



**DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE LOS EQUIPOS ESTACIONARIOS CRÍTICOS DEL
PROCESO DE INTERCAMBIO DE CALOR, PARA EL INCREMENTO EN LA
INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL INDUSTRIAL, EN EL
LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**



Autor

JUAN JOSÉ ROBERTO PARADA GÓMEZ

Ingeniero Mecánico – U.F.P.S.

Magister en Mantenimiento Industrial – U.N.E.T.

Tesis de grado para optar por el título de:

MAGISTER EN CONTROLES INDUSTRIALES

MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES

DIVISIÓN ADMINISTRATIVA DE POSGRADOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, JULIO 2023



**DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE LOS EQUIPOS ESTACIONARIOS CRÍTICOS DEL
PROCESO DE INTERCAMBIO DE CALOR, PARA EL INCREMENTO EN LA
INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL INDUSTRIAL, EN EL
LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**



Autor

JUAN JOSÉ ROBERTO PARADA GÓMEZ

Ingeniero Mecánico – U.F.P.S.

Magister en Mantenimiento Industrial – U.N.E.T.

Director

Co - director

ROCCO TARANTINO ALVARADO

SANDRA ARANGUREN ZAMBRANO

**Ingeniero Electrónico / Magíster en
Ingeniería de Control e Instrumentación**

**Ingeniero Electrónico / Magíster en
Ingeniería de Control e Instrumentación**

Doctorado en Ciencias Aplicadas

**MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES
DIVISIÓN ADMINISTRATIVA DE POSGRADOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

PAMPLONA, JULIO 2023

DEDICATORIA

*“El amor es el valor máspreciado del ser humano, cada día, cada hora, cada minuto y
cada segundo, debemos aprender y luchar por él.”*

*“Solo al comprender la importancia de reconocer el error, podremos realizar las
acciones necesarias para recuperar el camino que nos hemos trazado”*

Este trabajo está dedicado a mi hogar;

A mi amada esposa

MARYELY GONZÁLEZ PÉREZ,

Mis dos princesas

MARIANA SALOME PARADA GONZÁLEZ.

LUNA MARIÁNGEL PARADA GONZÁLEZ

Hijas mías estas palabras son mi legado; “JUICIO EN LA VIDA, MIS NIÑAS”

A mi madre; MARÍA SOLANGEL PARADA PARADA...

Y a todos los seres más importantes de mi vida

TÍAS, HERMANOS Y PRIMOS.

Gracias por su compañía, apoyo, cariño y consejo.

JUAN JOSE ROBERTO PARADA GOMEZ.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco, con mucho respeto y admiración, a mi director de tesis el Doctor ROCCO TARANTINO ALVARADO, por su paciencia, acompañamiento, orientación y por brindarme su conocimiento para continuar el noble camino de la ciencia y la investigación.

Agradezco a la Ingeniera SANDRA ARANGUREN, gracias por sus consejos, motivación y paciencia.

Agradezco profundamente a mi TÍA MARTA EUGENIA PARADA PARADA, por creer en mí, y ayudarme de forma incondicional, espero que siempre se sienta orgullosa.

Un especial agradecimiento, al Ingeniero ADRIÁN CARVAJAL, por acompañarme y ayudarme en el desarrollo de los experimentos del proyecto de investigación.

Agradezco a la gestión administrativa de la Universidad de Pamplona por facilitar el acceso al laboratorio en medio de las duras condiciones de la pandemia.



Universidad de Pamplona

Facultad de Ingenierías y Arquitectura - posgrados

Maestría en Controles Industriales

DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS ESTACIONARIOS PARA EL INCREMENTO EN LA INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL INDUSTRIAL, EN EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Autor: Parada Gómez, Juan Jose R.

Director: Tarantino Alvarado Rocco.

Fecha: Julio de 2023

RESUMEN

Los sistemas de detección y diagnóstico de fallos son conjuntos de técnicas y enfoