Tabla 5).

Modelos en Modo de Trabajo DETENIDO CARGADO o VACIO					
$P(s) = Ke^{-T_d s} \frac{1}{(1 + T_{p1} s)}$					
Modelo	Ciclo_Enfriamiento	K	Tp1	Td	Ajuste
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 0 Dia 1	-0.00174	995.370	4.92	98.89%
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 6 Dia 2	0.02013	775.860	6.00	91.80%
Temp_Vs_FanSpeed	Combinado Dia 1 & Dia 2	-0.011485	258310.00	20.18	98.66% 90.74%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 0 Dia 1	-9721.40	636.880	0.02	87.88%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 6 Dia 2	-11900.00	4066.200	0.00	56.76%
FanSpeed Vs Solenoid	Combinado Dia 1 & Dia 2	-1832.90	1855.700	29.95	87.85% 83.38%

Tabla 5. Modelos de Planta y Actuador en Modo Detenido.

El modelo de actuador (FanSpeed Vs Solenoid) obtenido mediante la combinación de información del día1 & día2 es bastante distinto a los modelos separados obtenidos tanto del día 1 como del día 2 debido al valor de ganancia y retardo tan disimiles; en la etapa de validación de modelos se verificará si requieren ser descartados.

4.5.7 Estimación de Modelo de Planta en Modo Bajando Vacío

En la Figura 38 se muestran los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como información de entrada para el cálculo de los modelos de la Planta obtenidos en modo Bajando Vacío.

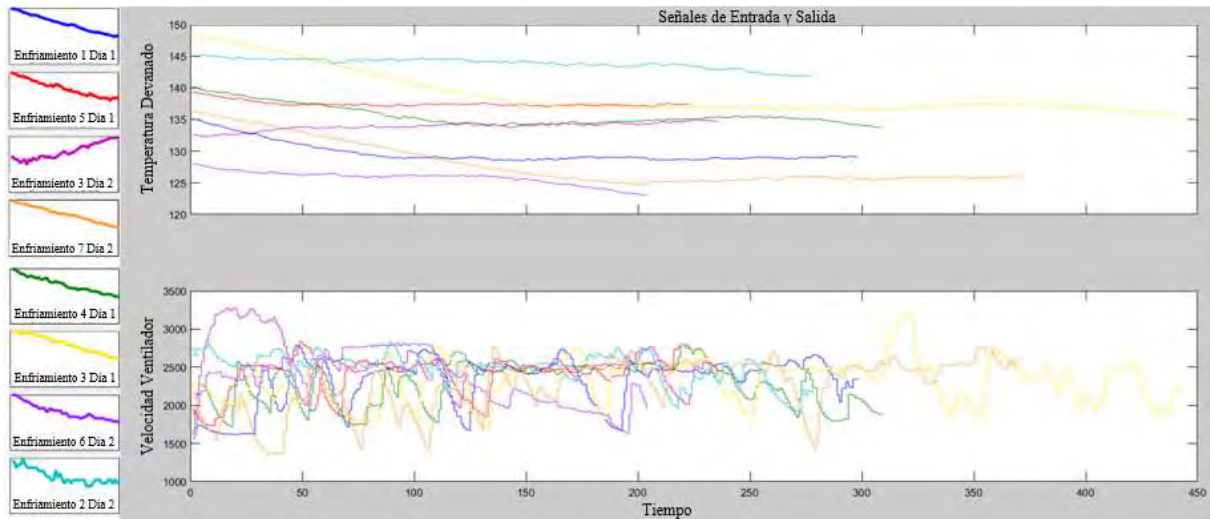


Figura 38. Información de Entrada para Modelos de Planta Bajando Vacío.

A continuación, en la Figura 39 se muestra el detalle de los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como el día 2 así como la combinación de estos días 1 y 2; donde se observa que se obtuvo funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su propia información de estimación; los cuales varían entre 83% y 93%.

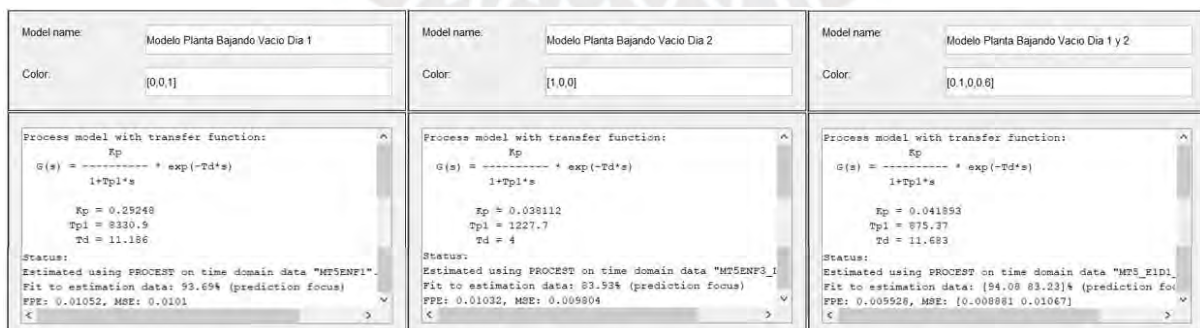


Figura 39. Detalle de Cálculo de Modelos de Planta Bajando Vacío.

En la Figura 40 se muestra una comparación gráfica de las respuestas de la Planta en el modo de trabajo Bajando Vacío; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

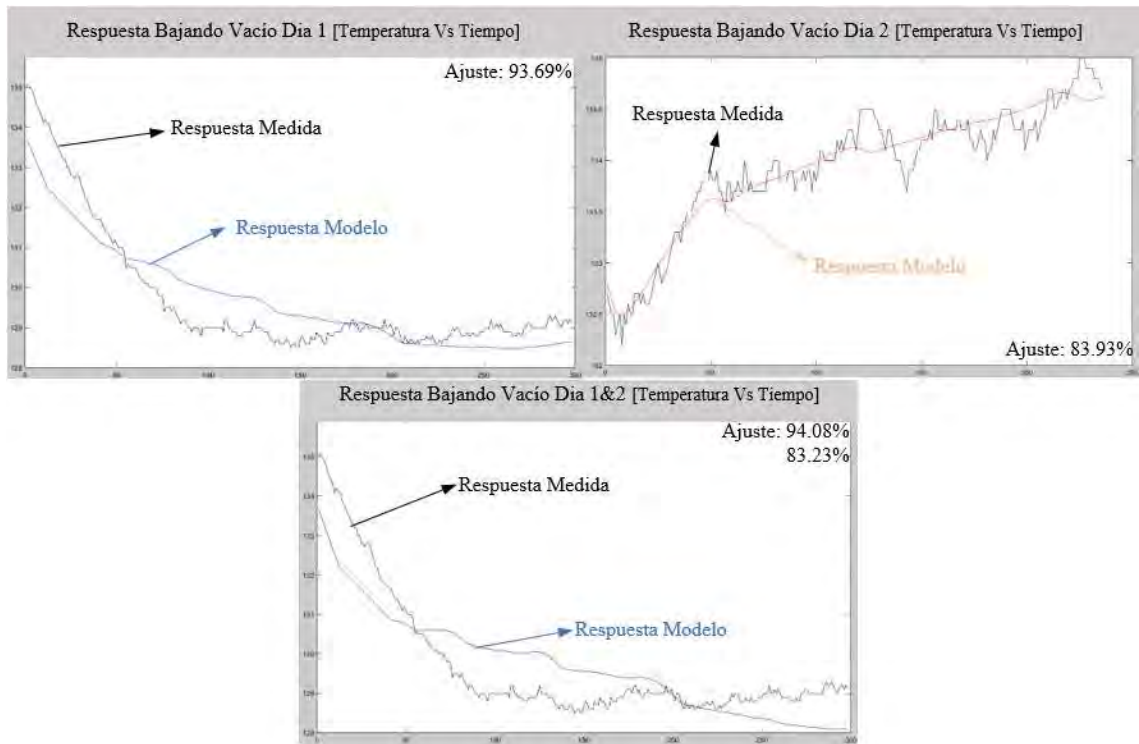


Figura 40. Respuestas de Planta Medidas Vs Modelos Obtenidos en Modo Bajando Vacío.

4.5.8 Estimación de Modelo de Actuador en Modo Bajando Vacío

En la Figura 41 se muestran los tramos de información de los días 1 y 2 tomados como información de entrada para el cálculo de los modelos del Actuador obtenidos en modo Bajando Vacío.

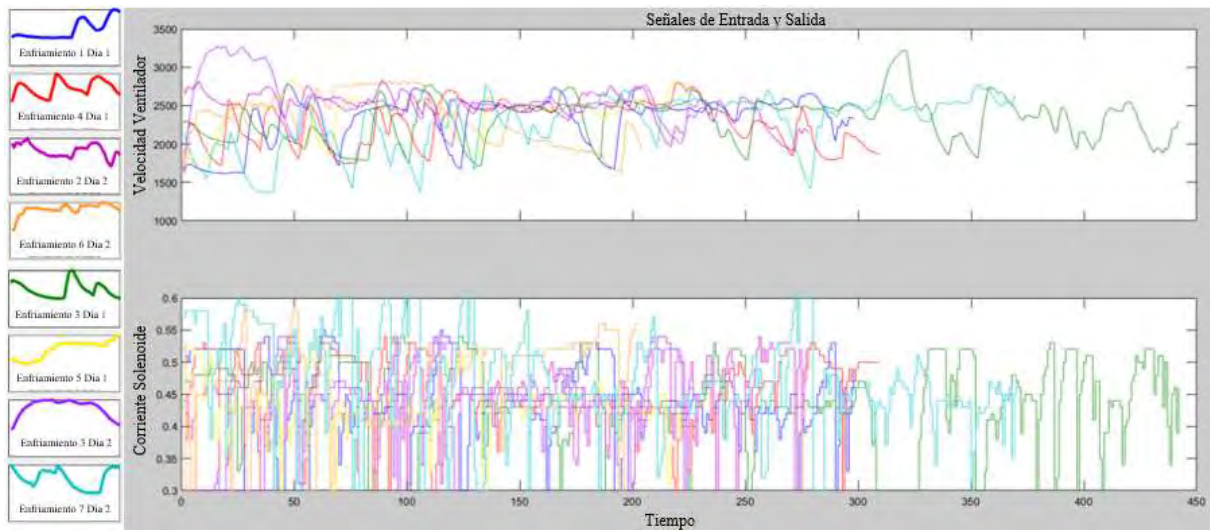


Figura 41. Información de Entrada para Modelos de Actuador Bajando Vacío

A continuación, en la Figura 42 se muestra el detalle de los resultados de cálculo utilizando el algoritmo “procest” de Matlab tanto para el día 1 como el día 2 así como la combinación de estos días 1 y 2; donde se observa que se obtuvo funciones de transferencia de primer orden con retardo. Adicionalmente se muestra los valores de ajuste de cada modelo con su propia información de estimación; los cuales varían entre 85% y 93%.

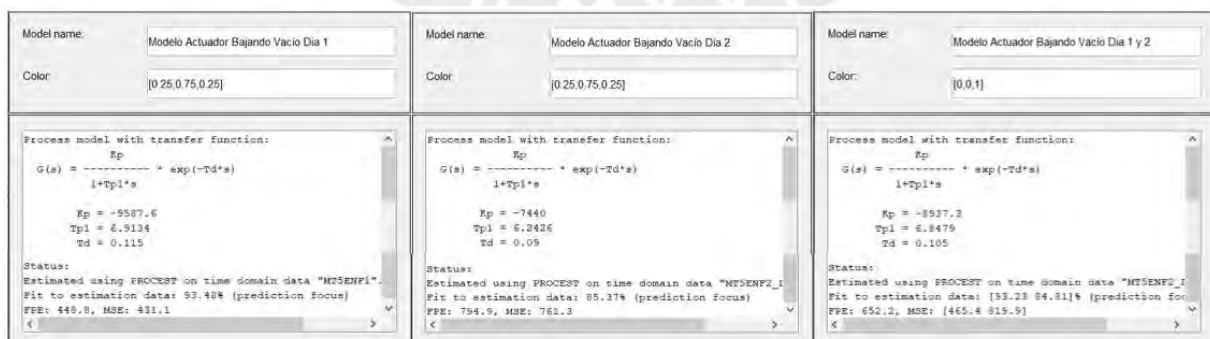


Figura 42. Detalle de Cálculo de Modelos de Actuador Bajando Vacío.

En la Figura 43 se muestra una comparación gráfica de las respuestas del Actuador en el modo de trabajo Bajando Vacío; medidas durante los días 1 y 2 versus la respuesta de los modelos obtenidos con dichos datos medidos.

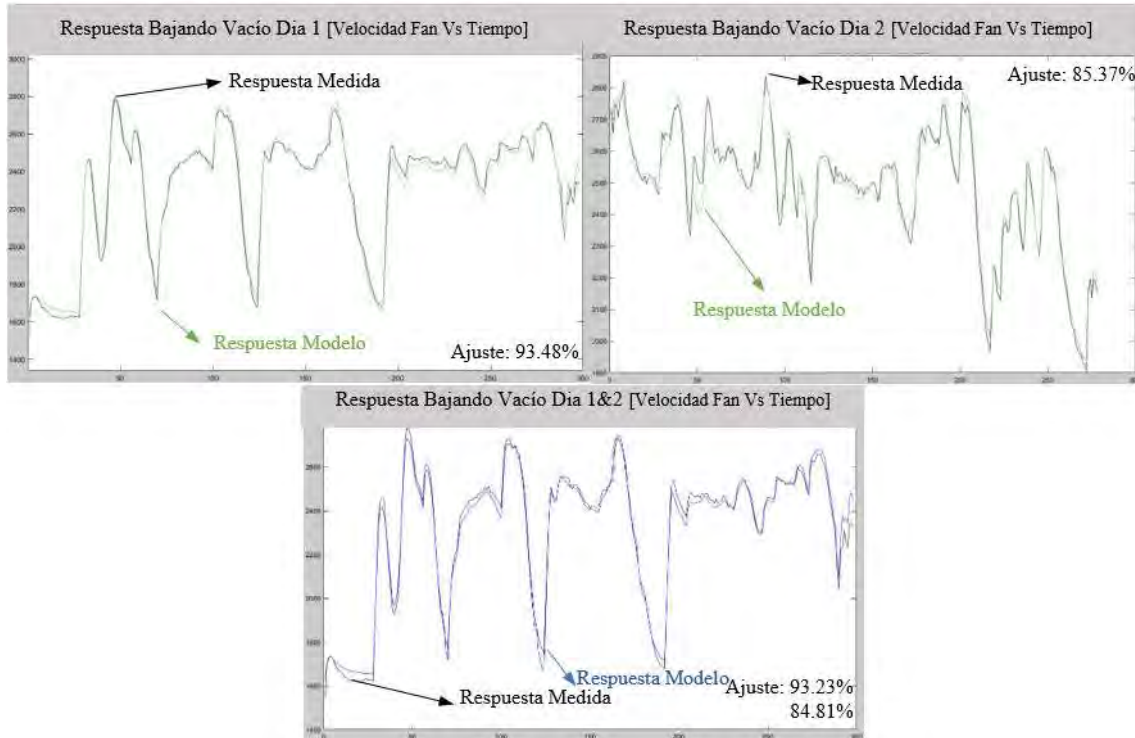


Figura 43. Respuesta de Actuador Medida Vs Modelos Obtenidos en Modo Bajando Vacío

A continuación, se resume los diferentes modelos tanto para la Planta como el Actuador en modo Bajando Vacío, detallando los parámetros de la función de transferencia de primer orden K y T_{p1} con retardo T_d además del porcentaje de ajuste de cada modelo con relación a su propia información de estimación (Ver Tabla 6).

Modelos Modo de Trabajo Bajando Vacío					
$P(s) = Ke^{-T_d s} \frac{1}{(1 + T_{p1}s)}$					
Modelo	Ciclo_Enfriamiento	K	Tp1	Td	Ajuste
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 1 Dia 1	0.29248	8330.90	11.19	93.69%
Temp_Vs_FanSpeed	Enfriamiento 3 Dia 2	0.038112	1227.70	4.00	83.93%
Temp_Vs_FanSpeed	Combinado Dia 1 & Dia 2	0.041893	875.37	11.68	94.08% 83.23%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 1 Dia 1	-9587.60	6.91340	0.12	93.48%
FanSpeed Vs Solenoid	Enfriamiento 2 Dia 2	-7740	6.24	0.09	85.37%
FanSpeed Vs Solenoid	Combinado Dia 1 & Dia 2	-8937.30	6.84790	0.11	93.23% 84.81%

Tabla 6. Modelos de Planta y Actuador en Modo Bajando Vacío.

El modelo de planta (Temp_Vs_FanSpeed) obtenido mediante la combinación de información del día1 & día2 es bastante distinto a los modelos separados obtenidos tanto del día 1 como del día 2 debido al valor de ganancia, tiempo y retardo tan disimiles; en la etapa de validación de modelos se verificará si requieren ser descartados.

4.6 Validación de Modelos Planta y Actuador por Modo de Trabajo

Para la validación se calculó el ajuste de los tres modelos obtenidos con la información correspondiente a otros tramos de enfriamiento tanto del día 1 como del día 2, para luego proceder a calcular el ajuste promedio, máximo y mínimo de los modelos obtenidos; utilizando dichos indicadores se decide qué modelo se utilizará para el cálculo del controlador tanto para la planta como para el actuador en cada uno de los modos de trabajo.

4.6.1 Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Cargado.

Se muestra la comparación del ajuste de modelos de Planta Viajando Cargado obtenidos en día 1, día 2 y combinados, con tramos del día 1 (ver Figura 44) y del día 2 (ver Figura 45).

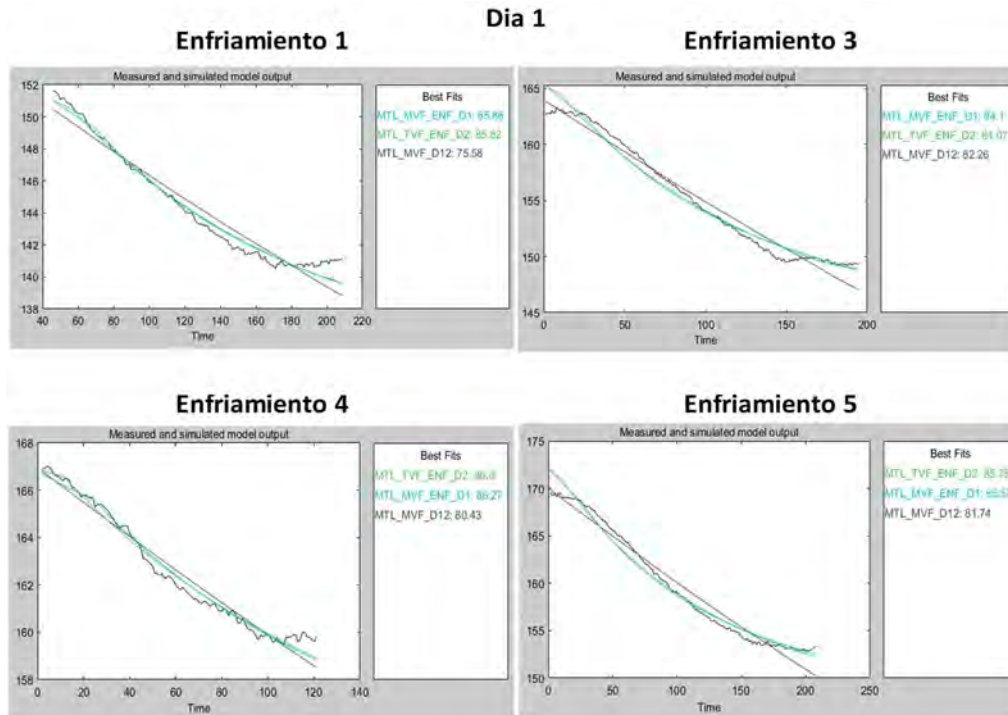


Figura 44. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Cargado Día 1

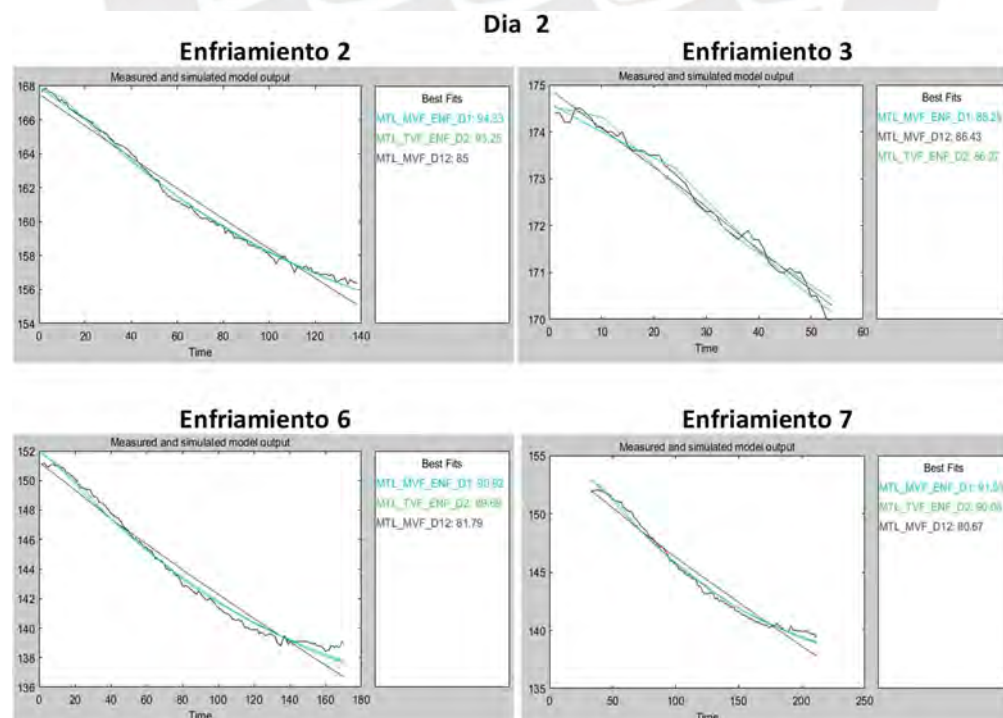


Figura 45. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Cargado Día 2

La Tabla 7 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de planta (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 1-7) bajo el modo de trabajo Viajando Cargado; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validacion Modelo Temperatura Vs Ventilador Modo VIAJANDO CARGADO				
Ciclo		Dia 1	Dia 2	Combinado
Dia 1	Enfriamiento 1	85.9	85.8	75.6
	Enfriamiento 3	84.1	84.1	82.3
	Enfriamiento 4	86.3	86.8	80.4
	Enfriamiento 5	85.6	85.8	81.7
Dia 2	Enfriamiento 2	94.3	93.3	85.0
	Enfriamiento 3	88.3	86.3	86.4
	Enfriamiento 6	90.9	89.7	81.8
	Enfriamiento 7	91.5	90.1	80.7
Ajuste	Promedio	88.4	87.7	81.7
	Minimo	84.1	84.1	75.6
	Maximo	94.3	93.3	86.4

Tabla 7. Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Cargado.

Según lo observado en la Tabla 7 dado que tanto el promedio, el mínimo y el máximo son superiores, por tanto, se utilizará el modelo del día 1.

4.6.2 Validación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Cargado.

Se muestra la comparación del ajuste de modelos de Actuador Viajando Cargado obtenidos en día 1, día 2 y combinados, con tramos del día 1 (ver Figura 46) y del día 2 (ver Figura 47).

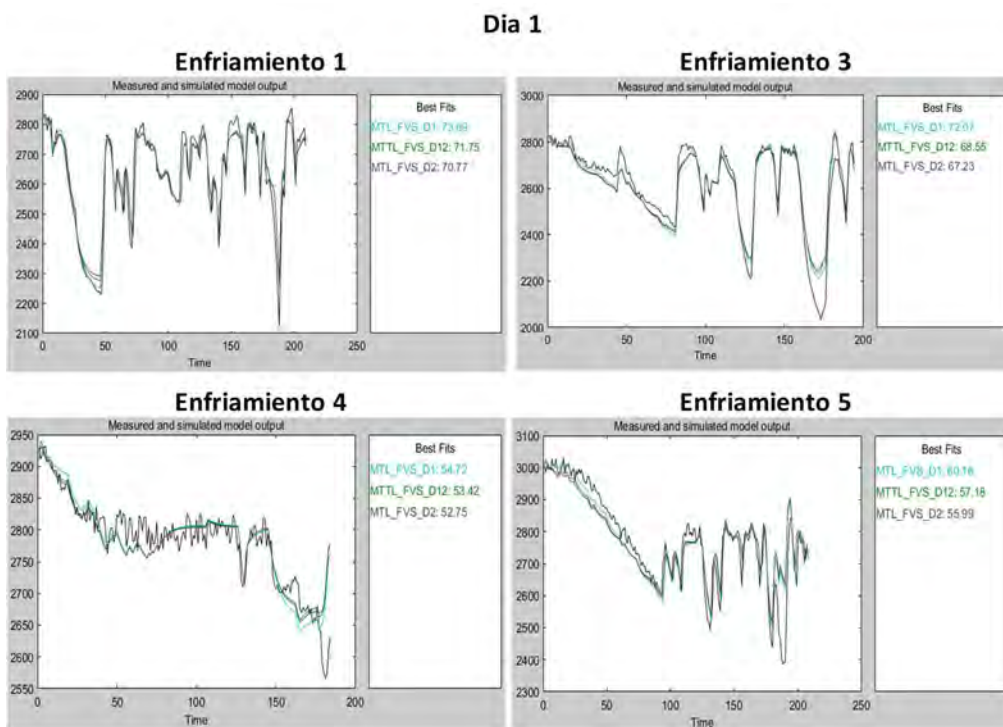


Figura 46. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Cargado Día 1

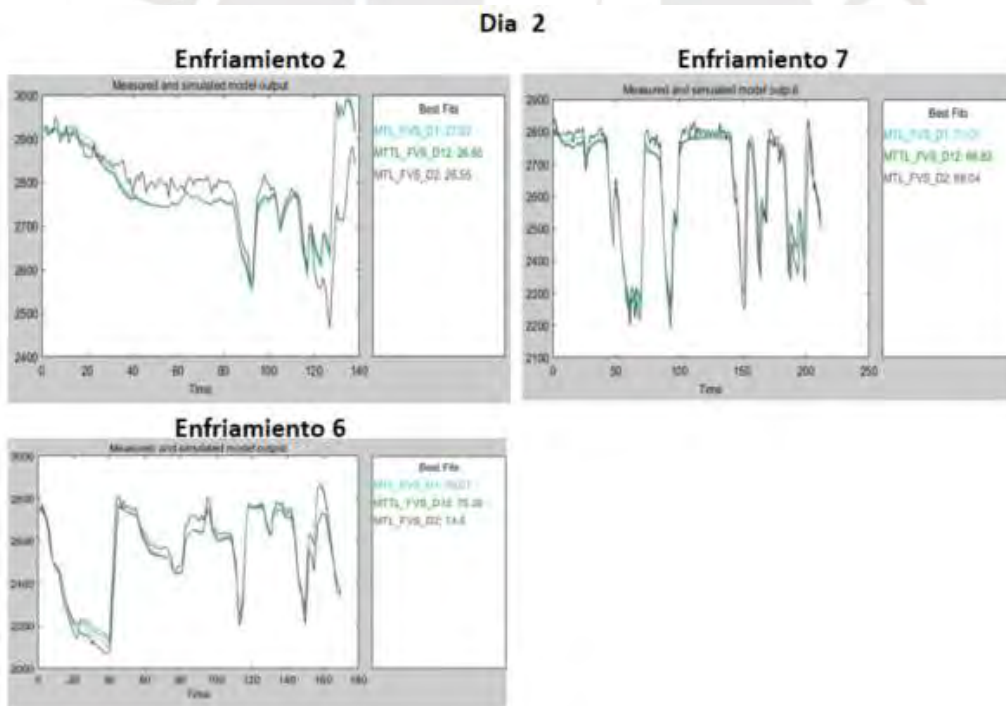


Figura 47. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Cargado Día 2

La Tabla 8 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de actuador (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 1-7) bajo el modo

de trabajo Viajando Cargado; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validacion Modelo Ventilador Vs Solenoide				
Modo VIAJANDO CARGADO				
	Ciclo	Dia 1	Dia 2	Combinado
Dia 1	Enfriamiento 1	73.1	70.8	71.8
	Enfriamiento 3	72.1	67.2	68.6
	Enfriamiento 4	54.7	52.8	53.4
	Enfriamiento 5	60.2	56.0	57.2
Dia 2	Enfriamiento 2	27.3	26.6	26.7
	Enfriamiento 6	76.1	74.5	75.3
	Enfriamiento 7	71.0	68.0	68.8
Ajuste	Promedio	62.1	59.4	60.2
	Minimo	27.3	26.6	26.7
	Maximo	76.1	74.5	75.3

Tabla 8. Validación de Modelo Actuador en Modo Viajando Cargado.

Según lo observado en la Tabla 8 dado que tanto el promedio, el mínimo como el máximo son superiores, se utilizará el modelo del día 1.

4.6.3 Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Vacío.

Se muestra la comparación del ajuste de modelos de Planta Viajando Vacío obtenidos en día 1, día 2 y combinados, con tramos del día 1 (ver Figura 48) y del día 2 (ver Figura 49).

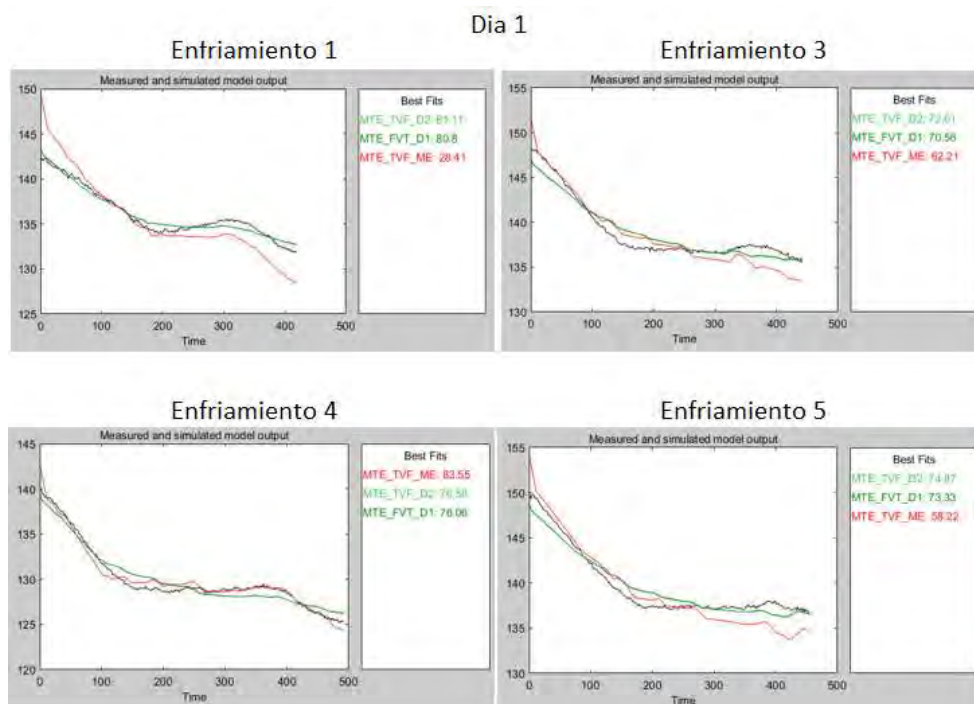


Figura 48. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Vacío Dia 1

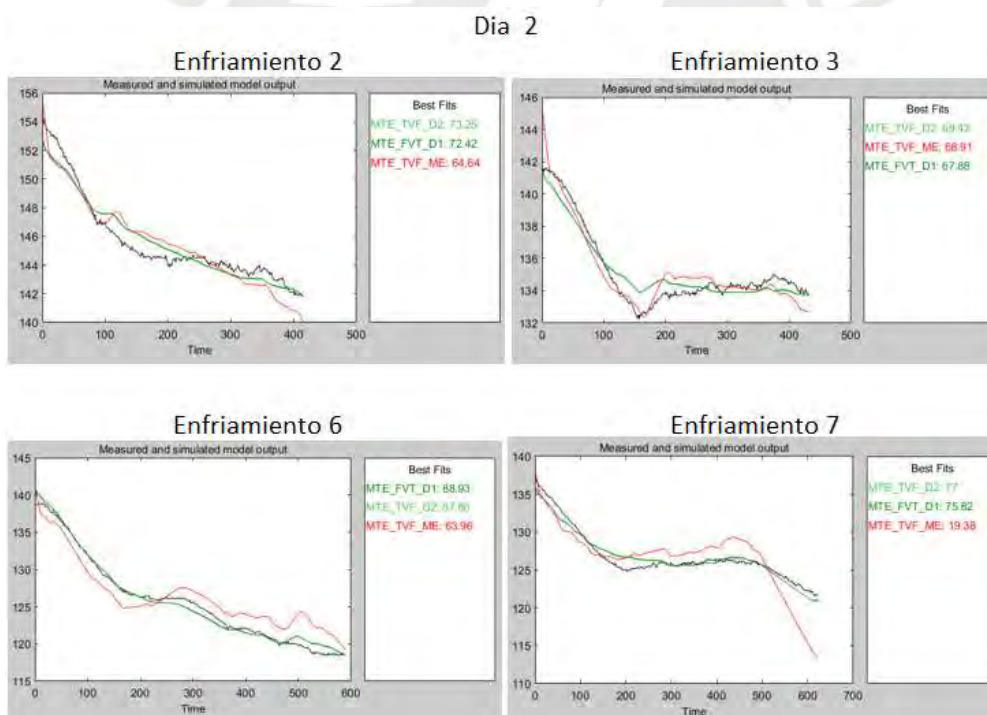


Figura 49. Detalle Validación Modelos de Planta Viajando Vacío Dia 2

La Tabla 9 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de planta (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 1-7) bajo el modo

de trabajo Viajando Vacío; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validación Modelo Temperatura Vs Ventilador				
Ciclo		Día 1	Día 2	Combinado
Día 1	Enfriamiento 1	76.1	76.6	83.6
	Enfriamiento 3	70.6	72.0	62.2
	Enfriamiento 4	80.8	81.1	28.4
	Enfriamiento 5	73.3	74.9	58.2
Día 2	Enfriamiento 2	72.4	73.3	64.6
	Enfriamiento 3	67.9	69.4	68.9
	Enfriamiento 6	88.9	87.9	64.0
	Enfriamiento 7	75.8	77.0	19.4
Ajuste	Promedio	75.7	76.5	56.2
	Minimo	67.9	69.4	19.4
	Maximo	88.9	87.9	83.6

Tabla 9. Validación de Modelo de Planta en Modo Viajando Vacío.

Según lo observado en la Tabla 9 dado que tanto el promedio como el mínimo son superiores, se utilizará el modelo del día 2.

4.6.4 Validación de Modelo de Actuador en Modo Viajando Vacío

Se muestra la comparación del ajuste de modelos de Actuador Viajando Vacío obtenidos en día 1, día 2 y combinados, con tramos del día 1 (ver Figura 50) y del día 2 (ver Figura 51).

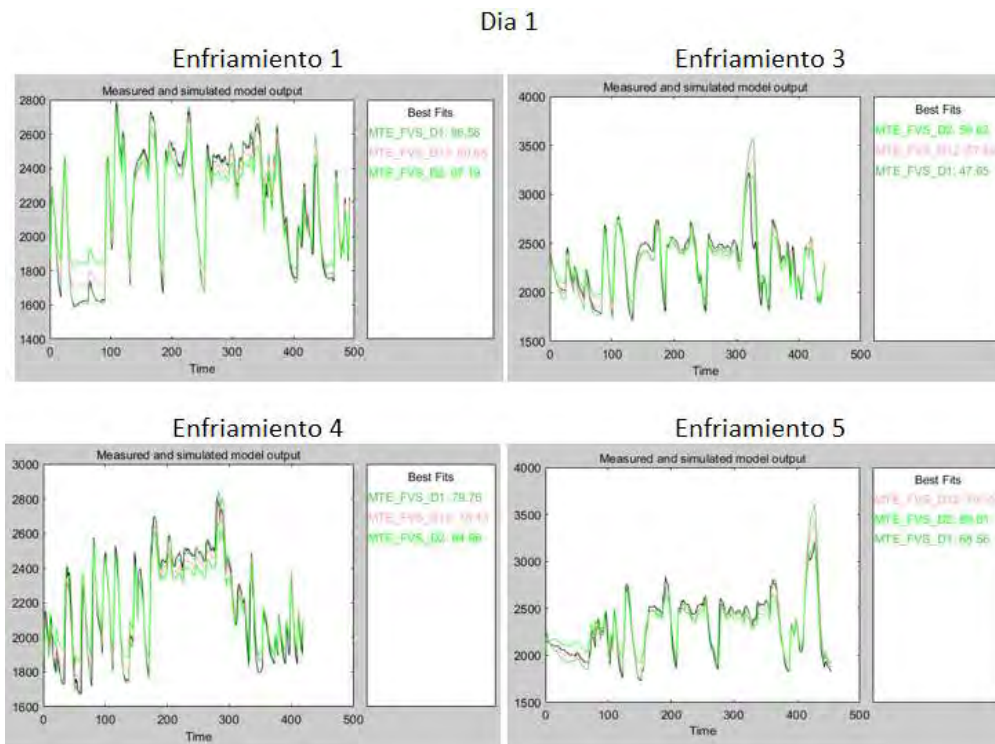


Figura 50. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Vacío Dia 1

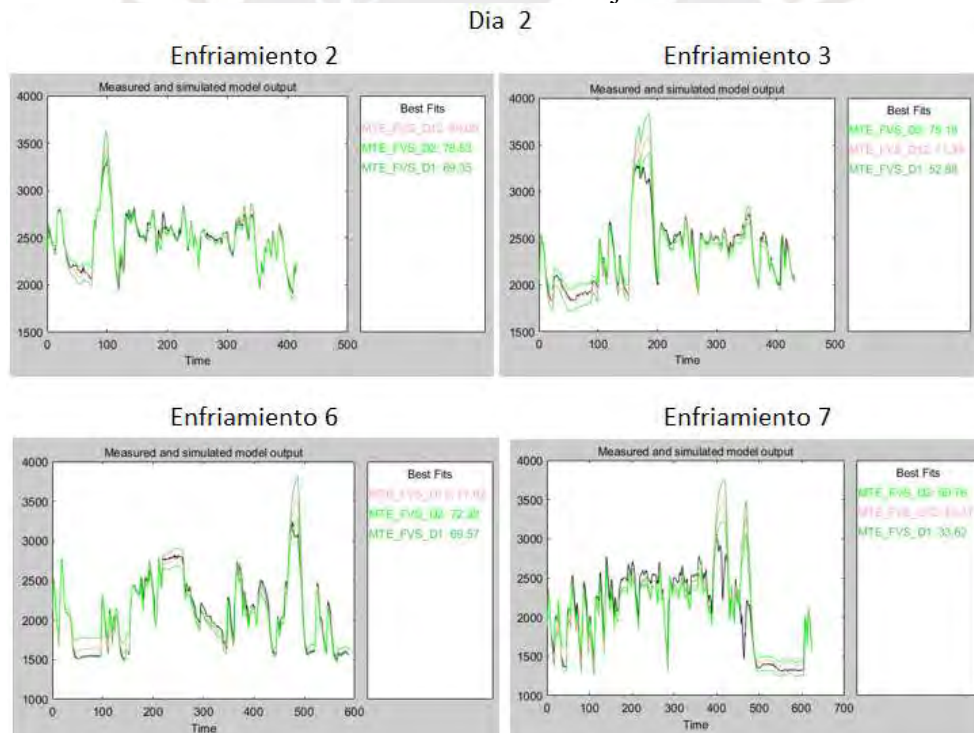


Figura 51. Detalle Validación Modelos de Actuador Viajando Vacío Dia 2

La Tabla 10 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de actuador (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 1-7) bajo el modo de trabajo Viajando Vacío; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validación Modelo Ventilador Vs Solenoide Modo VIAJANDO VACIO				
Ciclo		Dia 1	Dia 2	Combinado
Dia 1	Enfriamiento 1	86.6	67.2	80.7
	Enfriamiento 3	47.7	59.6	57.5
	Enfriamiento 4	79.8	65.0	75.4
	Enfriamiento 5	68.6	69.8	75.6
Dia 2	Enfriamiento 2	69.4	78.5	80.1
	Enfriamiento 3	52.9	75.2	71.4
	Enfriamiento 6	69.6	72.3	77.9
	Enfriamiento 7	33.6	50.8	43.5
Ajuste	Promedio	63.5	67.3	70.2
	Minimo	33.6	50.8	43.5
	Maximo	86.6	78.5	80.7

Tabla 10. Validación de Modelo Actuador en Modo Viajando Vacío.

Según lo observado en la Tabla 10 dado que el promedio es superior, se utilizará el modelo actuador combinado.

4.6.5 Validación de Modelo de Planta en Modo Detenido

Se muestra la comparación del ajuste de modelos de Planta modo Detenido obtenidos en día 1, día 2 y combinados, con tramos del día 1 (ver Figura 52) y del día 2 (ver Figura 53).

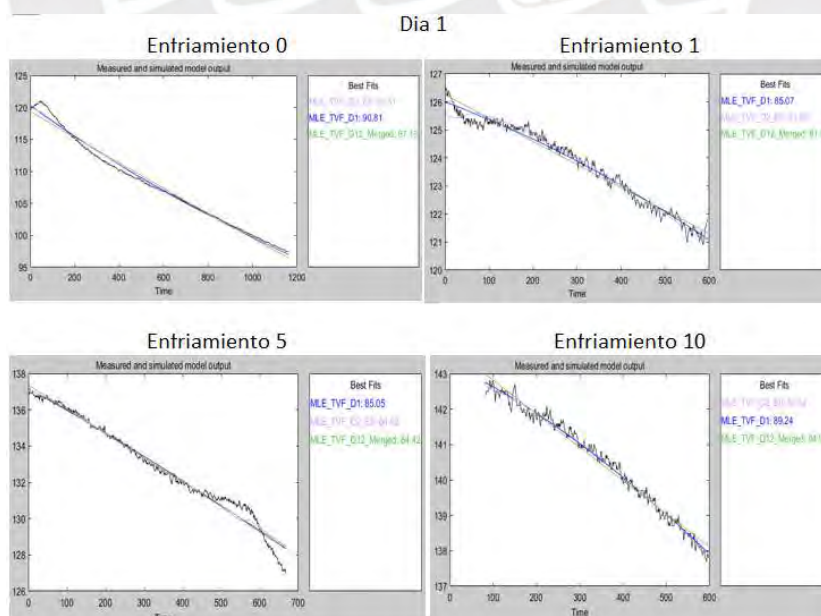


Figura 52. Detalle Validación Modelos de Planta Modo Detenido Dia 1

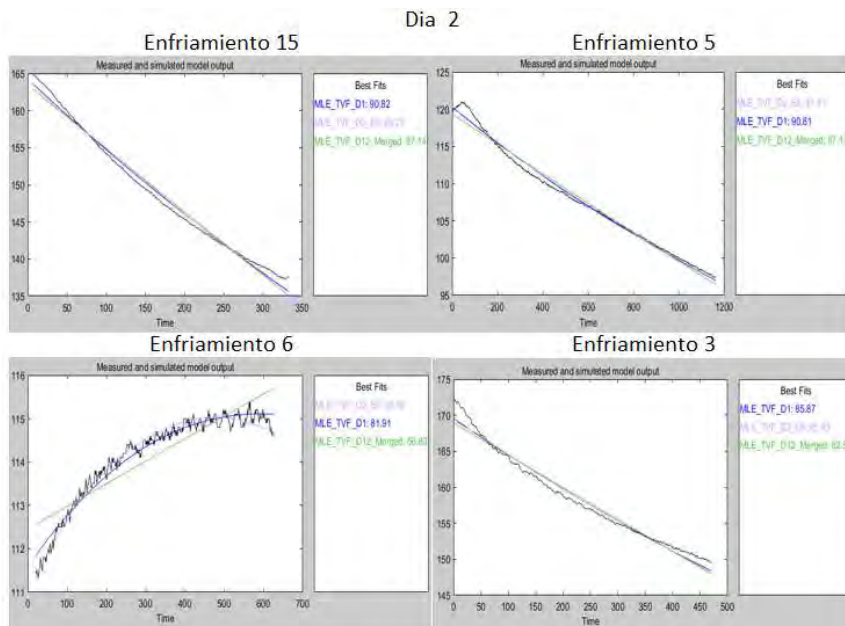


Figura 53. Detalle Validación Modelos de Planta Modo Detenido Dia 2

La Tabla 11 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de planta (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 1-7) bajo el modo de trabajo Detenido; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validacion Modelo Temperatura Vs Ventilador Modo DETENIDO				
Ciclo		Dia 1	Dia 2	Combinado
Dia 1	Enfriamiento 0	90.81	91.41	87.13
	Enfriamiento 1	85.07	83.99	81.58
	Enfriamiento 5	85.05	84.62	84.42
	Enfriamiento 10	89.24	89.54	84.98
	Enfriamiento 15	90.82	89.27	87.14
Dia 2	Enfriamiento 5	90.81	91.41	87.13
	Enfriamiento 6	81.91	85.38	56.83
	Enfriamiento 3	85.87	85.43	82.45
Ajuste	Promedio	87.45	87.63	81.46
	Minimo	81.91	83.99	56.83
	Maximo	90.82	91.41	87.14

Tabla 11. Validación de Modelo Planta en Modo Detenido

Según lo observado en la Tabla 11, dado que el promedio, el mínimo y el máximo son superiores se trabajará con el modelo del día 2.

4.6.6 Validación de Modelo de Actuador en Modo Detenido.

La Tabla 112 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de actuador (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 0 y 6) bajo el modo de trabajo Detenido; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validacion Modelo Ventilador Vs Solenoide Modo DETENIDO				
Ciclo		Dia 1	Dia 2	Combinado
Dia 1	Enfriamiento 0	51.20	23.05	52.06
Dia 2	Enfriamiento 6	62.64	58.74	63.07
Ajuste	Promedio	56.92	40.90	57.57
	Minimo	51.20	23.05	52.06
	Maximo	62.64	58.74	63.07

Tabla 12. Validación de Modelo Actuador en Modo Detenido

Según lo observado en la Tabla 112; en el caso del modelo de actuador en modo de trabajo Detenido los valores alcanzados son muy bajos por lo que procede a descartar este modelo.

4.6.7 Validación de Modelo de Planta en Modo Bajando Vacío.

Se muestra la comparación del ajuste de modelos de Planta Bajando Vacío obtenidos en día 1, día 2 y combinados, con tramos del día 1 (ver Figura 54) y del día 2 (ver Figura 55).

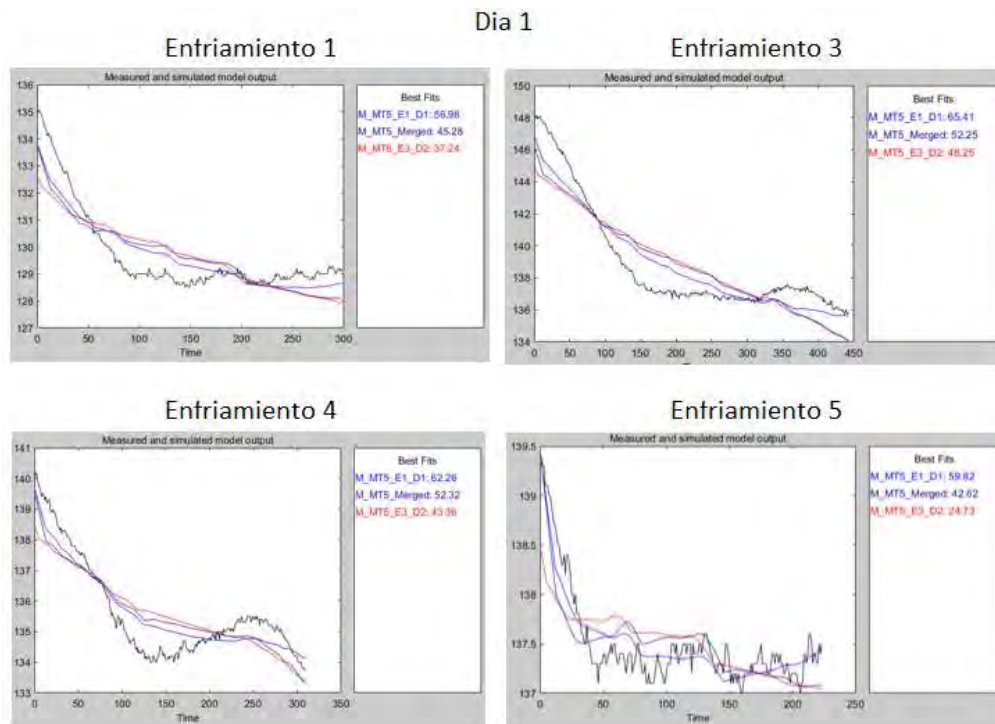


Figura 54. Detalle Validación Modelos de Planta Bajando Vacío Dia 1

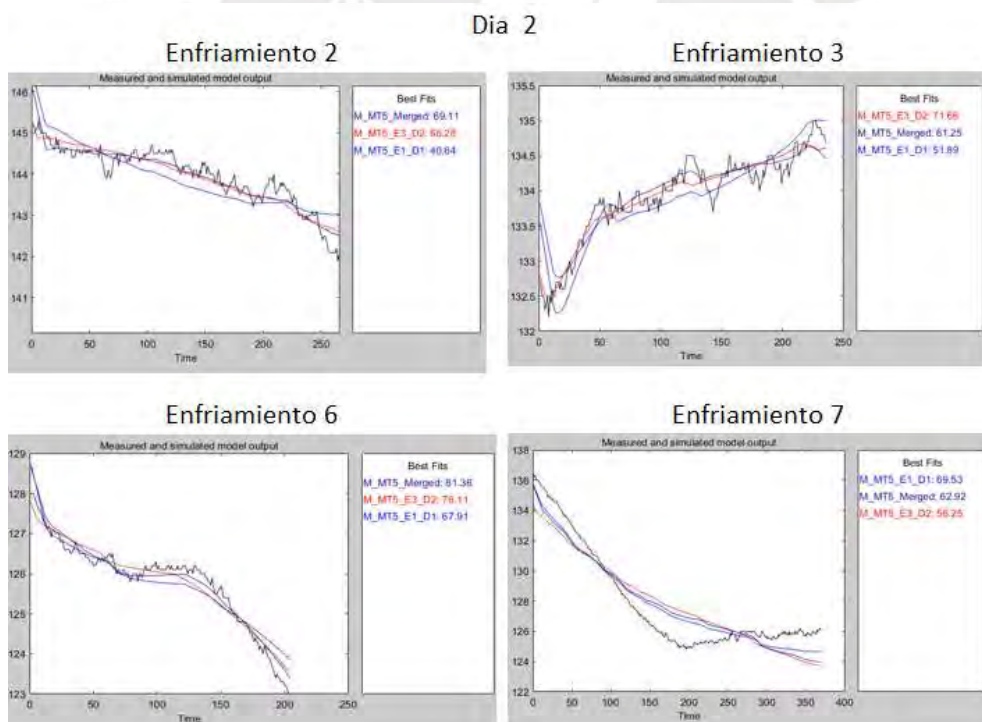


Figura 55. Detalle Validación Modelos de Planta Bajando Vacío Dia 2

La Tabla 13 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de planta (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 1-7) bajo el modo

de trabajo Bajando Vacío; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validacion Modelo Temperatura Vs Ventilador Modo BAJANDO VACIO				
Ciclo		Dia 1	Dia 2	Combinado
Dia 1	Enfriamiento 1	57.0	37.2	45.3
	Enfriamiento 3	65.4	48.3	52.3
	Enfriamiento 4	62.3	43.4	52.3
	Enfriamiento 5	59.8	24.7	42.6
Dia 2	Enfriamiento 2	40.6	66.3	69.1
	Enfriamiento 3	51.9	71.7	61.3
	Enfriamiento 6	67.9	76.1	81.4
	Enfriamiento 7	69.5	56.3	62.9
Ajuste	Promedio	59.3	53.0	58.4
	Minimo	40.6	24.7	42.6
	Maximo	69.5	76.1	81.4

Tabla 13. Validación de Modelo de Planta en Modo Bajando Vacío.

Según lo observado en la Tabla 13 dado que tanto el promedio y el mínimo son superiores nos quedamos con el modelo combinado del día 1 y 2.

4.6.8 Validación de Modelo de Actuador en Modo Bajando Vacío.

Se muestra la comparación del ajuste de modelos de Planta Bajando Vacío obtenidos en día 1, día 2 y combinados, con tramos del día 1 (ver Figura 56) y del día 2 (ver Figura 55).

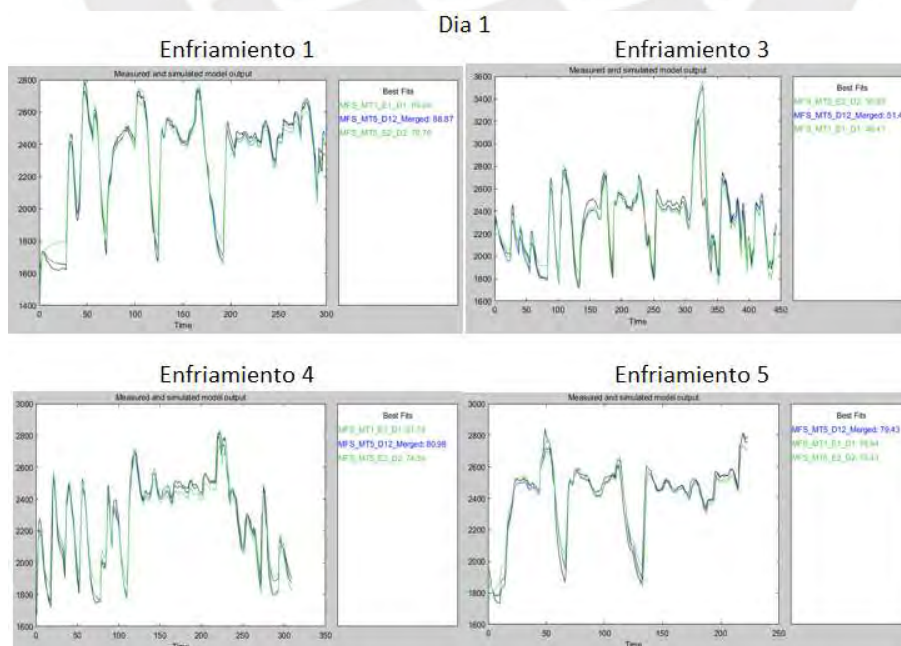


Figura 56. Detalle Validación Modelos de Actuador Bajando Vacío Dia 1

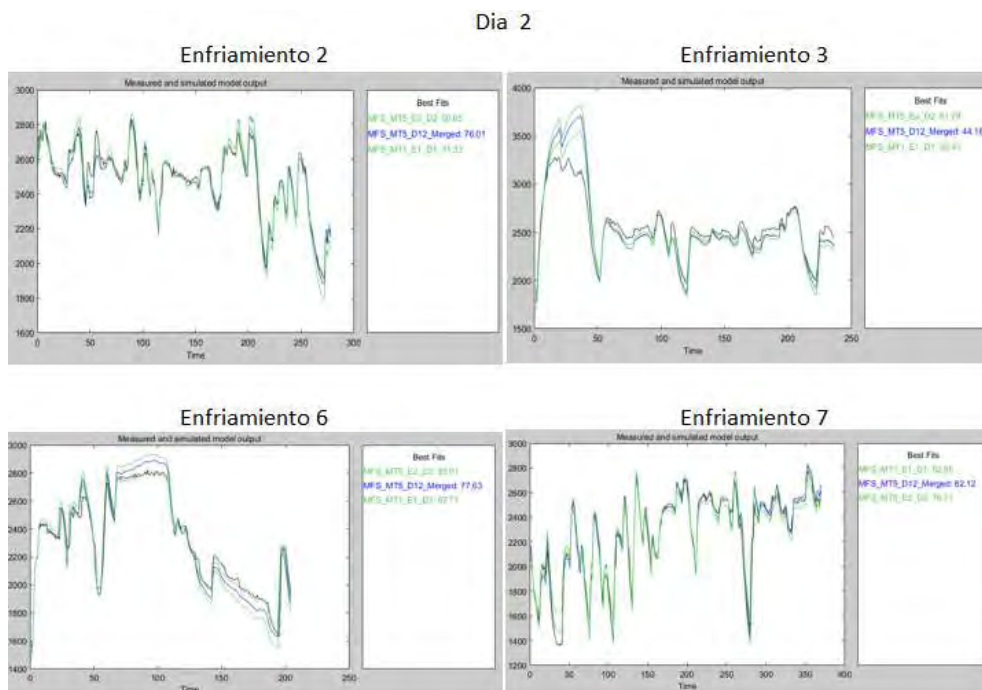


Figura 57. Detalle Validación Modelos de Actuador Bajando Vacío Dia 2

La Tabla 14 evalúa el ajuste de cada uno de los modelos de actuador (día1, día2 o combinado); con diferentes tramos de trabajo de ambos días (enfriamiento 1-7) bajo el modo de trabajo Bajando Vacío; con la finalidad de seleccionar el modelo que mejor se ajusta evaluando el promedio, máximo y mínimo ajuste.

Validacion Modelo Ventilador Vs Solenoide Modo BAJANDO VACIO				
Ciclo		Dia 1	Dia 2	Combinado
Dia 1	Enfriamiento 1	89.0	78.8	88.9
	Enfriamiento 3	49.4	58.9	51.4
	Enfriamiento 4	81.8	74.4	81.0
	Enfriamiento 5	78.9	73.4	79.4
Dia 2	Enfriamiento 2	71.3	80.7	76.0
	Enfriamiento 3	30.4	61.3	44.2
	Enfriamiento 6	67.7	83.0	77.6
	Enfriamiento 7	82.9	76.1	82.1
Ajustes	Promedio	68.9	73.3	72.6
	Minimo	30.4	58.9	44.2
	Maximo	89.0	83.0	88.9

Tabla 14. Validación de Modelo de Actuador en Modo Bajando Vacío.

Según lo observado en la dado que tanto el promedio y el mínimo son superiores nos quedamos con el modelo del día 2.

4.7 Resumen de Modelos

A continuación, en la Tabla 15 se muestra el resumen de los diferentes modelos a utilizar para el diseño del controlador.

			Modo de Trabajo			
			Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Modelo PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	$P(s) = Ke^{-T_d s} \frac{1}{(1 + T_{p1}s)}$	K	-0.00205	0.11185	0.02013	0.04189
		Tp1	98.1470	2026.60	775.860	875.370
		Td	23.0000	1.32000	6.00000	11.6800
Modelo ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)		K	-7058.30	-7817.40		-7740.00
		Tp1	6.17700	6.09650		6.24260
		Td	0.00000	0.24000		0.09000

Tabla 15. Resumen de Modelos de Planta y Actuador por Modo de Trabajo.

4.8 Conclusiones del Capítulo

Se modeló tanto la planta como el actuador bajo cuatro modos de trabajo del equipo (Viajando Cargado, Viajando Vacío, Detenido; Bajando Vacío), debido a que el equipo en especial el motor de combustión y el motor de tracción se ven sometidos a un amplio rango de niveles de exigencia; además que la teoría establece que los modelos lineales son válidos alrededor de un punto de operación limitado.

Los modelos obtenidos para la Planta (Devanado de Motor de Tracción) que relacionan la Temperatura de Devanado como salida con la Velocidad de Ventilador como entrada para los distintos modos de trabajo son bastante disimiles; ello debido a que bajo los distintos modos de trabajo los motores de tracción se ven sometidos a distintos niveles de carga desde máxima carga en Viajando Cargado, pasando por mediana carga Viajando Vacío y Bajando Vacío hacia mínima carga en modo Detenido.

En cuanto a los modelos para el Actuador (Solenoide + Motor Hidráulico + Ventilador) que relacionan la señal del Solenoide como entrada con la Velocidad de Ventilador como salida resultaron ser bastante similares a excepción del caso bajo el modo de trabajo Detenido, debido

a que la carga del sistema depende del control hidráulico salvo en el caso detenido donde la disponibilidad de potencia hidráulica es mínima.

En cuando a la validación de los modelos se tomó el ajuste máximo, mínimo y promedio para los tramos de información del día 1&2, permitiéndonos seleccionar el modelo más adecuado, salvo en el caso del actuador del modo detenido, lo cual motivó el descarte de dicho modelo.



Capítulo V Diseño de Controlador

En este capítulo se abordará la sintonización de controladores PID para cada uno de los modos de trabajo del sistema de enfriamiento, para ello utilizaremos por un lado las técnicas tradicionales de sintonización de controladores como Ziegler Nichols y por otro lado aplicaremos los algoritmos de sintonización automática de Matlab. Una vez obtenidos los controladores PID para cada modo de trabajo se procederá a unirlos utilizando un controlador de ganancia programada (Gain Scheduling). Simultáneamente simularemos y analizaremos el comportamiento de los controladores tanto a nivel individual como integrados en un sistema en cascada.

5.1. Sintonización de Controlador PID utilizando Ziegler Nichols

En esta etapa del proceso de cálculo de los controladores procederemos con la utilización del Segundo Método de Ziegler Nichols, también conocido como el método de oscilaciones sostenidas en lazo cerrado como una primera aproximación del controlador PID, para luego afinar la sintonización utilizando las herramientas de sintonización automática de Simulink-Matlab. Vale la pena mencionar que este proceso lo desarrollaremos para cada uno de los modos de trabajo del sistema tanto para la Planta como para el Actuador.

Sintonización Ziegler Nichols Mediante el Método de Lazo Cerrado. - Para encontrar las ganancias del controlador PID para la temperatura del devanado del motor eléctrico DC se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 58. Modelo de Sintonización Ziegler Nichols para Planta en Lazo Cerrado

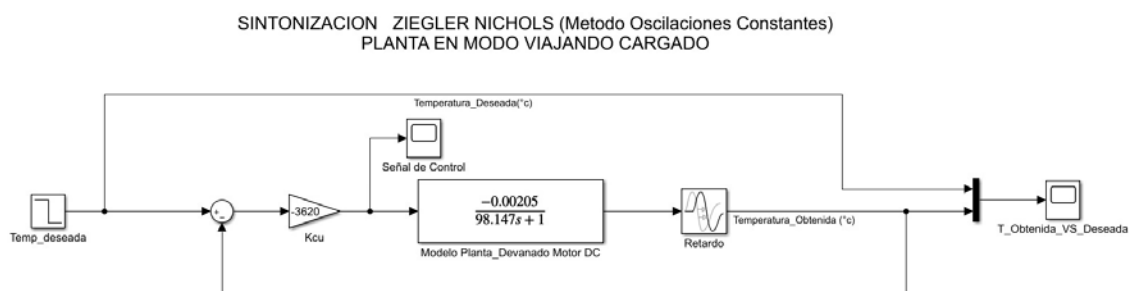


Figura 58. Modelo de Sintonización Ziegler Nichols para Planta en Lazo Cerrado

Al ir variando la ganancia K_{cu} pudimos lograr que la planta en modo Viajando Cargado muestre oscilaciones constantes tal como se muestra en la Figura 59.

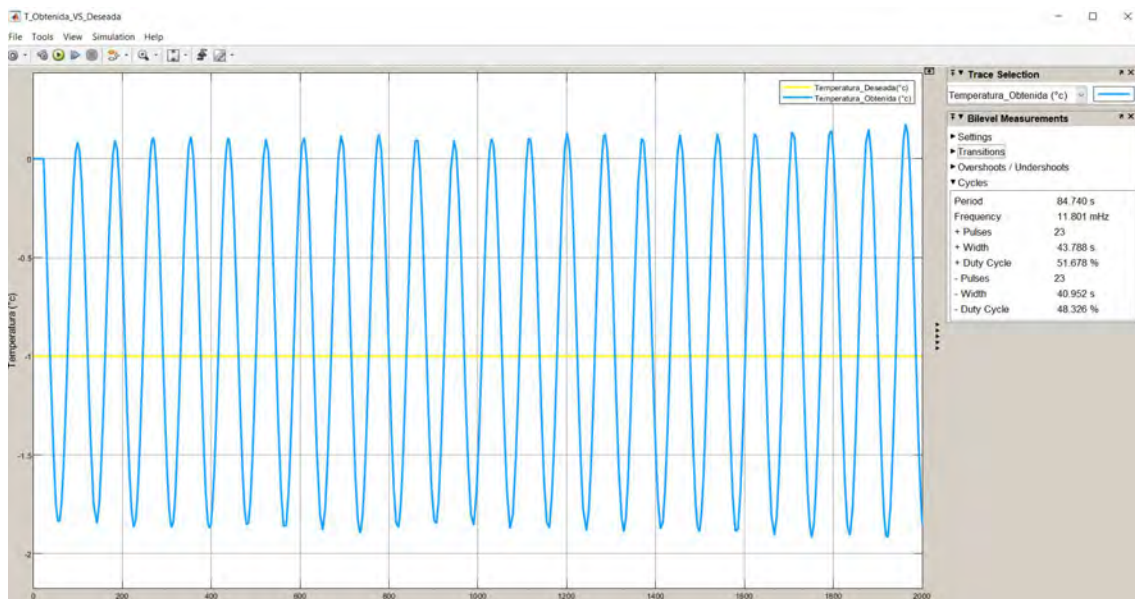


Figura 59. Respuesta de Planta con Oscilaciones Constantes.

De esta manera hemos encontrado la Ganancia Crítica K_{cu} y el Periodo Critico τ_{cu} los cuales nos permitirán hallar las ganancias K_p , K_i y K_d del controlador PID.

Sintonización Ziegler Nichols Mediante el Método de Lazo Abierto. - Para encontrar las ganancias del controlador PID para algunos modos de trabajo de la Planta y todos los Actuadores se implementó el modelo en lazo abierto mostrado en la Figura 60 obteniendo la respuesta mostrada en la Figura 61 la cual es sobreamortiguada por lo que corresponde aplicar el Primer Método de Sintonización de Ziegler Nichols también conocido como el Método de Lazo Abierto.



Figura 60. Modelo de Sintonización Ziegler Nichols para Actuator en Lazo Abierto

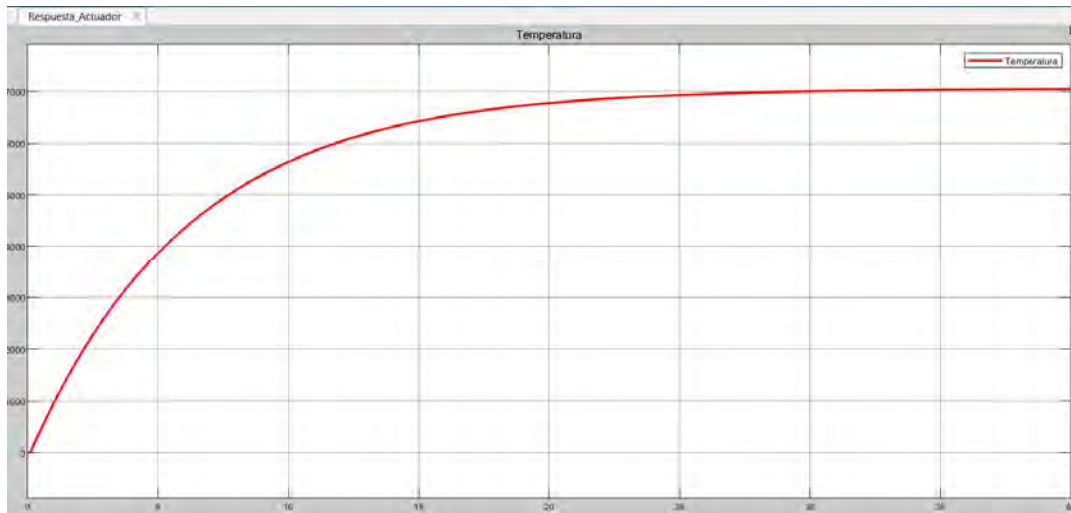


Figura 61. Respuesta Sobreamortiguada de Actuador en Lazo Abierto

A continuación, en la Tabla 16 se muestra el resumen del cálculo de las ganancias de controlador PID utilizando tanto el primer como el segundo método de Ziegler Nichols según aplicados tanto a la Planta como al Actuador para los diversos modos de operación. Vale la pena mencionar que solo en el modo Viajando Cargado para la Planta se logró oscilaciones sostenidas para aplicar el método de lazo cerrado, por lo que los demás casos tanto para la Planta como para el Actuador se resolvieron mediante el método de la respuesta escalón de lazo abierto.

SINTONIZACION ZIEGLER NICHOLS		MODOS DE TRABAJO			
		Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Sistema Control PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	Ganancia Crítica Kcu	-3620.0000			
	Período Crítico Tcu	84.7400			
	Ganancia K		0.1119	0.0201	0.0419
	Tiempo T		2026.6000	775.8600	875.3700
	Retardo L		1.3200	6.0000	11.6800
	G. Proporcional [P]	-2129.4118	16471.7357	7708.4948	2146.7852
	G. Integral [I]	-50.2575	6239.2938	642.3746	91.9001
G. Derivativa [D]	-22555.7941	10871.3456	23125.4844	12537.2258	
Sistema Control ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)	Ganancia K	-7058.0000			
	Tiempo T	6.1770			
	Retardo L	0.0010			
	G. Proporcional [P]	-1.0502			
	G. Integral [I]	-525.1063			
	G. Derivativa [D]	-0.0005			

Tabla 16. Resumen de Cálculo de Ganancias PID basadas en Ziegler Nichols

5.2. Sintonización y Simulación de Controlador PID con Sintonizador Automático

Para hallar las ganancias del controlador PID por cada modo de trabajo se sintoniza y simula los controladores de la Planta (motor de tracción eléctrico de inducción) y del Actuador (conjunto solenoide, motor hidráulico y ventilador) de manera independiente para luego integrarlos en un sistema en Cascada para ello se procederá con el cálculo del controlador para cada modo de trabajo.

5.2.1 Sintonización y Simulación PID para la Planta Viajando Cargado.

Para encontrar las ganancias del controlador para la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC y luego proceder a simularlo en modo de trabajo Viajando Cargado, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 62.

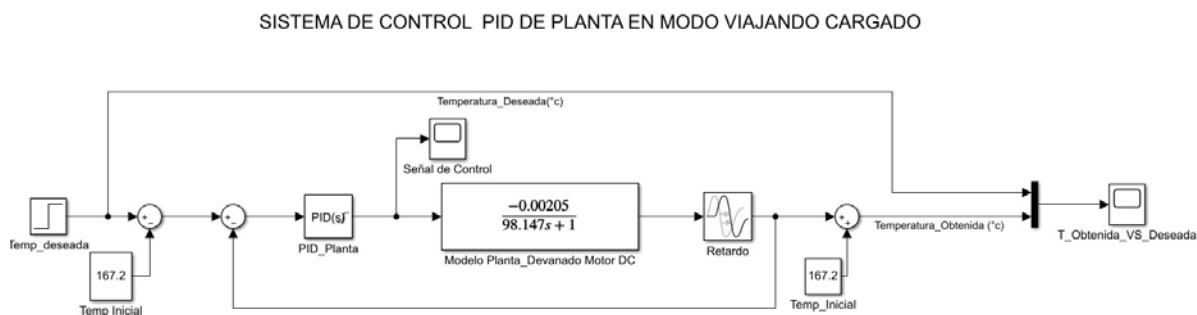


Figura 62. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Viajando Cargado

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 63, se recurre al sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa (D), partiendo de las ganancias encontradas mediante la sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida mostrados en la segunda pantalla de la Figura 63.

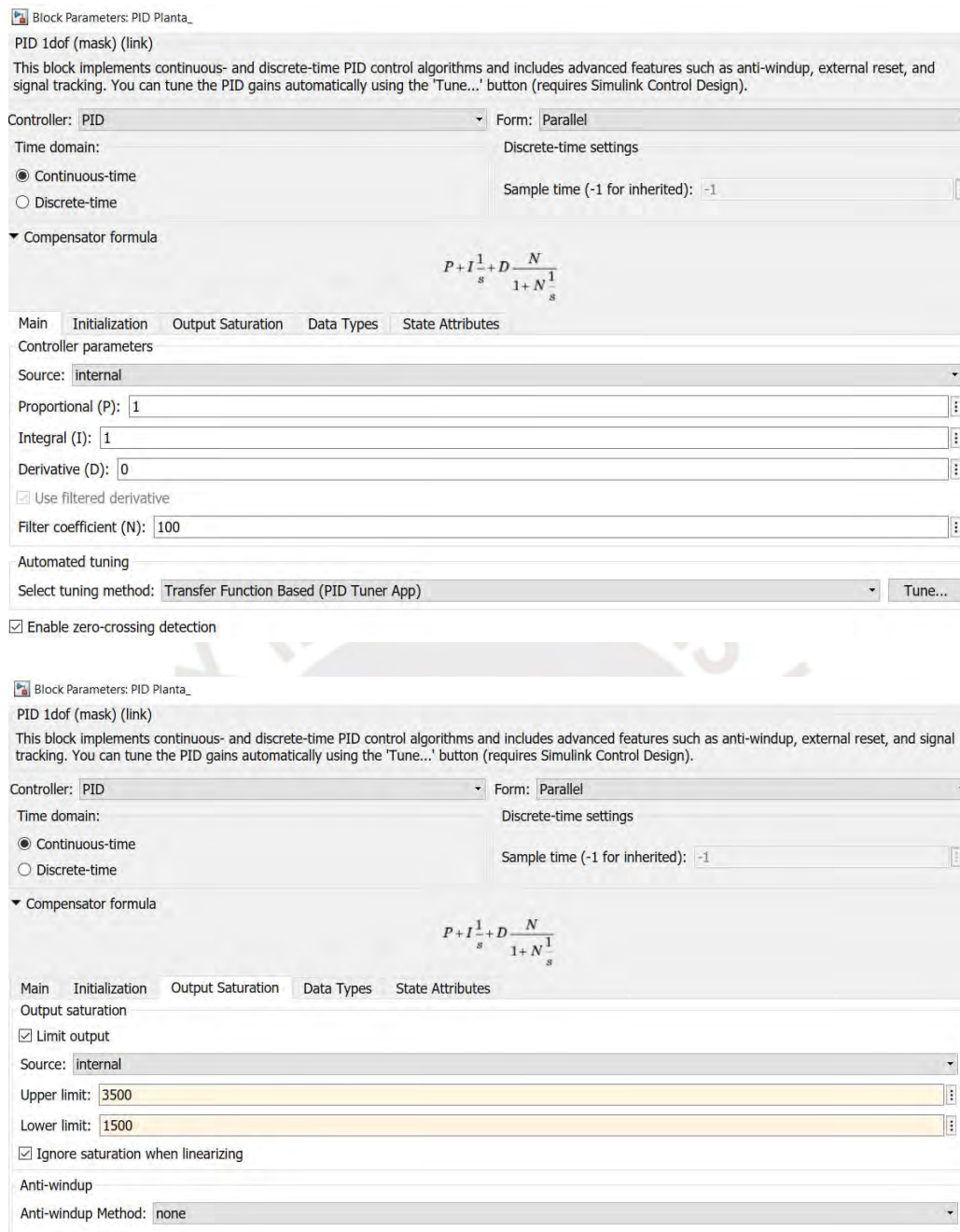
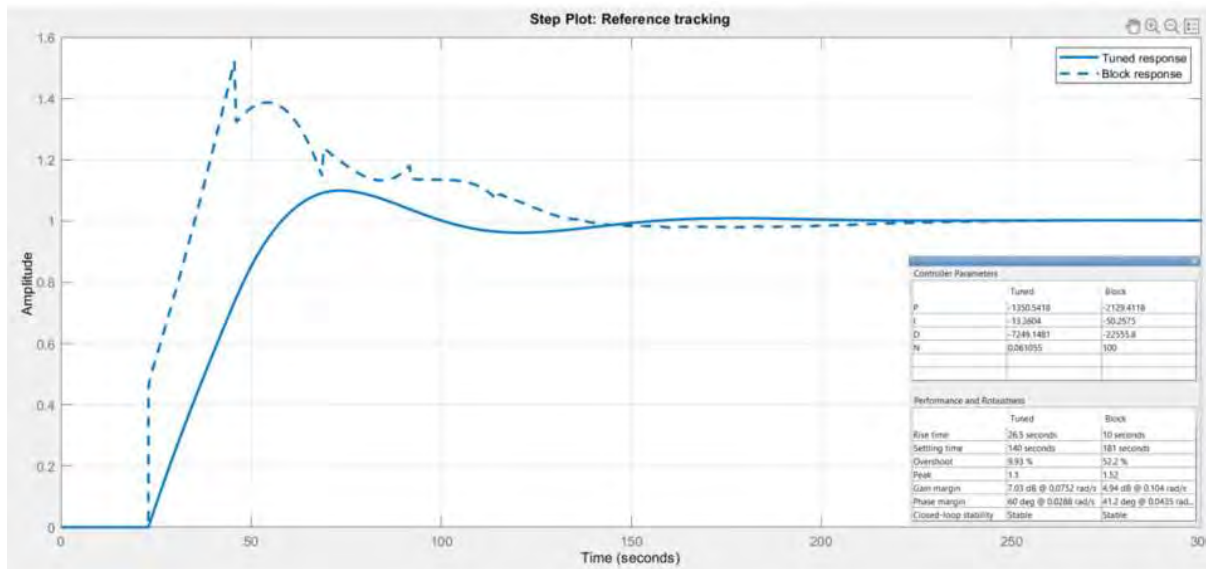


Figura 63. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Viajando Cargado.

Luego de aplicar el sintonizado automático para obtener los valores obtener los valores P, I, D partiendo de la sintonización Ziegler Nichols, se obtuvo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrada en la Figura 64.



Nota: Datos/Gráficos designados como "Block" corresponden a Sintonización Ziegler Nichols.

Figura 64. Respuesta al Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Viajando Cargado.

Donde la señal con línea entrecortada designada como "Block response" representa la respuesta inicial del sistema basada en la sintonización manual Ziegler Nichols y la señal en línea continua designada como "Tuned response" representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; esta última muestra un sobreimpulso menor al 10% y un tiempo de subida de 26,5 segundos lo cual es aceptable para este modo de trabajo, por lo que se procede a la simulación del sistema tomando condiciones iniciales obteniendo la respuesta mostrada en Figura 65; dicha repuesta es aceptable en términos del tiempo de descenso el cual es de 210 segundos.

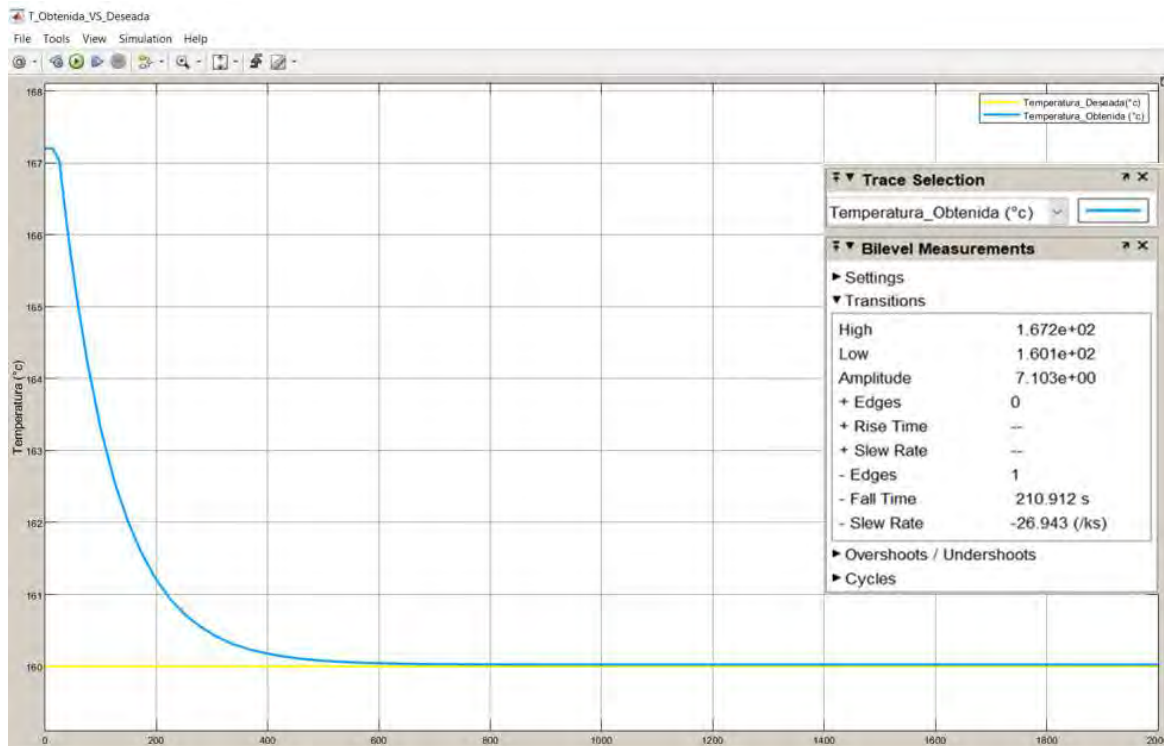


Figura 65. Simulación respuesta de PID para Planta en Modo Viajando Cargado

5.2.2 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Viajando Cargado.

Para encontrar las ganancias del controlador para la Velocidad del Ventilador para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Viajando Cargado, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 66.

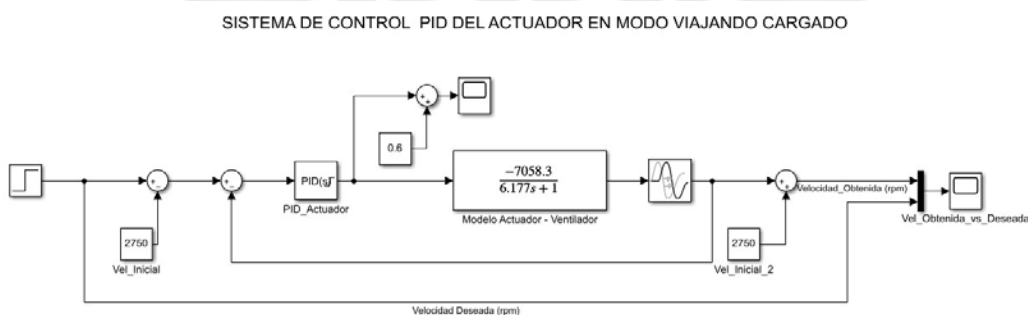


Figura 66. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Viajando Cargado

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 67, se recurre al sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa (D), partiendo de las ganancias encontradas mediante

la sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida mostradas en la segunda pantalla de la Figura 67.

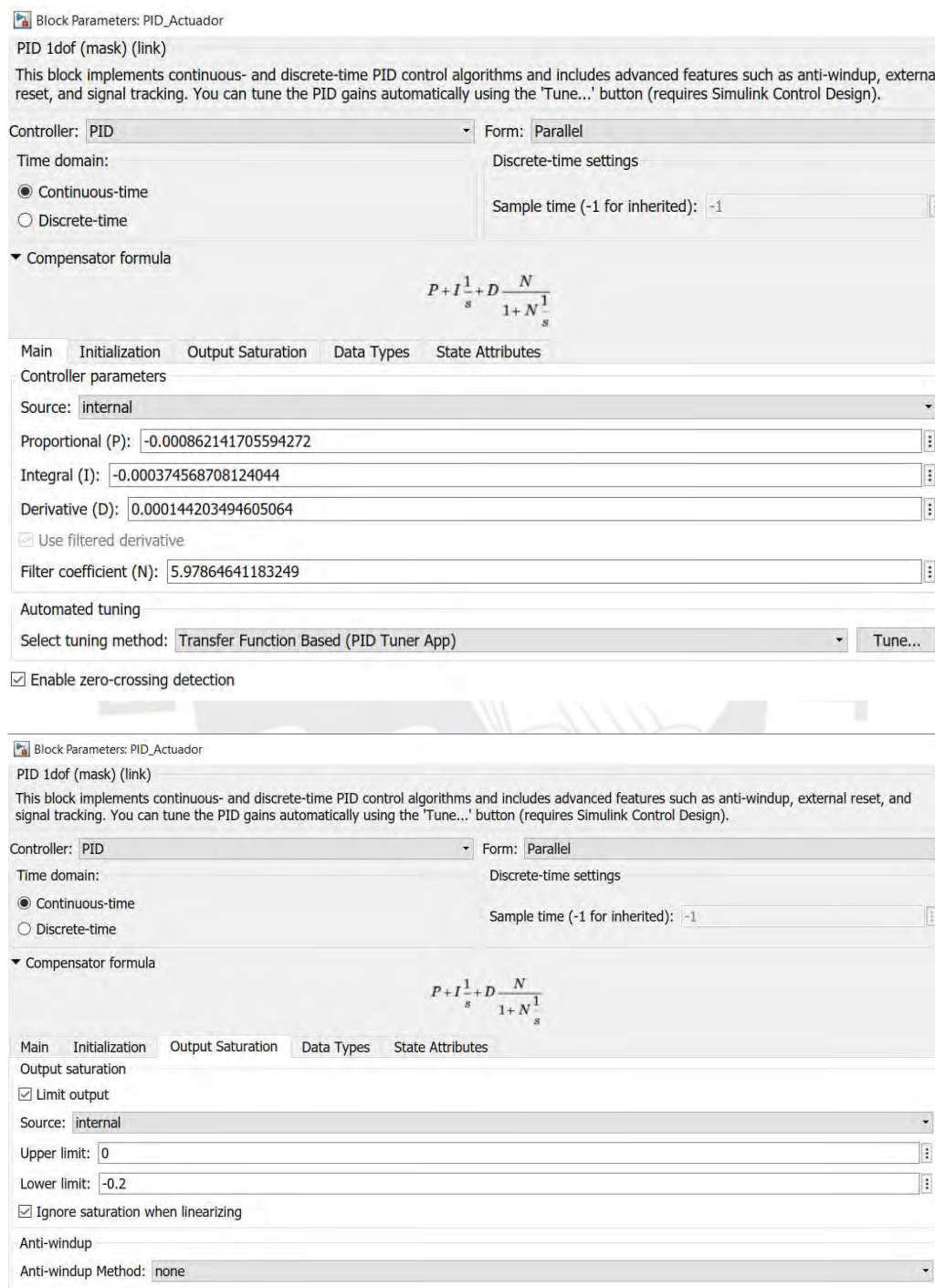
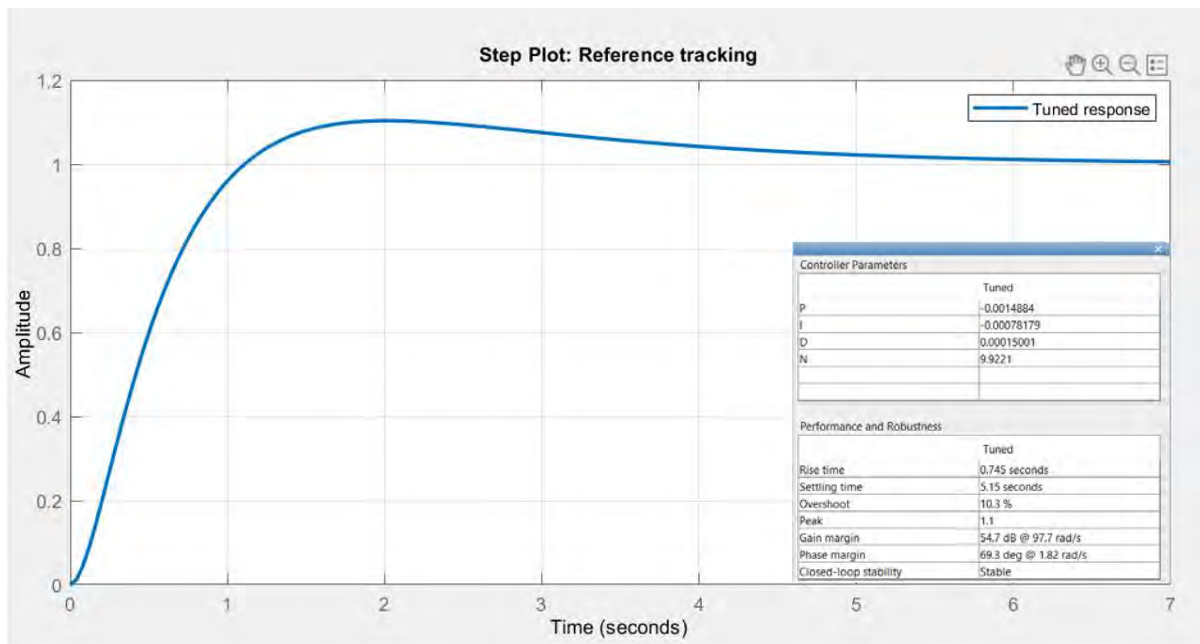


Figura 67. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Viajando Cargado

Obteniendo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrado en la

Figura 68; donde la sintonización manual de Ziegler Nichols resultó inestable.



Nota: No se muestra respuesta a ganancias PID obtenidas con Sintonización Ziegler Nichols por resultar inestable.

Figura 68. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuator en Modo Viajando Cargado.

Donde la señal en línea continua designada como “Tuned response” representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; esta última luego de realizar la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 69.



Figura 69. Simulación de Respuesta PID para Actuator en Modo Viajando Cargado

Finalmente se procedió a integrar los dos controladores para proceder con la simulación de ambos controladores en un arreglo cascada.

5.2.3 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Viajando Cargado.

Para modelar el controlador de la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC en arreglo cascada con un controlador de la Velocidad del Ventilador, para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Viajando Cargado, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 70.

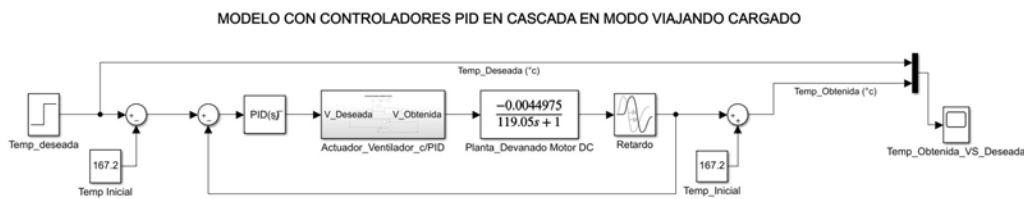


Figura 70. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Viajando Cargado.

Donde luego de correr la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 71, la cual es prácticamente idéntica a la respuesta del sistema en arreglo de retroalimentación simple en términos del tiempo de descenso igual a 211 segundos.

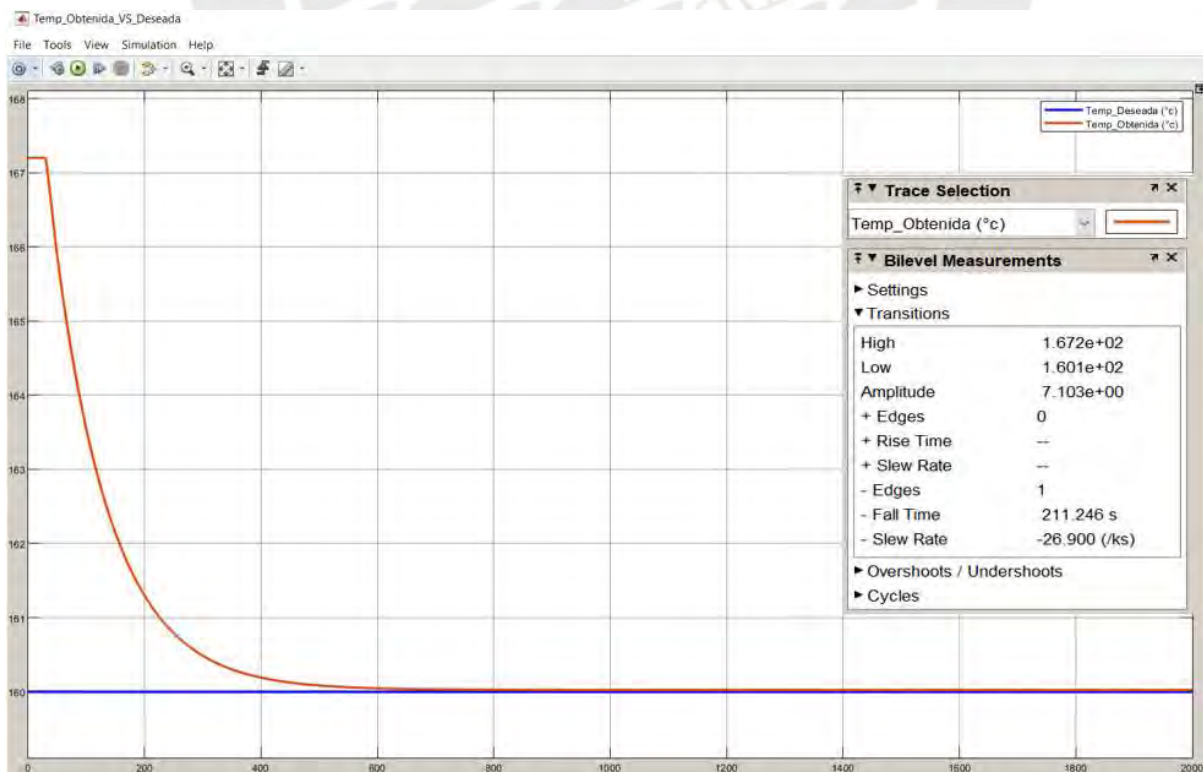


Figura 71. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Viajando Cargado

5.2.4 Sintonización y Simulación PID para la Planta Viajando Vacío.

Para encontrar las ganancias del controlador para la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC y luego proceder a simularlo, en modo de trabajo Viajando Vacío se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 72.

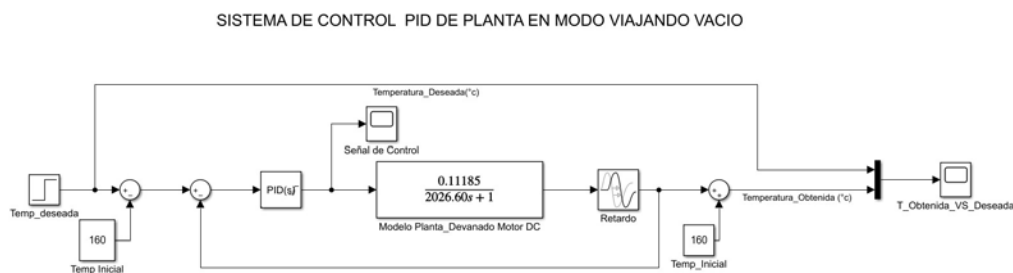


Figura 72. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Viajando Vacío

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 73, se recurre al sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa (D), partiendo de las ganancias encontradas mediante sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida mostrados en la segunda pantalla de la Figura 73.

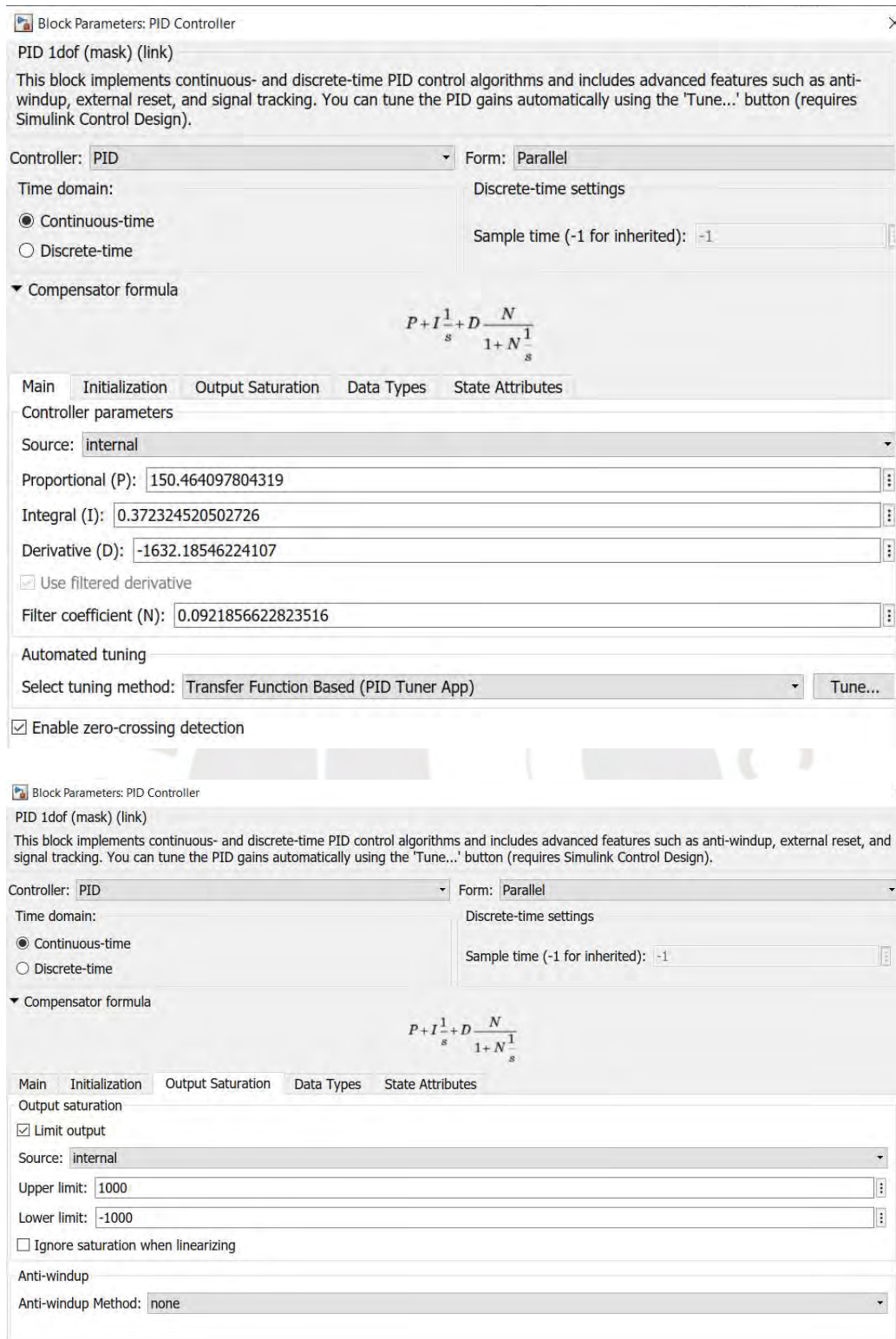


Figura 73. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Viajando Vacío

Luego de aplicar el sintonizado automático para obtener los valores obtener los valores P, I, D partiendo de la sintonización Ziegler Nichols, se obtuvo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrada en la Figura 74.

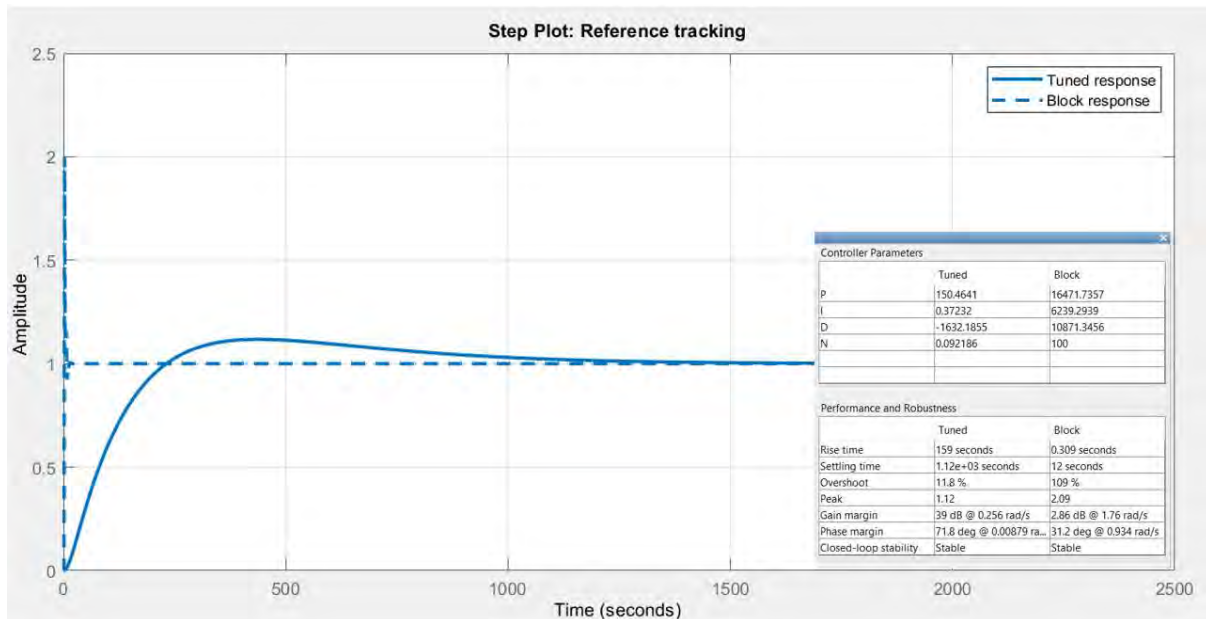


Figura 74. Respuesta Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Viajando Vacío.

Donde la señal con línea entrecortada designada como “Block response” representa la respuesta inicial del sistema basada en la sintonización manual Ziegler Nichols y la señal en línea continua designada como “Tuned response” representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; esta última respuesta muestra un sobreimpulso menor al 12% y un tiempo de subida de 159 segundos el cual es aceptable por el modo de trabajo actual; por lo que se procede a la simulación del sistema tomando condiciones iniciales obteniendo la respuesta mostrada en Figura 75; dicha repuesta es aceptable en términos del tiempo descenso el cual es de 232 segundos.

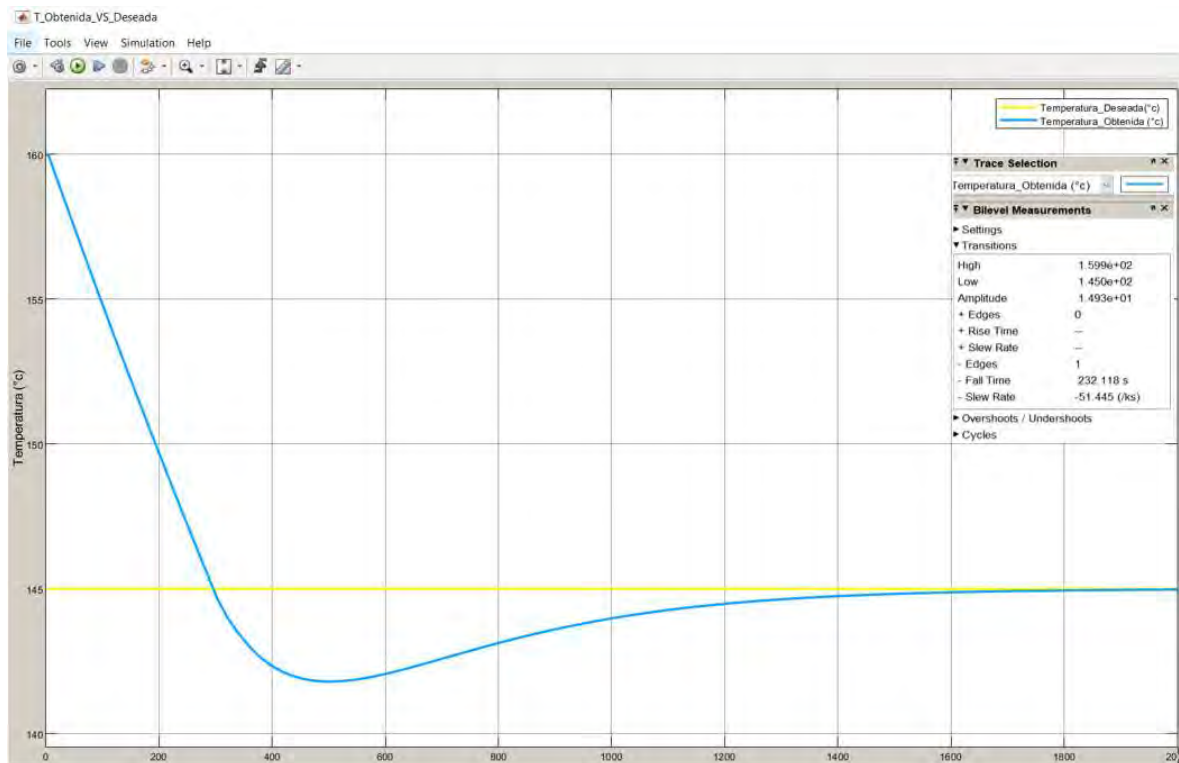


Figura 75. Simulación de Respuesta PID para Planta en Modo Viajando Vacío.

5.2.5 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Viajando Vacío

Para encontrar las ganancias del controlador para la Velocidad del Ventilador para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Viajando Vacío, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 76:

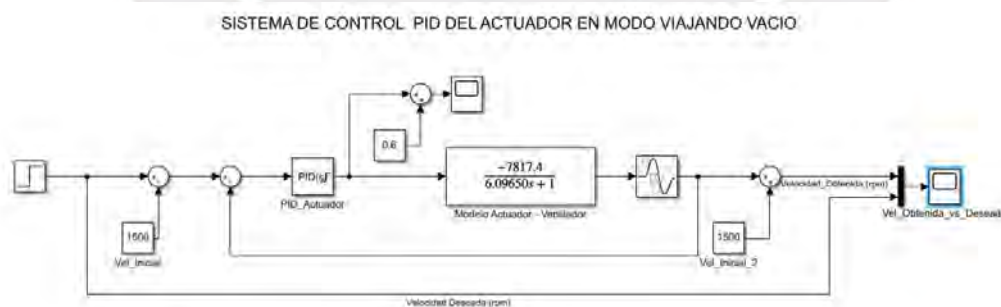


Figura 76. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Viajando Vacío

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 77, se procede a buscar las ganancias, Proporcional (P), Integral (I), y Derivativa (D); con el sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa(D), partiendo de las ganancias encontradas mediante la

sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida mostradas en la segunda pantalla de la Figura 77.

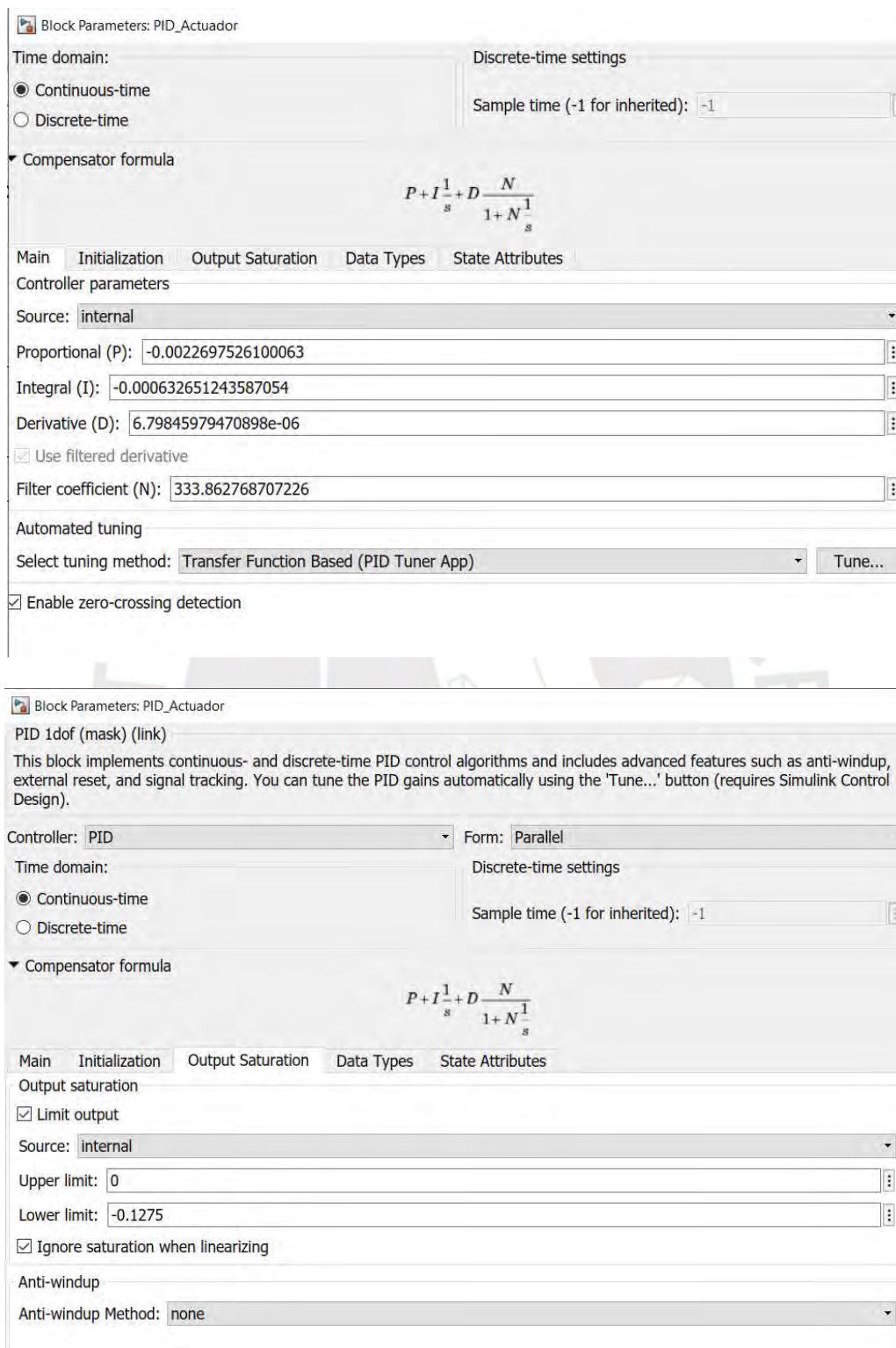
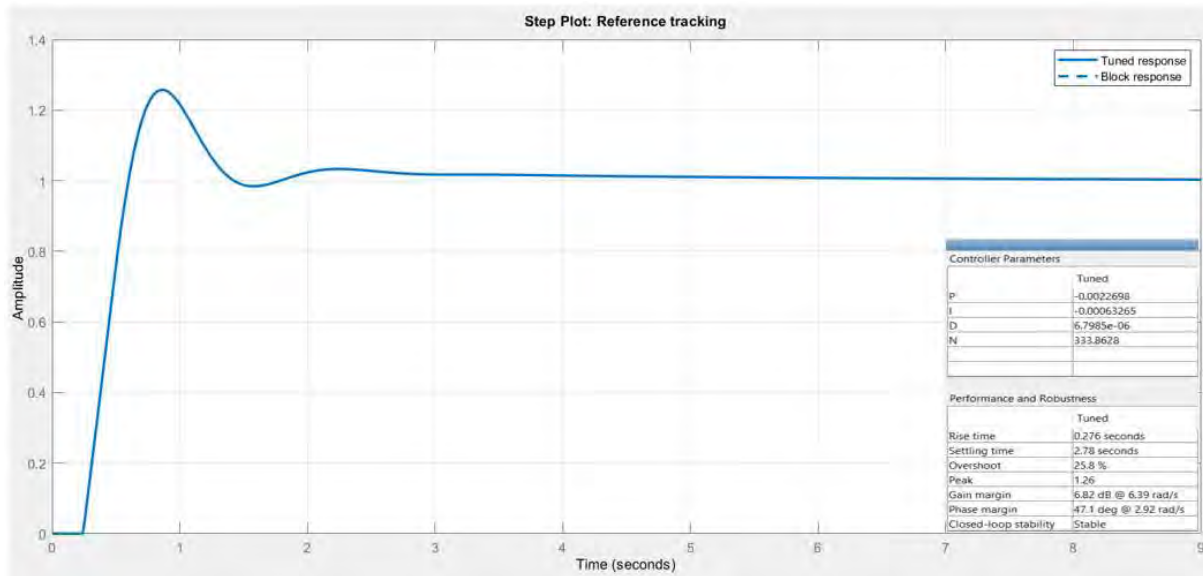


Figura 77. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Viajando Vacío

Obteniendo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrado en la Figura 78, donde la sintonización manual de Ziegler Nichols resultó inestable.



Nota: No se muestra respuesta a ganancias PID obtenidas con Sintonización Ziegler Nichols por resultar inestable.

Figura 78. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuator en Modo Viajando Vacío.

Donde la señal designada como “Block response” representa la respuesta inicial del sistema basada en la sintonización manual Ziegler Nichols, la cual no se muestra por haber resultado inestable; y la señal en línea continua designada como “Tuned response” representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; donde luego de realizar la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 79.

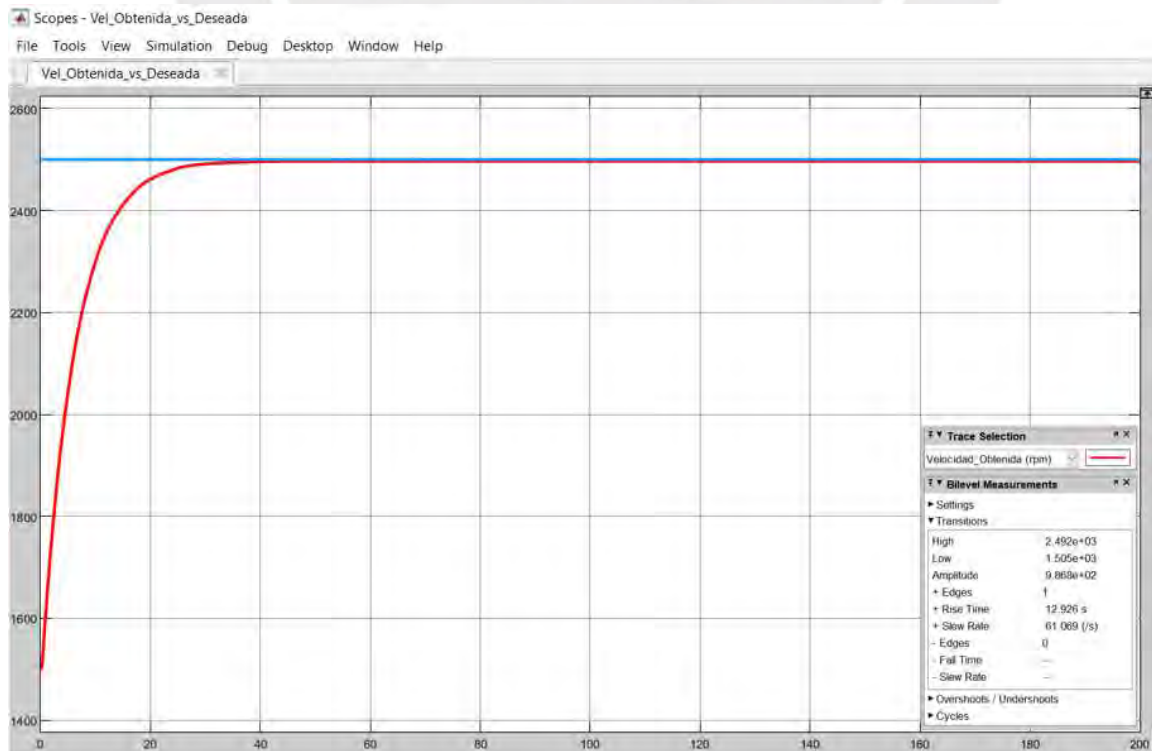


Figura 79. Simulación de Respuesta PID para Actuator en Modo Viajando Vacío.

Finalmente se procedió a integrar los dos controladores para proceder con la simulación de ambos controladores en un arreglo cascada.

5.2.6 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Viajando Vacío.

Para modelar el controlador de la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC en arreglo cascada con un controlador de la Velocidad del Ventilador, para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Viajando Vacío, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 80.

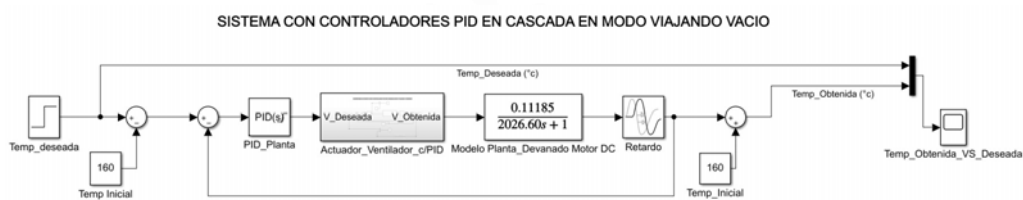


Figura 80. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Viajando Vacío.

Donde luego de correr la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 81, la cual es similar a la respuesta obtenida con el sistema de realimentación simple.

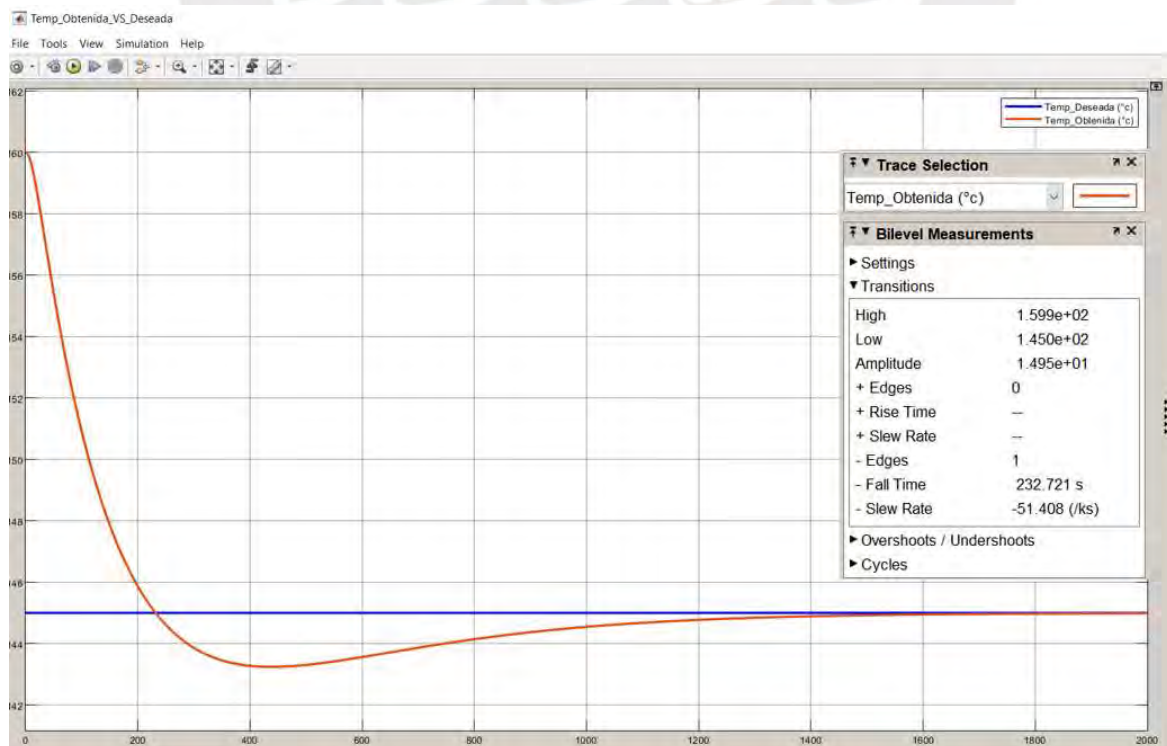


Figura 81. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Viajando Vacío

5.2.7 Sintonización y Simulación PID para la Planta Detenido.

Para encontrar las ganancias del controlador para la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC y luego proceder a simularlo, en modo de trabajo Detenido se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 82.

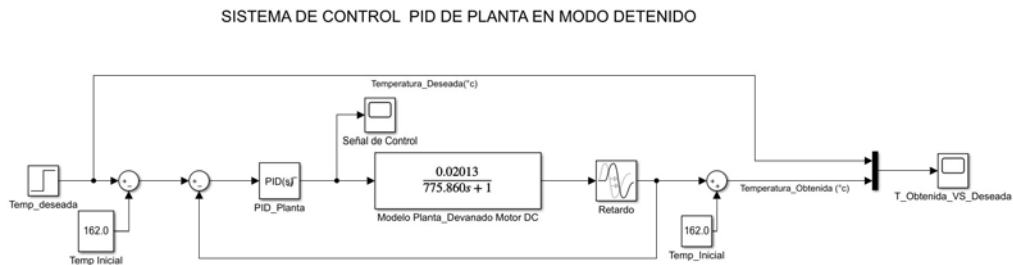


Figura 82. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Detenido

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 83, se recurre al sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa (D), partiendo de las ganancias encontradas mediante sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida mostrados en la segunda pantalla de la Figura 83.

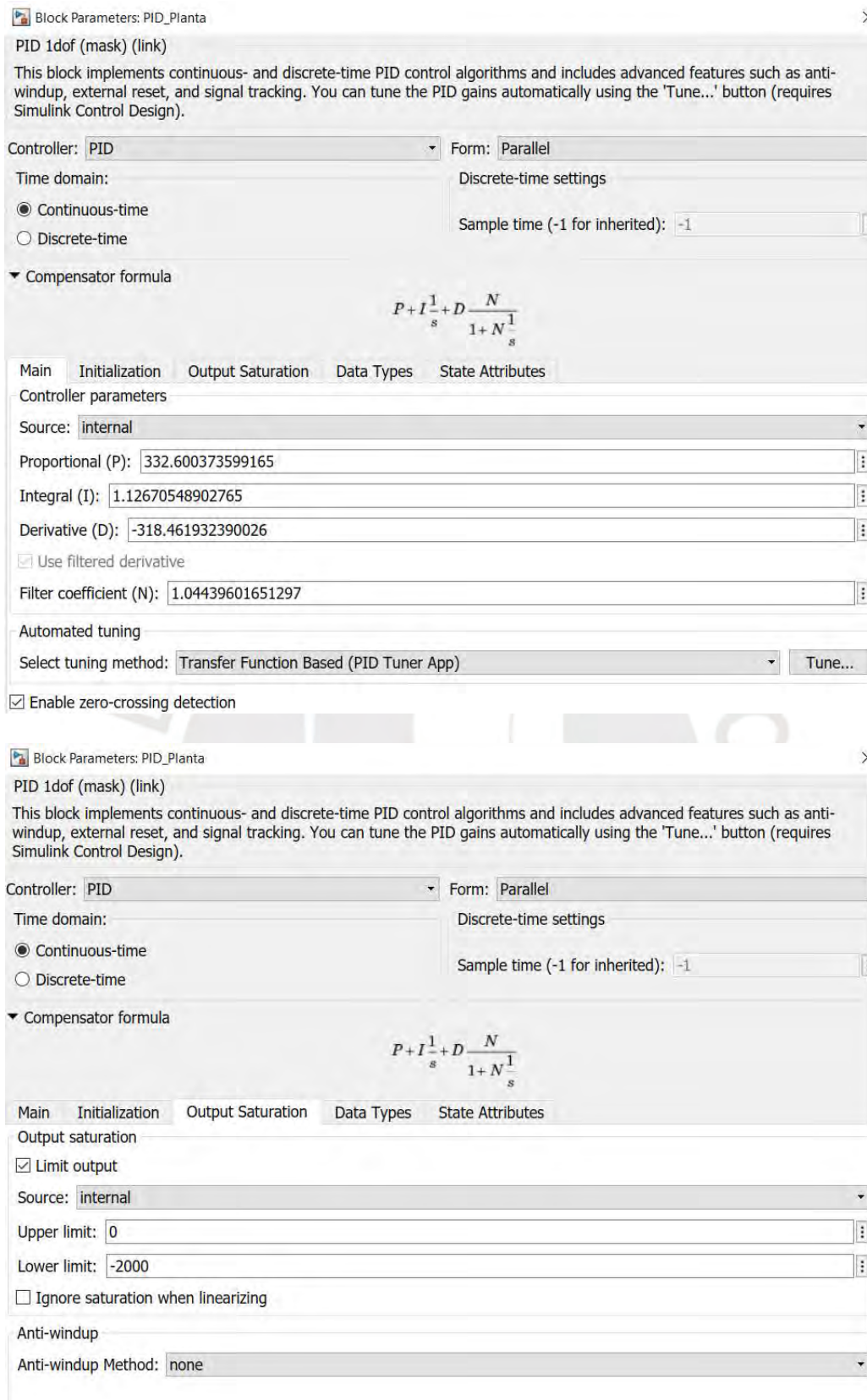


Figura 83. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Detenido.

Luego de aplicar el sintonizado automático para obtener los valores obtener los valores P, I, D partiendo de la sintonización Ziegler Nichols, se obtuvo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrada en la Figura 84.

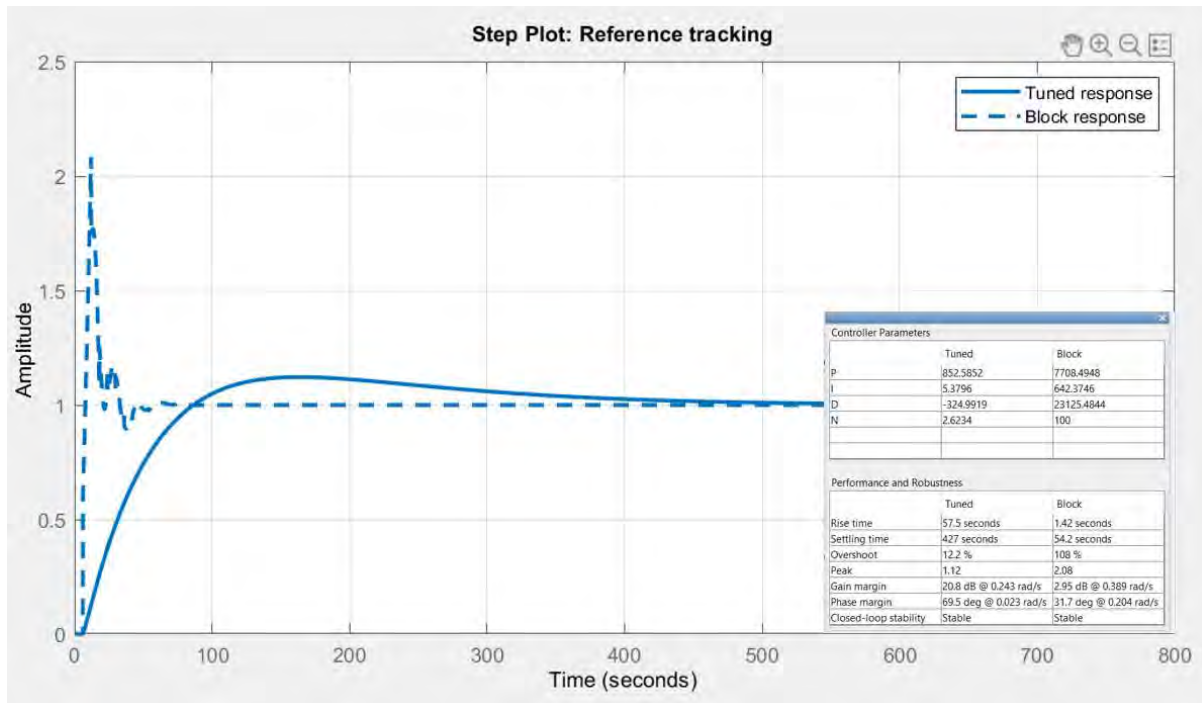


Figura 84. Respuesta Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Detenido.

Donde la señal con línea entrecortada designada como "Block response" representa la respuesta inicial del sistema basada en la sintonización manual Ziegler Nichols y la señal en línea continua designada como "Tuned response" representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; esta última respuesta muestra un sobreimpulso de 12% y un tiempo de subida de 57.5 segundos lo cual es alto; por lo que se buscará mejorarlo con el arreglo en cascada. Luego se muestra la simulación del sistema tomando condiciones iniciales obteniendo la respuesta mostrada en Figura 85; dicha respuesta es alta en términos del tiempo de descenso el cual es de 478 segundos; lo cual está explicado porque en condición detenido el motor de combustión interna se encuentra en su régimen mínimo y por ende el accionamiento hidráulico también está en su mínima capacidad.

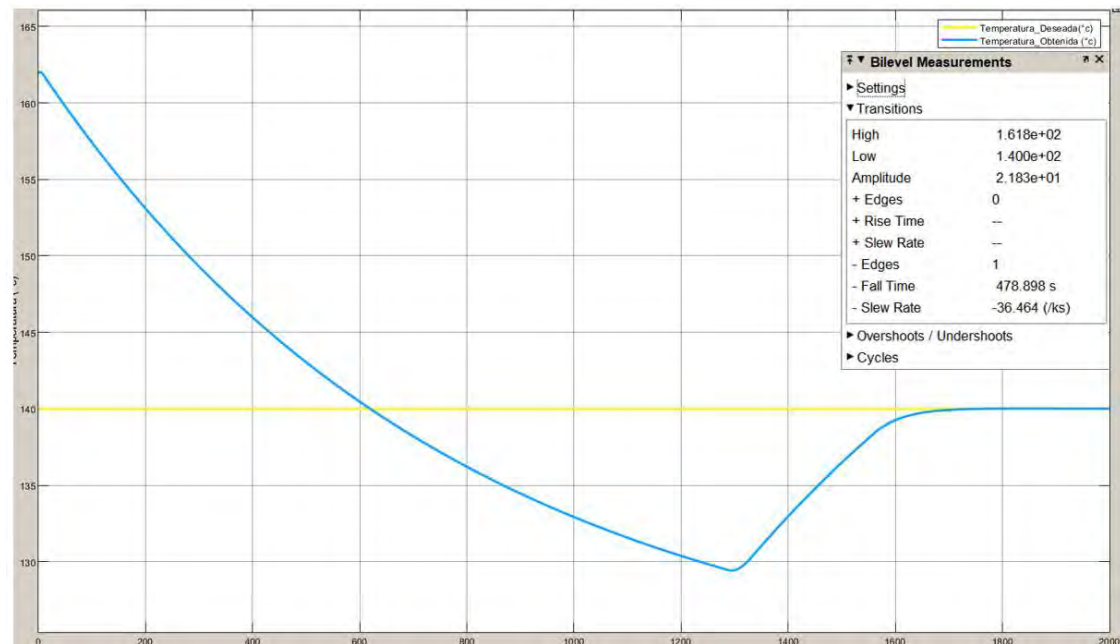


Figura 85. Simulación de Respuesta PID para Planta en Modo Detenido

En este caso se observa de la respuesta del sistema bajo el modo de trabajo Detenido es bastante lenta; lo cual es esperable debido a que el enfriamiento del sistema es limitado bajo condiciones de potencia hidráulica mínima.

5.2.8 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Detenido

Para encontrar las ganancias del controlador para la Velocidad del Ventilador para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Detenido, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 86.

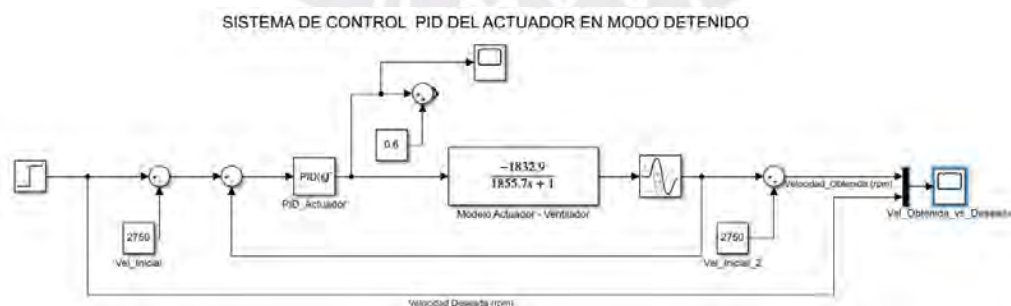


Figura 86. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Detenido

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 87, se procede a buscar las ganancias, Proporcional (P), Integral (I), y Derivativa (D); con el sintonizador

automático de Matlab-Simulink (Tune), partiendo de las ganancias encontradas mediante la sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida mostradas en la segunda pantalla de la Figura 87.

Block Parameters: PID_Actuador

PID 1dof (mask) (link)

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: **PID** Form: **Parallel**

Time domain:

Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited): **-1**

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: **internal**

Proportional (P): **-0.00936359851943254**

Integral (I): **-2.47019485167618e-05**

Derivative (D): **0.00853693516771967**

Use filtered derivative

Filter coefficient (N): **1.09683373897915**

Automated tuning

Select tuning method: **Transfer Function Based (PID Tuner App)** **Tune...**

Enable zero-crossing detection



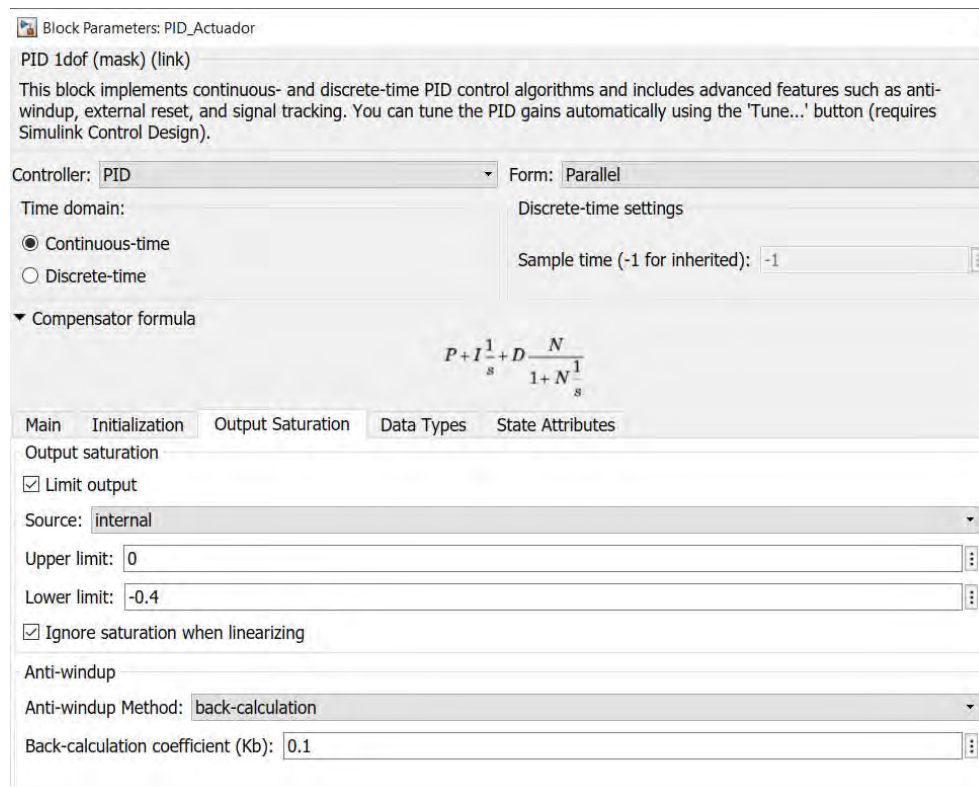
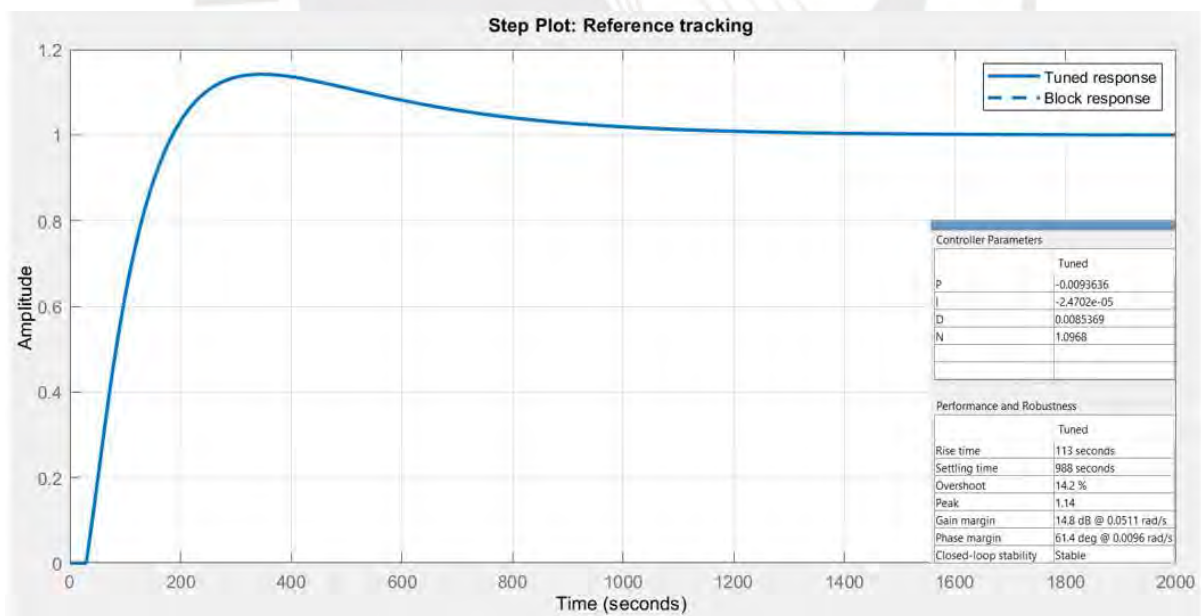


Figura 87. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Detenido

Obteniendo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrado en la Figura 88, donde la sintonización manual de Ziegler Nichols resultó inestable.



Nota: No se muestra respuesta a ganancias PID obtenidas con Sintonización Ziegler Nichols resultó inestable por ello no se muestra.

Figura 88. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuador en Modo Detenido.

Donde la señal designada como “Block response” representa la respuesta inicial del sistema basada en la sintonización manual Ziegler Nichols no se muestra por resultar inestable

y la señal en línea continua designada como “Tuned response” representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; donde luego de realizar la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 89, la cual tiene un tiempo de establecimiento bastante alto explicable por el hecho de que en este modo de trabajo el motor de combustión se mantiene en mínimas revoluciones y por ende también el motor hidráulico del ventilador.

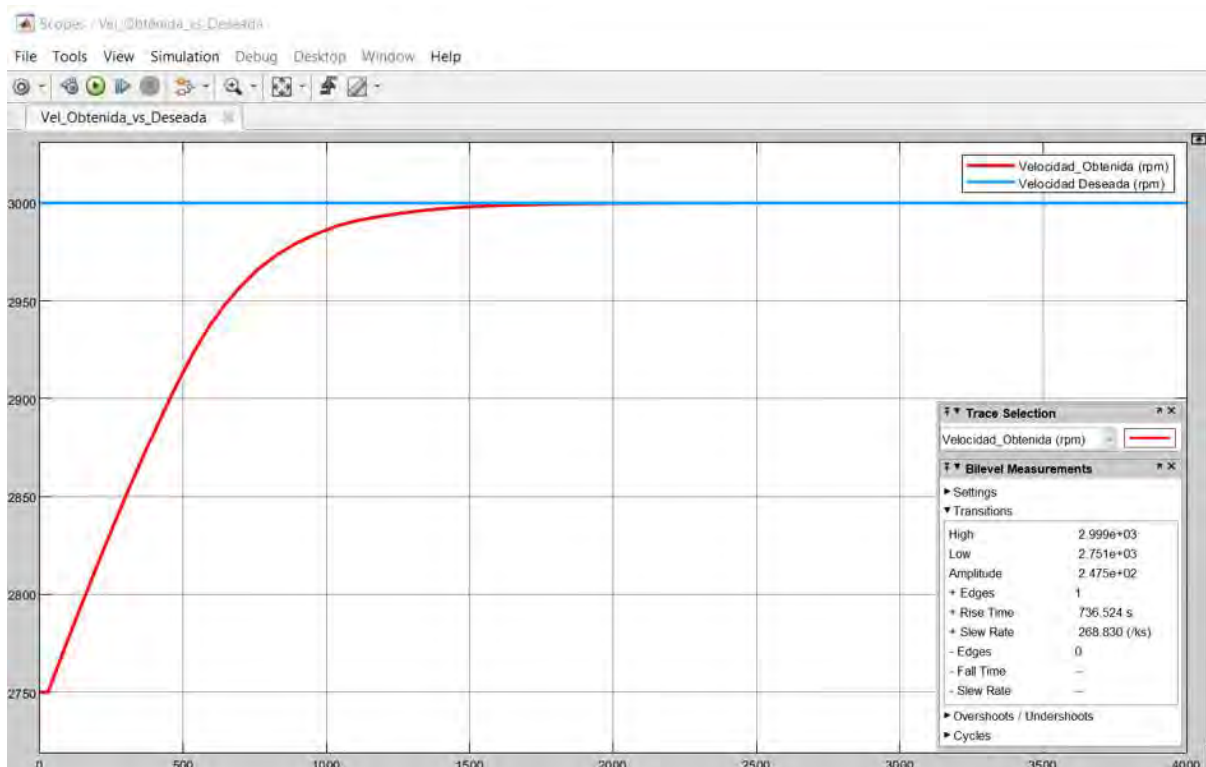


Figura 89. Simulación de Respuesta PID para Actuador en Modo Detenido

Finalmente se procedió a integrar los dos controladores para proceder con la simulación de ambos controladores en un arreglo cascada.

5.2.9 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Detenido.

Para modelar el controlador de la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC en arreglo cascada con un controlador de la Velocidad del Ventilador, para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Detenido, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 90.

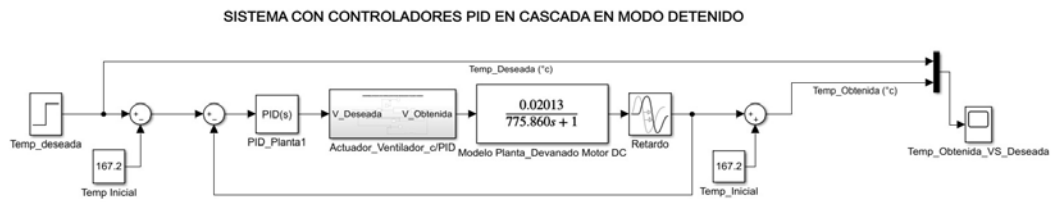
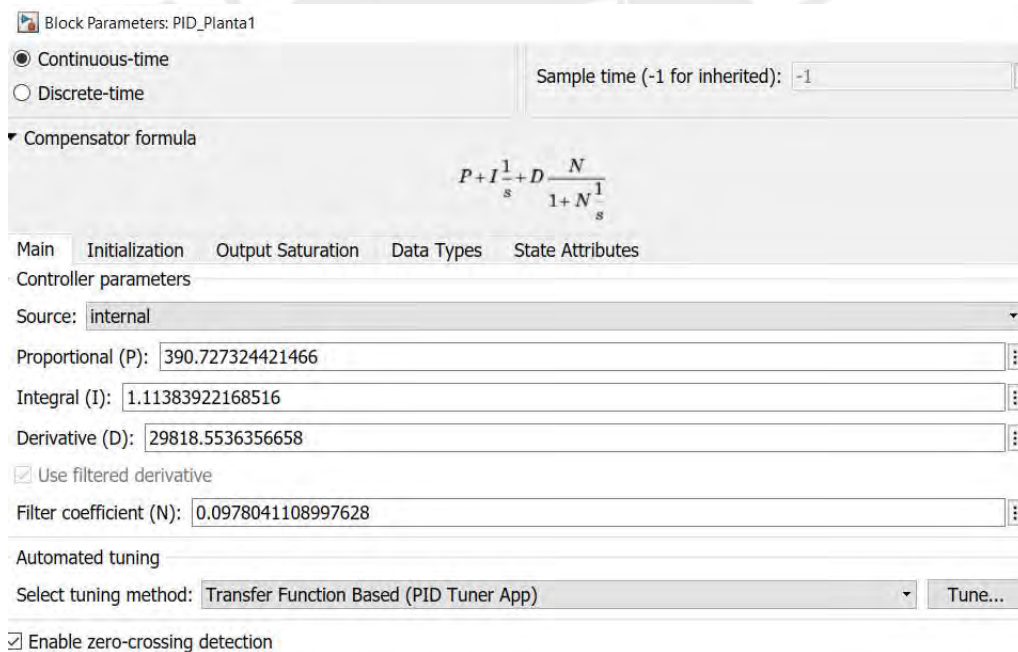


Figura 90. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Detenido.

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 91, se recurre al sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa (D), partiendo de las ganancias encontradas en la configuración retroalimentada; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida de la siguiente manera.



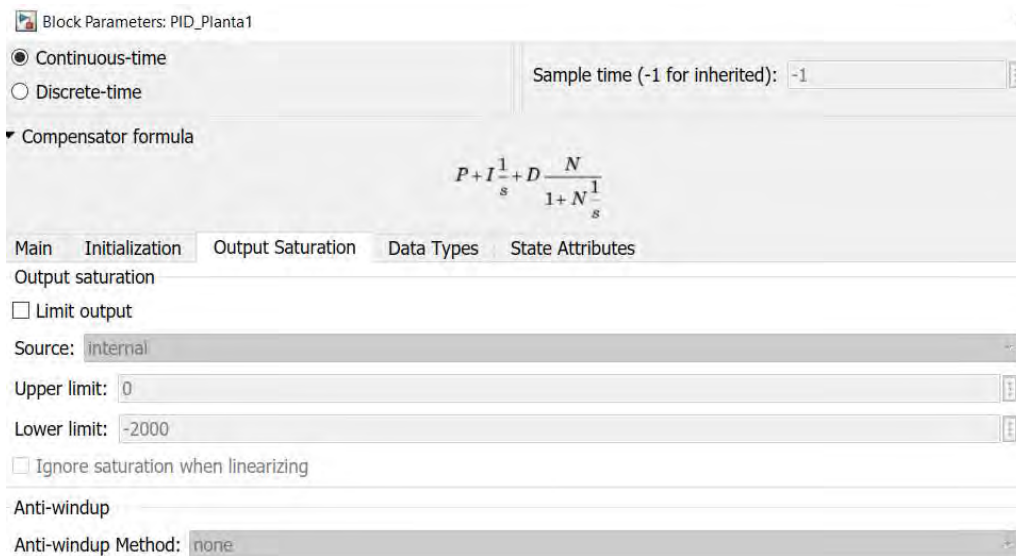
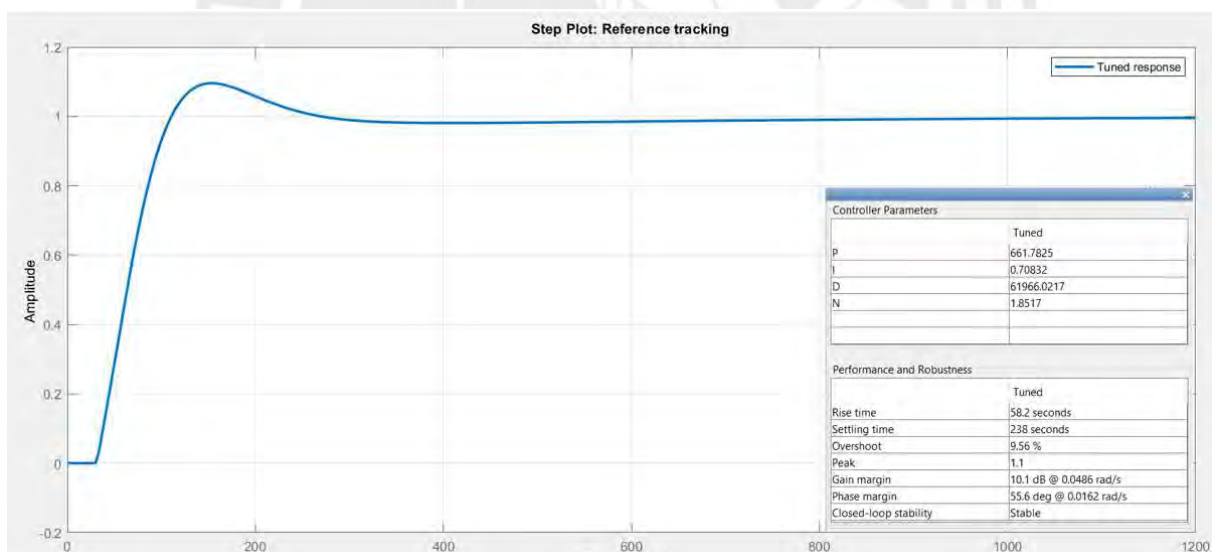


Figura 91. Configuración/Sintonización de PID para Sistema Cascada en Modo Detenido

Obteniendo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrado en la Figura 92 donde la sintonización en la configuración retroalimentada resultó inestable, por lo que requirió aplicar la sintonización automática nuevamente.



Nota: No se muestra respuesta a ganancias PID obtenidas con Sintonización Ziegler Nichols resultó inestable por ello no se muestra.

Figura 92. Respuesta Escalón Unitario de PID para sistema Cascada en Modo Detenido.

Donde la señal en línea continua designada como “Tuned response” representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; donde luego de correr la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 93 cuyos

tiempos de desempeño son bastante mejores a los mostrados en la configuración retroalimentada pasando de 427 a 107 segundos.

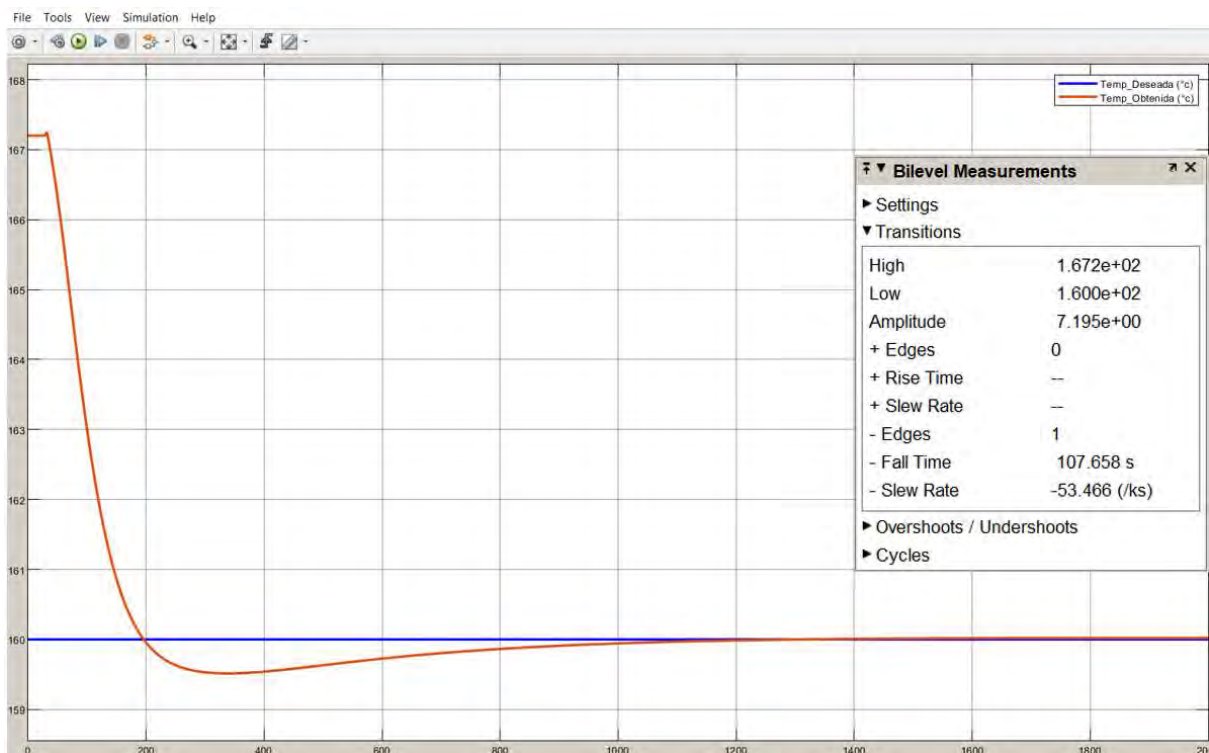


Figura 93. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Detenido

5.2.10 Sintonización y Simulación PID para la Planta Bajando Vacío.

Para encontrar las ganancias del controlador para la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC y luego proceder a simularlo en modo de trabajo Bajando Vacío, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 94.

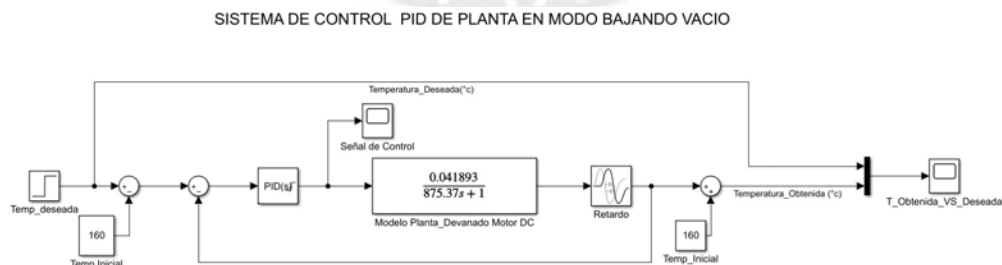


Figura 94. Modelo Simulink para PID de Planta en Modo Bajando Vacío

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 95, se recurre al sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa(D), partiendo de las ganancias encontradas mediante la sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida mostrados en la segunda pantalla de la Figura 95.

Block Parameters: PID Controller

PID 1dof (mask) (link)

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:

Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 409.675595595157

Integral (I): 2.29110308829654

Derivative (D): -176.190782240244

Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 2.32518177390544

Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

Enable zero-crossing detection

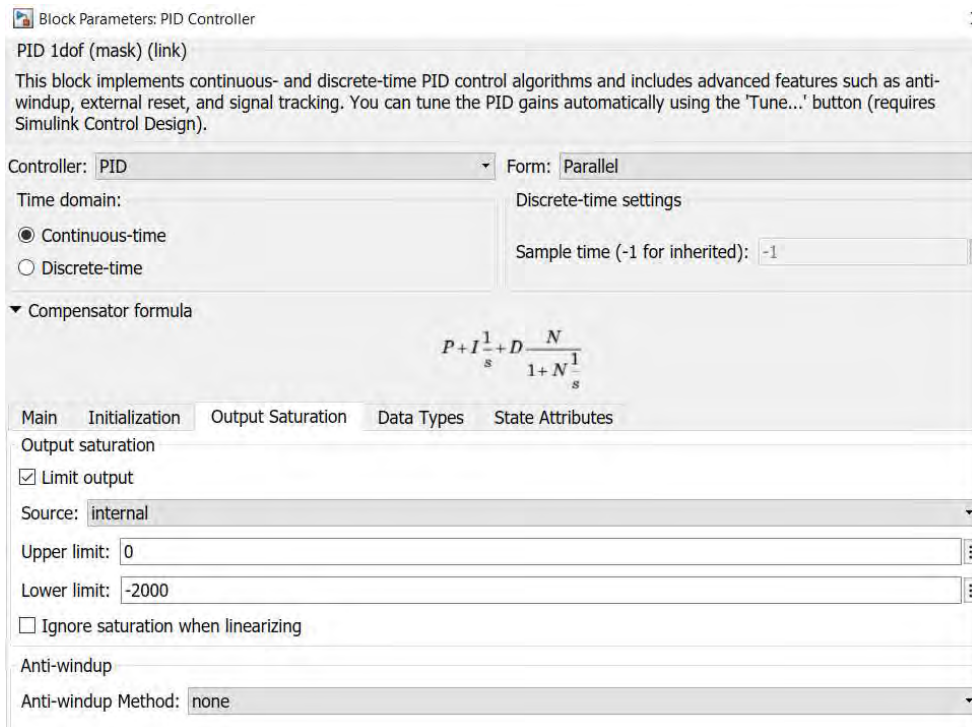


Figura 95. Configuración/Sintonización de PID para Planta en Modo Bajando Vacío

Luego de aplicar el sintonizado automático para obtener los valores obtener los valores P, I, D partiendo de la sintonización Ziegler Nichols, se obtuvo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrada en la Figura 96.

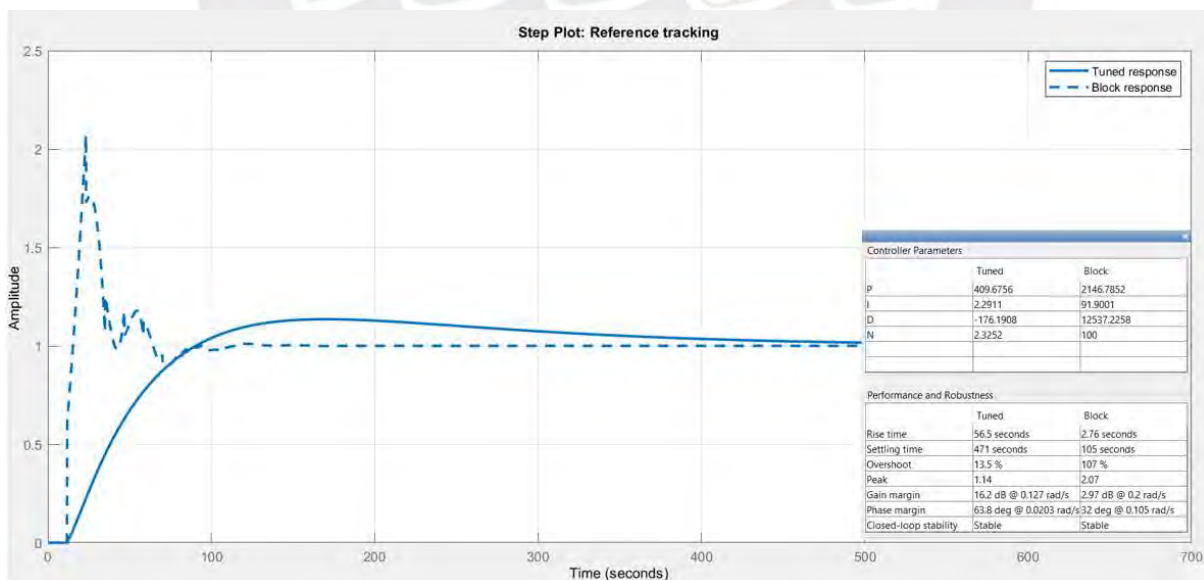


Figura 96. Respuesta Escalón Unitario de PID para Planta en Modo Bajando Vacío.

Donde la señal con línea entrecortada designada como “Block response” representa la respuesta inicial del sistema basada en la sintonización manual Ziegler Nichols y la señal en

línea continua designada como “Tuned response” representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; esta última muestra un sobreimpulso de 13% y un tiempo de establecimiento de subida de 56.5 segundos aceptable, por lo que se procede a la simulación del sistema tomando condiciones iniciales obteniendo la respuesta mostrada en Figura 97; dicha repuesta es aceptable en términos del tiempo requerido para alcanzar el valor de referencia; además de considerar que la respuesta es lenta pues en este modo de trabajo el equipo está yendo con regímenes de trabajo del motor de combustión menores ocurriendo lo mismo con el accionamiento hidráulico.

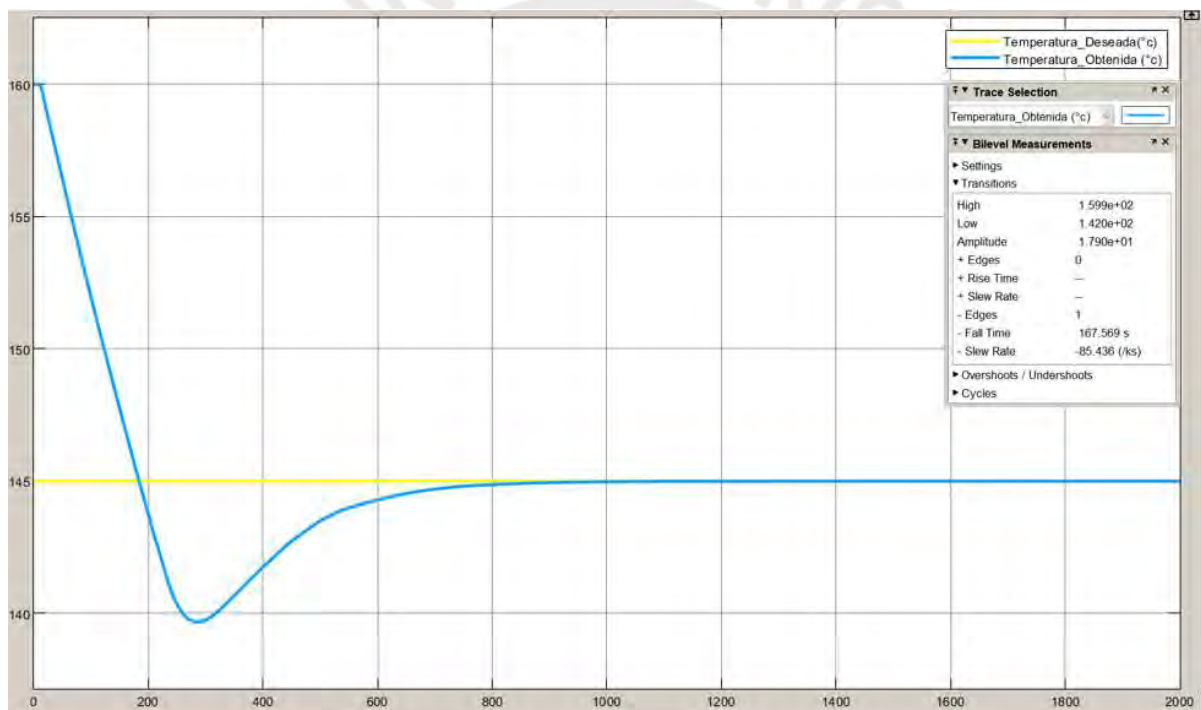


Figura 97. Simulación de Respuesta PID para Planta en Modo Bajando Vacío

5.2.11 Sintonización y Simulación PID para el Actuador Bajando Vacío

Para encontrar las ganancias del controlador para la Velocidad del Ventilador para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Bajando Vacío, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 98:

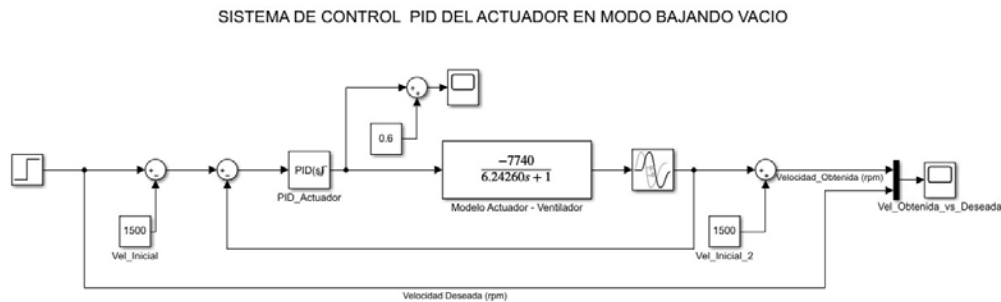
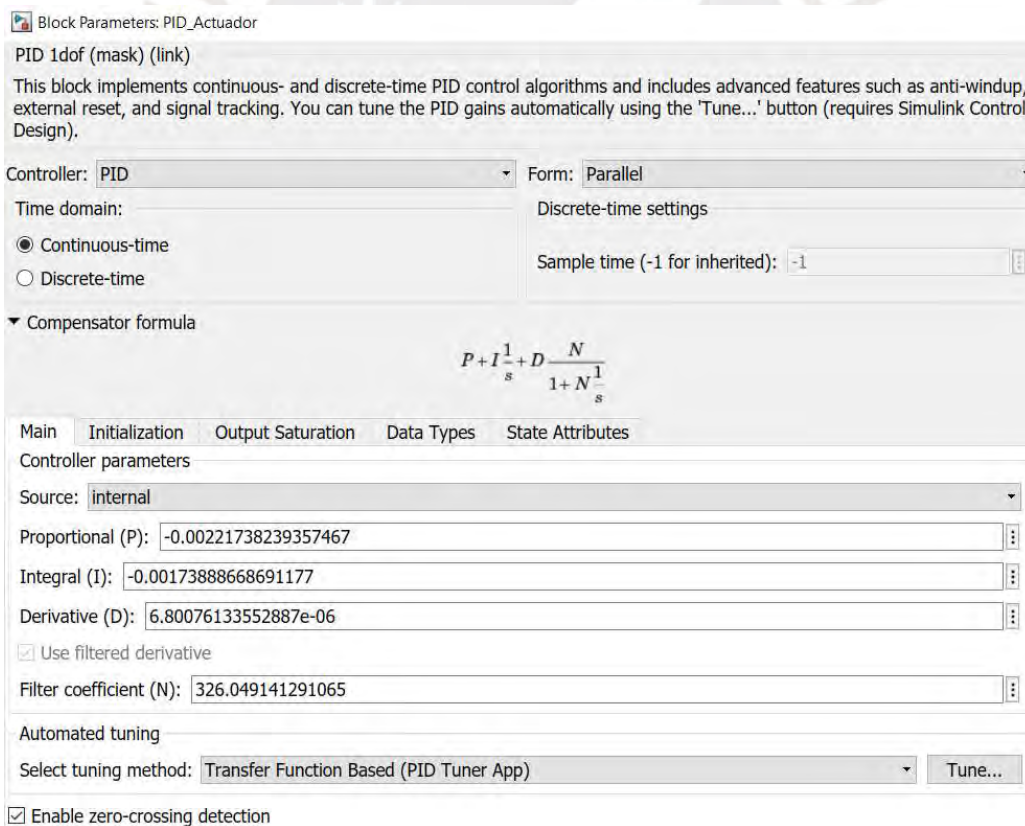


Figura 98. Modelo Simulink para PID de Actuador en Modo Bajando Vacío

Donde a partir del bloque PID cuyas pantallas se muestran en la Figura 99, se recurre al sintonizador automático de Matlab-Simulink (Tune) para encontrar los valores de las ganancias Proporcional (P); Integral (I); y Derivativa (D), partiendo de las ganancias encontradas mediante la sintonización Ziegler Nichols; vale la pena destacar que se consideró también los límites de saturación de la señal de salida de la mostradas en la segunda pantalla de la Figura 99.



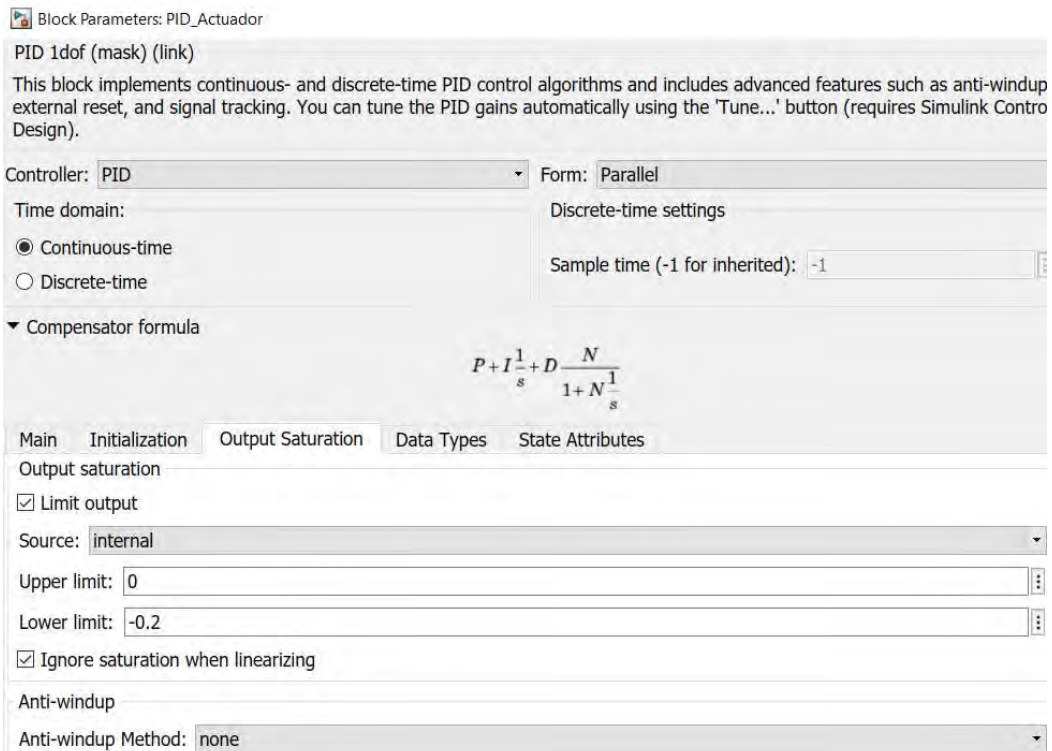
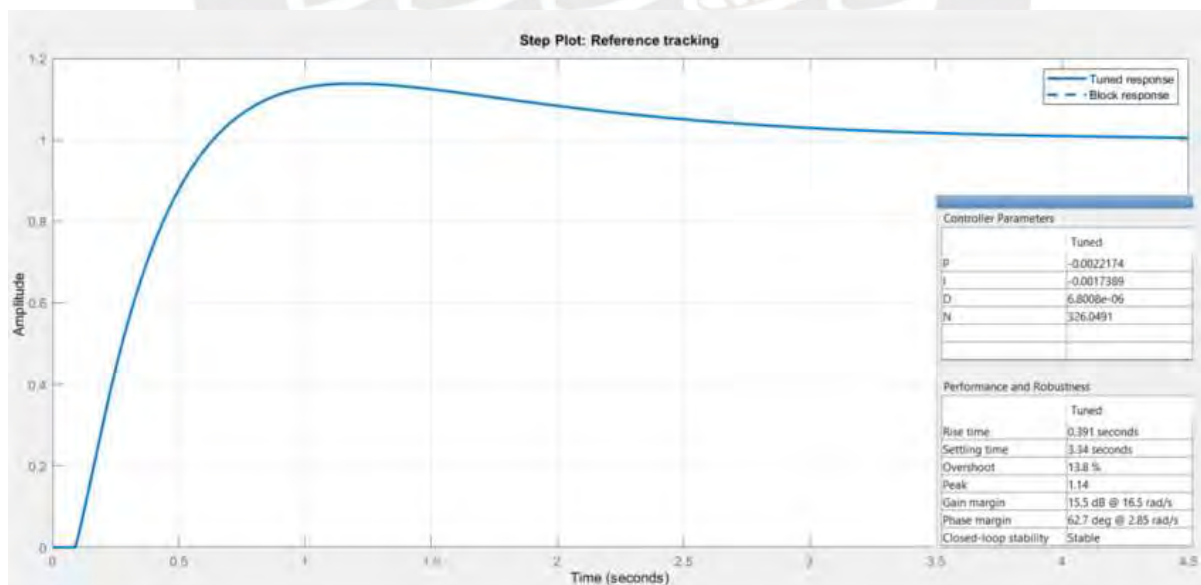


Figura 99. Configuración/Sintonización de PID para Actuador en Modo Bajando Vacío Obteniendo la respuesta del sistema retroalimentado al escalón unitario mostrada en la Figura 100; donde se observa que la sintonización manual de Ziegler Nichols resultó inestable.



Nota: No se muestra respuesta a ganancias PID obtenidas con Sintonización Ziegler Nichols resultó inestable por ello no se muestra.

Figura 100. Respuesta Escalón Unitario de PID para Actuador en Modo Bajando Vacío.

Donde la señal designada como “Block response” representa la respuesta inicial del sistema basada en la sintonización manual Ziegler Nichols la cual no se muestra porque la

respuesta resultó inestable; y la señal en línea continua designada como “Tuned response” representa la respuesta luego de aplicar el sintonizador automático; donde luego de realizar la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 101.

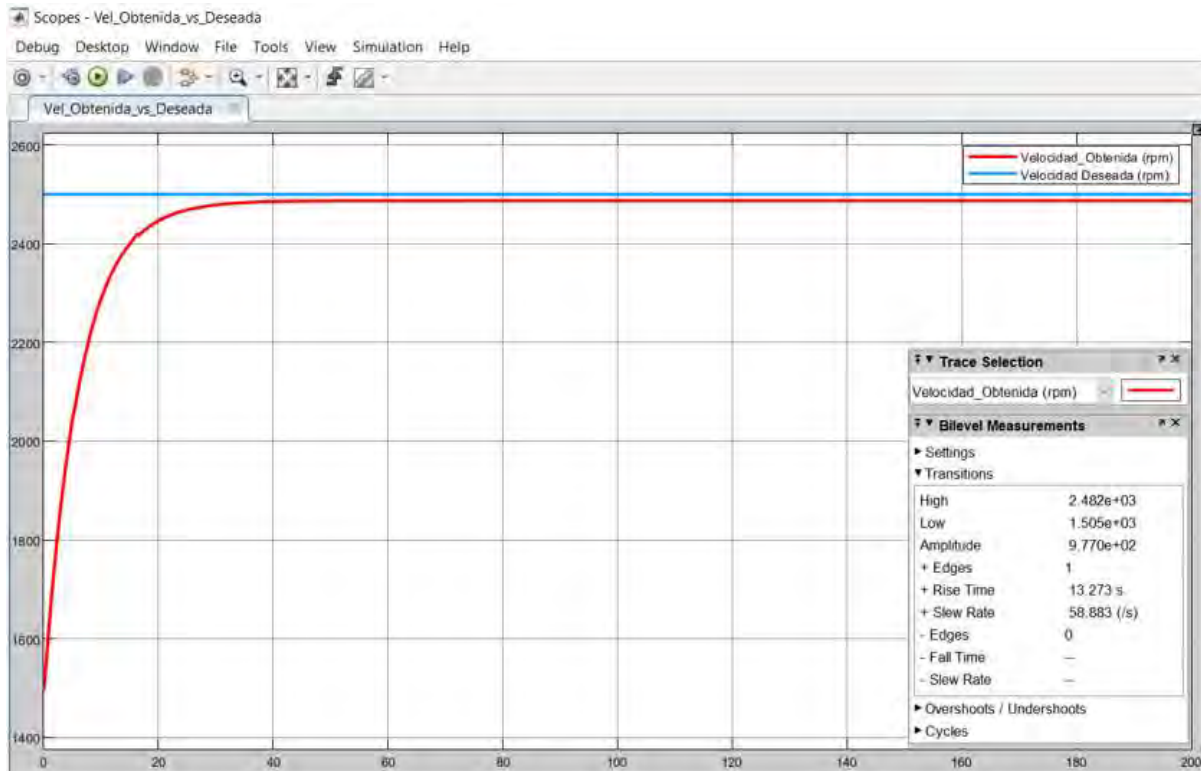


Figura 101. Simulación de Respuesta PID para Actuador en Modo Bajando Vacío

Finalmente se procedió a integrar los dos controladores para proceder con la simulación de ambos controladores en un arreglo cascada.

5.2.12 Simulación de Sistema de Control PID en Cascada Bajando Vacío.

Para modelar el controlador de la Temperatura del Devanado del motor eléctrico DC en arreglo cascada con un controlador de la Velocidad del Ventilador, para luego proceder a simularlo en modo de trabajo Bajando Vacío, se construyó el modelo Simulink mostrado en la Figura 102.

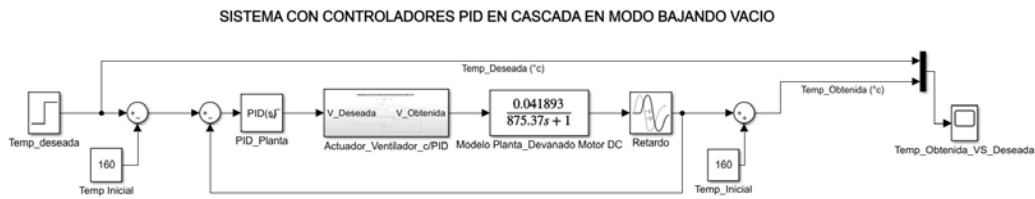


Figura 102. Modelo Simulink para PIDs en Cascada en Modo Bajando Vacío.

Donde luego de correr la simulación considerando condiciones iniciales se obtuvo la respuesta mostrada en la Figura 103, la cual es prácticamente idéntica a la respuesta del sistema en arreglo de retroalimentación simple en términos del tiempo de descenso igual a 306 segundos.

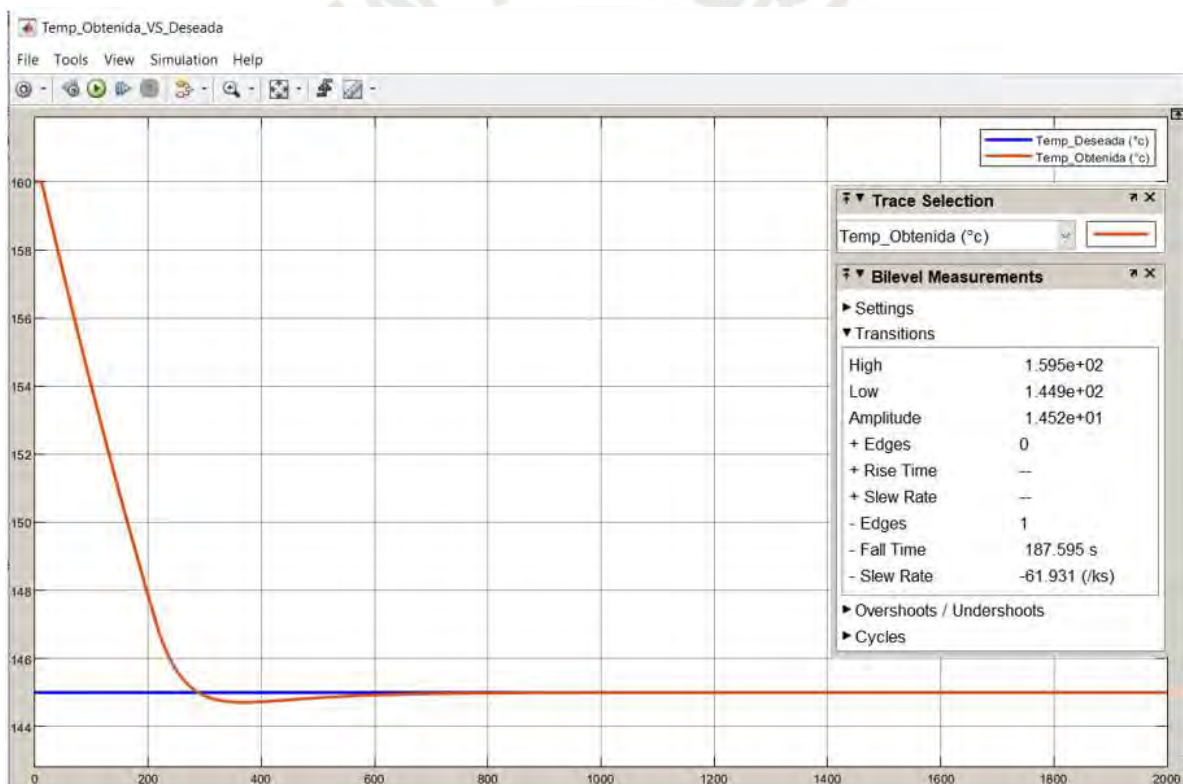


Figura 103. Simulación de Respuesta PIDs en Cascada en Modo Bajando Vacío

5.3. Resumen de Controladores por Modo de Trabajo

Luego de realizar la sintonización de los controladores PID por cada modo de trabajo, tomando un lazo de control solamente para la Planta (motor eléctrico de tracción de inducción), se observa en la Tabla 17 que las ganancias del controlador son significativamente distintas

para cada uno de dichos modos; lo cual confirmaría la no linealidad del sistema y por ende la necesidad de controladores distintos alrededor de diversos puntos de operación. En cuanto a las ganancias PID para el lazo de control solamente para el Actuador (motor hidráulico y ventilador), se observa también en la Tabla 17 que las ganancias son parecidas para todos los modos de trabajo excepto para el modo Detenido; lo cual demostraría que a pesar de que el comportamiento del actuador es más lineal también presenta comportamientos diferentes alrededor de diversos puntos de operación. Finalmente, el arreglo en cascada en modo de trabajo Detenido requirió calcular nuevas ganancias PID.

SINTONIZACION CONTROLADORES		MODOS DE TRABAJO			
		Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Sistema Control PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	G. Proporcional [P]	-1350.5418	150.4641	852.5852	409.6756
	G. Integral [I]	-13.3604	0.3723	5.3796	2.2911
	G. Derivativa [D]	-7449.1481	-1632.1850	-324.9919	-176.1908
	Filter [N]	0.061055	0.9219	2.6234	2.3252
Sistema Control ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)	G. Proporcional [P]	-0.0015	-0.0023	-0.0094	-0.0022
	G. Integral [I]	-0.0008	-0.0006	-0.0002	-0.0017
	G. Derivativa [D]	0.0002	0.0000	0.0085	0.0000
	Filter [N]	9.9221	333.8628	1.0968	326.0480
Sistema Control CASCADA (Temperatura Vs Solenoide)	G. Proporcional [P]			661.7825	
	G. Integral [I]			0.7083	
	G. Derivativa [D]			61966.0200	
	Filter [N]	9.9221	333.8628	1.0968	326.0480

Tabla 17. Resumen de Sintonización Automática de Controladores por Modo de Trabajo.

En cuanto a la respuesta al escalón unitario de los controladores hallados para los cuatro modos de trabajo en términos del Tiempo de Subida y del Tiempo de Establecimiento para el sistema de control de Planta, se puede observar en la Tabla 18 que el mejor desempeño se obtiene en el modo Viajando Cargado, seguido por Bajado Vacío, Viajando Vacío y Detenido; en cuanto a la respuesta del Actuador en términos de los mismos indicadores mencionados se observa también en la Tabla 18 que el modo Viajando Vacío es el que tiene mejor desempeño posee, seguido de Bajando Vacío, Viajando Cargado y Detenido.

RESPUESTA AL ESCALON UNITARIO		MODOS DE TRABAJO			
		Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Sistema Control PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	Tiempo Subida [seg] Rise Time*	26.4000	159.0000	163.0000	56.5000
	Tiempo de Establecimiento [seg] Settling Time*	140.0000	1120.0000	910.0000	471.0000
	Sobreimpulso [%] Overshoot*	9.7200	11.8000	9.5500	13.5000
Sistema Control ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)	Tiempo Subida [seg] Rise Time*	0.6960	0.2760	113.0000	0.3910
	Tiempo de Establecimiento [seg] Settling Time*	4.6500	2.7800	988.0000	3.3400
	Sobreimpulso [%] Overshoot*	10.2000	25.8000	14.2000	13.8000
Sistema Control CASCADA (Temperatura Vs Solenoide)	Tiempo Subida [seg] Rise Time*			106.0000	
	Tiempo de Establecimiento [seg] Settling Time*			678.0000	
	Sobreimpulso [%] Overshoot*			18.7000	

* Designación utilizada en Matlab-Simulink

Tabla 18. Resumen de Respuestas al Escalón Unitario por Modo de Trabajo.

En cuanto a la simulación de la respuesta de los Controladores PID hallados para el lazo de control de Planta para distintos modos de trabajo partiendo de condiciones iniciales de temperatura y velocidad, medida en términos de la ratio de cambio vemos en la

		MODO DE TRABAJO			
		Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Sistema Control PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.00000	22.00000	15.00000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	210.9120	232.1180	478.8980	167.5690
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9430	-51.4450	-36.4640	-85.4360
Sistema Control ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)	Delta Vel [rpm] (High -Low)	250.00	1000.00	250.00	1000.00
	Tiempo Ascenso [seg] (Rise time)	1.17900	12.9260	736.5240	13.2730
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	168.8990	61.0690	268.8300	58.8830
Sistema Control CASCADA (Temperatura Vs Solenoide)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.0000	7.0000	15.0000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	211.2460	232.7210	107.6580	187.5950
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9000	-51.4080	-53.4660	-61.9310

*Designación utilizada en Matlab - Simulink

Tabla 19 que la mejor respuesta en términos de ratio de cambio se da Bajando Vacío seguido de Viajando Vacío, Detenido y finalmente Cargado. En cuanto a la simulación para el

lazo de control del Actuador se observa también en la

		MODO DE TRABAJO			
		Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Sistema Control PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.00000	22.00000	15.00000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	210.9120	232.1180	478.8980	167.5690
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9430	-51.4450	-36.4640	-85.4360
Sistema Control ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)	Delta Vel [rpm] (High -Low)	250.00	1000.00	250.00	1000.00
	Tiempo Ascenso [seg] (Rise time)	1.17900	12.9260	736.5240	13.2730
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	168.8990	61.0690	268.8300	58.8830
Sistema Control CASCADA (Temperatura Vs Solenoide)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.00000	7.00000	15.00000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	211.2460	232.7210	107.6580	187.5950
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9000	-51.4080	-53.4660	-61.9310

*Designación utilizada en Matlab - Simulink

Tabla 19 que la mejor respuesta en términos de ratio de cambio se da cuando el camión se encuentra en modo Detenido. Finalmente, cuando el lazo de Control se encuentra bajo el arreglo de Cascada, se observa una mejora en la respuesta de la planta en la mayor parte de modos de trabajo.

		MODO DE TRABAJO			
		Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Sistema Control PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.00000	22.00000	15.00000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	210.9120	232.1180	478.8980	167.5690
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9430	-51.4450	-36.4640	-85.4360
Sistema Control ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)	Delta Vel [rpm] (High -Low)	250.00	1000.00	250.00	1000.00
	Tiempo Ascenso [seg] (Rise time)	1.17900	12.9260	736.5240	13.2730
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	168.8990	61.0690	268.8300	58.8830
Sistema Control CASCADA (Temperatura Vs Solenoide)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.00000	7.00000	15.00000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	211.2460	232.7210	107.6580	187.5950
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9000	-51.4080	-53.4660	-61.9310

*Designación utilizada en Matlab - Simulink

Tabla 19. Resumen Respuestas a la Simulación por Modo de Trabajo.

5.4. Control de Ganancia Programada

Una vez obtenidos los controladores para cada modo de trabajo se procedió a organizarlos bajo el esquema de un Controlador de Ganancia Programada, para lo cual se planteó el modelo de simulación mostrado en la Figura 104.

Este modelo Simulink está conformado por una familia de controladores PID, donde cada uno de los controladores que la conforman fueron sintonizados alrededor de un punto de equilibrio de la planta llamados Modos de Operación, por lo que podemos esperar que cada controlador opere satisfactoriamente en su zona de operación. De esta manera el Controlador de Ganancia Programada tiene como ventaja de permitir enfrentar la no linealidad del calentamiento del devanado de los motores eléctricos de tracción de manera muy práctica.

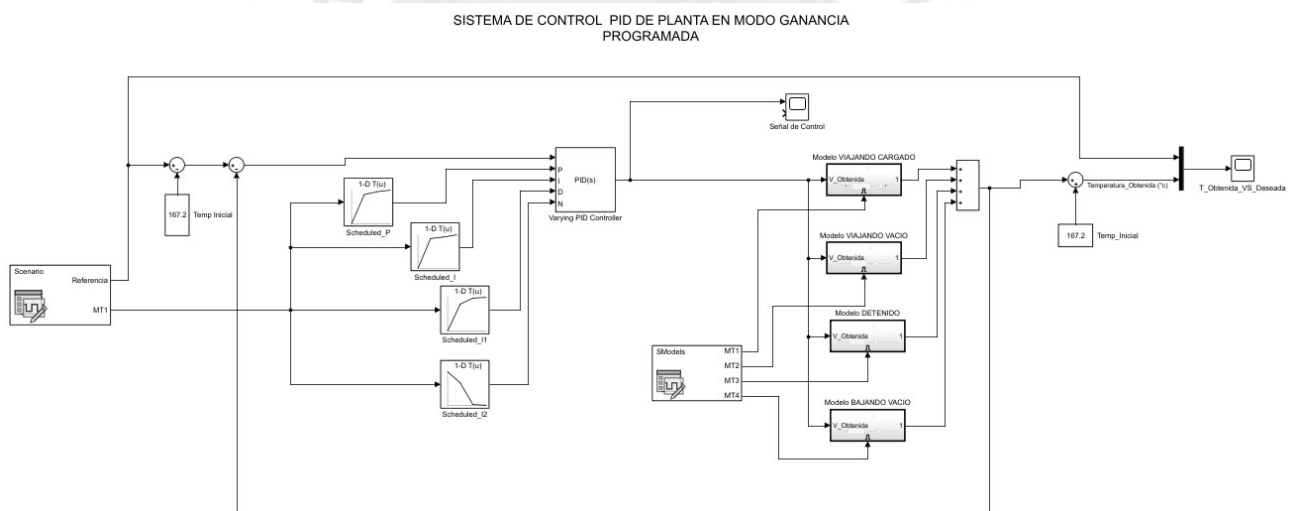


Figura 104. Modelo Simulink de Controlador PID de Ganancia Programada

En la simulación el bloque PID fue configurado para obtener sus ganancias Proporcional, Integral y Derivativa externamente, tal como se muestra en la Figura 105; valores que serán hallados mediante tablas de búsqueda que recurren a una matriz de controladores declarada como la que se muestra en la Figura 106; las cuales entregan los valores correspondientes al Modo de Operación actual según la Tabla 17. Resumen de Sintonización Automática de Controladores por Modo de Trabajo.

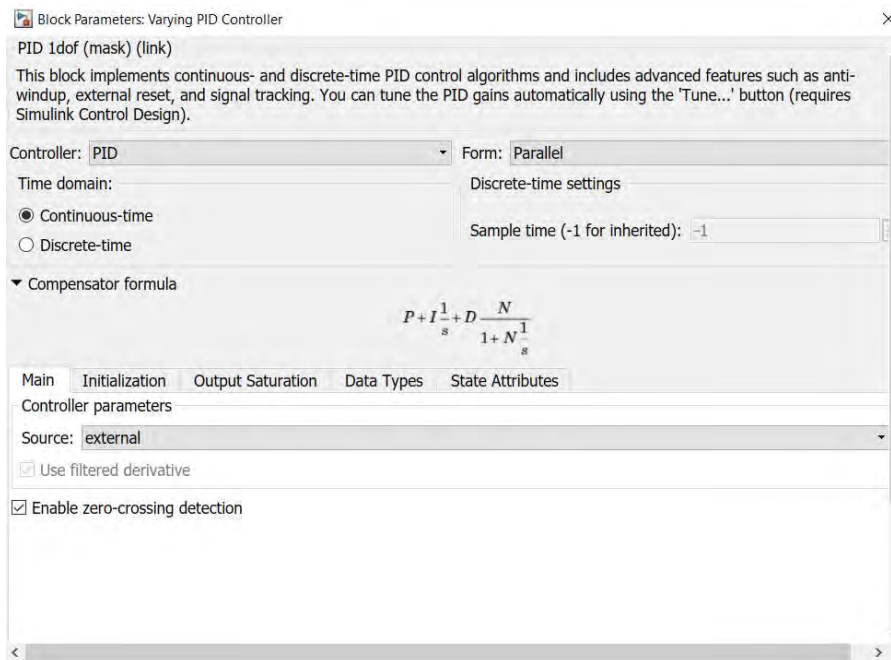


Figura 105. Configuración PID para Controlador de Ganancia Programada.

```

GS_PID_P
4-D pid

Kp + Ki * 1/s + Kd * s/(TF*s+1)
with Kp = -1.35e+03, Ki = -13.3, Kd = -7.5e+03, Tf = 0.0611

val(:,2,1) =
Kp + Ki * 1/s + Kd * s/(TF*s+1)
with Kp = 150, Ki = 0.372, Kd = -1.63e+03, Tf = 0.0922

val(:,3,1) =
Kp + Ki * 1/s + Kd * s/(TF*s+1)
with Kp = 333, Ki = 1.13, Kd = -318, Tf = 1.04

val(:,4,1) =
Kp + Ki * 1/s + Kd * s/(TF*s+1)
with Kp = 410, Ki = 2.29, Kd = -176, Tf = 2.33

```

Figura 106. Matriz de Familia de Controladores PID declarada en Matlab.

Donde luego de programar la señal de referencia correspondiente a los cambios de temperatura requeridos, y utilizando un PID con ganancias variables en función al modo de trabajo; se pudo obtener la siguiente respuesta en el tiempo; la cual tanto por el lado de los indicadores de respuesta en el tiempo como el porcentaje de sobre impulso y el tiempo de bajada, así como por el lado de la estabilidad se muestra que el controlador de Ganancia Programada presenta un comportamiento similar al encontrado en las sintonizaciones

individuales por modo de trabajo por lo que la temperatura de los motores de tracción se mantienen por debajo de 215°C que es el valor de diseño especificado durante un ciclo de trabajo de acarreo típico de 35 minutos; por ende este representa una solución viable para nuestro caso de estudio.

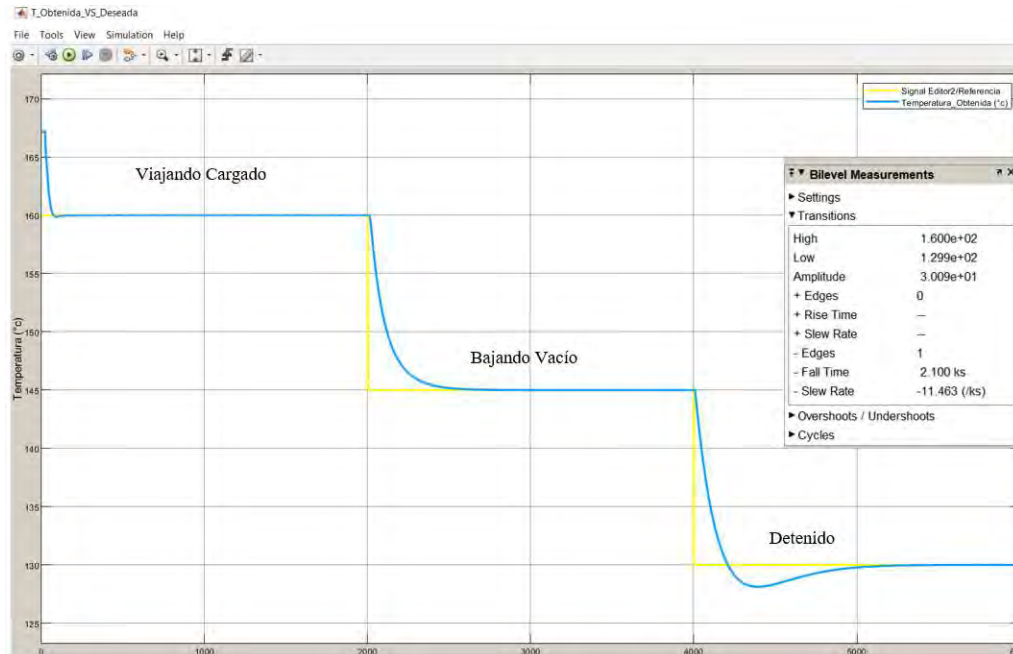


Figura 107. Simulación de Respuesta de Controlador en Modo de Ganancia Programada.

5.5. Conclusiones del Capítulo

Se decidió implementar el Control en Cascada es decir un lazo de control cerrado para el Actuador y otro lazo que abarque a todo el sistema incluyendo la Planta debido a que la dinámica del Actuador es mucho más rápida que la dinámica de calentamiento de la Planta. Solo para la sintonización del controlador en cascada solo en modo Detenido hubo que resintonizar luego de la sintonización individual para lo cual se recurrió al Sintonizador Automático de Matlab-Simulink.

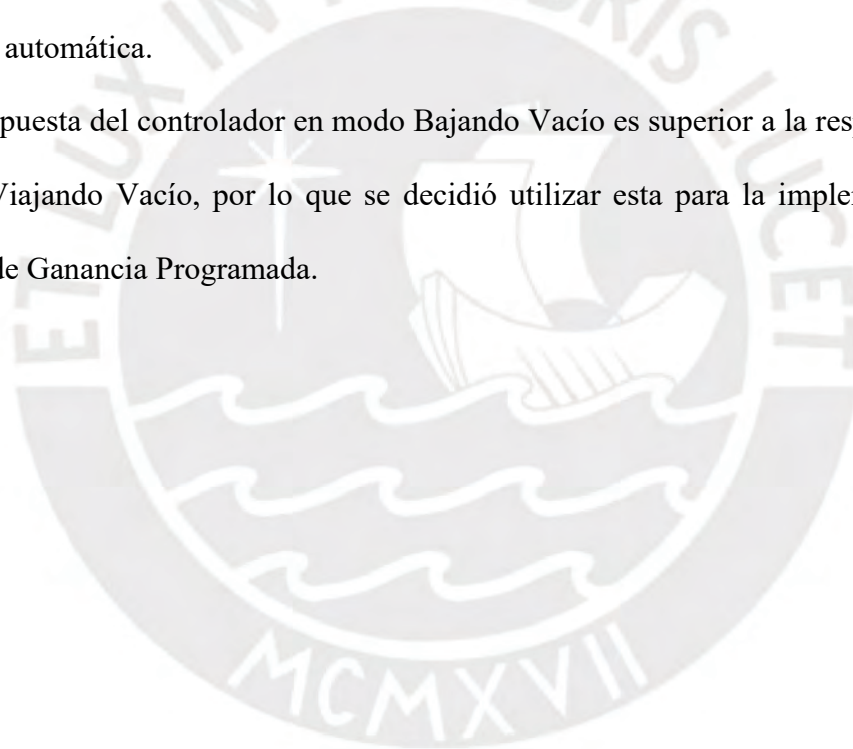
Para la sintonización del controlador del modelo de Planta en modo Viajando Cargado el segundo método de Ziegler Nichols fue útil; pues si fue posible llevarlo a la condición de oscilaciones sostenidas, en cambio para los demás modos de trabajo de Planta se aplicó el

primer método, basado en la ganancia, la constante de tiempo y el retardo de la Planta pues la respuesta del sistema se muestra sobreamortiguada.

En relación con la sintonización PID del Actuador con el primer método de Ziegler Nichols no nos permitió hallar un controlador estable pues el cociente entre el retardo y la constante de tiempo debe encontrarse entre 0.1 y 1 y en este caso este se encuentra en 0.0001.

La aplicación de la sintonización automática utilizando como base los valores hallados con Ziegler Nichols para el Modo de trabajo Detenido obtuvo mejores resultados, mientras que en el caso del de los modos de trabajo Viajando Vacío, Bajando Vacío y Viajando Cargado se obtuvo prácticamente el mismo desempeño del controlador que aplicando directamente la sintonización automática.

La respuesta del controlador en modo Bajando Vacío es superior a la respuesta a la del controlador Viajando Vacío, por lo que se decidió utilizar esta para la implementación del Controlador de Ganancia Programada.



Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se logró demostrar que si es posible encontrar un algoritmo de control como el de Ganancia Programada que permita operar óptimamente el sistema de enfriamiento del tren de propulsión de camiones de acarreo de minería operando bajo una configuración de potencia reducida de 4000 a 3700 Hp para optimizar el consumo de combustible pasando de un ratio de consumo de 190 Gal/hr a un ratio de 175 Gal/hr; y por ende reducir la huella de carbono de las compañías mineras; para ello nos valimos de las herramientas que nos brindan la Identificación de Sistemas, la Teoría de Control, y las herramientas de cálculo y simulación como Matlab-Simulink.

Se logró calcular los modelos matemáticos validados con ajustes promedio entre 88.4 y 58.4 para cada uno de los cuatro modos de operación (Viajando Cargado, Viajando Vacío, Detenido y Bajando Vacío) tanto para la Planta (Devanado de los Motores de Tracción); como para el Actuador (Solenoides + Motor Hidráulico + Ventilador); luego de obtener información de dos días de operación del camión de acarreo trabajando bajo una configuración de potencia reducida; para después someter dicha información a las herramientas de Identificación de Sistemas y así calcular los modelos matemáticos mencionados validados.

Una vez obtenidos los modelos matemáticos del sistema planta y actuador; se logró sintonizar las ganancias correspondientes a la acción proporcional, integral y derivativa de los controladores PID organizados bajo un arreglo en cascada para cada modo de trabajo partiendo por los métodos clásicos de Ziegler Nichols; para luego utilizar dichas ganancias como punto de partida para la aplicación de los métodos de Sintonización Automática de Matlab-Simulink y de esa manera lograr afinar el cálculo de ganancias de cada controlador permitiendo lograr un desempeño óptimo del sistema verificando la

respuesta escalón con niveles de sobreimpulso y tiempos de establecimiento dependiendo del modo de trabajo detallados en la Tabla 18; para que luego validar el comportamiento del sistema mediante simulación utilizando indicadores de tiempo de descenso y ratio de cambio detallados en la

		MODO DE TRABAJO			
		Viajando Cargado	Viajando Vacío	Detenido	Bajando Vacío
Sistema Control PLANTA (Temperatura Vs Velocidad Ventilador)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.00000	22.00000	15.00000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	210.9120	232.1180	478.8980	167.5690
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9430	-51.4450	-36.4640	-85.4360
Sistema Control ACTUADOR (Velocidad Ventilador Vs Solenoide)	Delta Vel [rpm] (High -Low)	250.00	1000.00	250.00	1000.00
	Tiempo Ascenso [seg] (Rise time)	1.17900	12.9260	736.5240	13.2730
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	168.8990	61.0690	268.8300	58.8830
Sistema Control CASCADA (Temperatura Vs Solenoide)	Delta Temp [°c] (High -Low)	7.10000	15.00000	7.00000	15.00000
	Tiempo Descenso [seg] (Fall Time)	211.2460	232.7210	107.6580	187.5950
	Ratio de Cambio [°c/ks] (slew rate)	-26.9000	-51.4080	-53.4660	-61.9310

*Designación utilizada en Matlab - Simulink

Tabla 19.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar la misma investigación a diversos niveles de altura sobre el nivel del mar; teniendo en cuenta que el desempeño del equipo a diversos niveles de altura puede variar significativamente, en especial el desempeño relacionado con el motor de combustión; pues el presente estudio fue realizado únicamente en una mina que opera a 2600 msnm, será importante tener en cuenta que en nuestro país existen mineras que operan desde a nivel del mar hasta por encima de los 5000 msnm.

Se recomienda continuar la presente investigación utilizando algoritmos adaptativos debido por un lado a que la condición física y mecánica de los componentes del sistema cambian en el tiempo por el propio envejecimiento y por el otro las condiciones de aplicación de la mina también pueden cambiar en el tiempo, como por ejemplo la profundidad del tajo ira creciendo a lo largo de los años.

Se recomienda la implementación del presente controlador utilizando un controlador paralelo al sistema propio del sistema, para ello será necesario implementar un protocolo de prueba que considere un tiempo de prueba que permita cubrir todas las posibles condiciones a las que se ve sometido el equipo; considerando un seguimiento constante de parámetros críticos valiéndose del sistema de monitoreo a bordo.

Referencias

- Álvarez J., Moreno J., & Ramírez E. (2016). Diseño e implementación de un sistema de control cascada en la planta de intercambio térmico – PIT000. *Revista Informador Técnico Colombia*, 81(1), 32-43. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6072724.pdf>
- Andersson L., Jonsson U., Henrik J., & Bengtsson J. (1993). *A Manual for System Identification*. Recuperado de <http://archive.control.lth.se/media/Education/EngineeringProgram/FRT041/2011/manualab.pdf>
- Aquino J. (2002). *Identificación Paramétrica de Modelos Térmicos en Espacio Estado de Motores de Inducción*. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México DF, México. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/310648624_IDENTIFICACION_PARAMETRICA_DE_LOS_MODELOS_TERMICOS_DE_ESTADORES_DE_MAQUINAS_ELECTRICAS_ROTATORIAS/link/5834a73e08ae138f1c0d7efa/download.

- Castaño S. (2020). *Control en Cascada*. Recuperado de https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/control-en-cascada/#Control_en_Cascada
- De Paula M., Ávila L., Sánchez C., & Acosta G. (2015). Control multimodal en entornos inciertos usando aprendizaje por refuerzos y procesos gaussianos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 12(4), 385-396. Recuperado de <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9340/9340>
- Dormido S., & Morilla F. (2014). Controladores PID: Fundamentos, sintonía y auto sintonía. Recuperado de <http://www0.unsl.edu.ar/~control1/apuntes/C6.2.pdf>
- Escobar A., & Barrero L. (2014). Aspectos prácticos de implementación en compensadores PID para control de posición de un automóvil. *Ingenium. Revista de la Facultad de Ingeniería*, 15(29), 148-162. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5038425.pdf>
- Gómez J., Viego P., Armas M., & García M. (2011). Procedimiento para el cálculo de los parámetros de un modelo térmico simplificado del motor asíncrono. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 19(1), 122-131. Recuperado de <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v19n1/art12.pdf>
- Juárez A. (2009). *Control Óptimo del Sistema de Enfriamiento de Motores de Inducción*. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México DF, México. Recuperado de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/17238/Control%20%83%20b3ptimo%20del%20sistema%20de%20enfriamiento%20de%20motores%20de%20induc%20ci%20%83%20b3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Lara M., Garrido J., & Vázquez F. (2018). Control descentralizado adaptativo con PI por ganancia programada de un sistema de refrigeración por compresión de vapor. *Actas de la XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de septiembre de 2018*. Recuperado de https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/24942/2018_Lara_Manuel_Control_descentralizado_adaptativo.pdf
- Lara M., Garrido J., Ruz M., & Vázquez F. (2018). Control PI adaptativo por ganancia programada del nivel de un tanque de sección trapezoidal. *Actas de la XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz, 5-7 de septiembre de 2018*. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/32d3/62071de1a57f8ce5d50d5f4a024584096863.pdf>
- Llácer J. (2018). *Control en cascada de la temperatura de un reactor continuo de tanque agitado encamisado*. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/101509/LL%C3%81CER%20-%20Control%20en%20cascada%20de%20la%20temperatura%20de%20un%20reactor%20continuo%20de%20tanque%20agitado%20encamisado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mathworks (Matlab). (2022). *¿Qué es la identificación del sistema?*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Z1QS6FsxrJI>
- Mathworks (Matlab). (2024). *Programación de ganancias*. Recuperado de <https://la.mathworks.com/help/control/ug/gain-scheduled-control-systems.html>
- Ogata K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (Quinta Edición). España: Prentice Hall/Pearson Editores.
- Pillay P. & Manyage M (2006). Loss of Life in Induction Machines Operating With Unbalanced Supplies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(4), 813-822.

- Portilla R. (2017). *Diseño e implementación de un control adaptativo para temperatura de un motor de combustión interna utilizando la técnica de identificación basada en mínimos cuadrados recursivos*. Universidad Politécnica Salesiana Ecuador.
Recuperado de
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14953/1/UPS-CT007375.pdf>
- Rodriguez J., & Cote J. (2019). Estrategia anti-windup por recálculo y seguimiento en controladores PID difusos. Recuperado de
<http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v28n53/0121-1129-rfing-28-53-00119.pdf>
- Romero J., Arrieta O., Padula F., Reynoso S., García S., & Balaguer P. (2012). Estudio comparativo de algoritmos de auto-ajuste de controladores PID. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 9(2012), 182-193.
<https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9613/9553>
- Rugh, W., Shamma, J. (2000) Research on gain scheduling. *Automatica* 36(2000), 1401-1425.
Recuperado de
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109800000583>
- Valencia, F. (2023). *Huella de Carbono: ¿Qué son las emisiones indirectas y cómo se gestionan en la minería?* Rumbo Minero. Recuperado de
<https://www.rumbominero.com/peru/noticias/actualidad-empresarial/huella-de-carbono-mineria/>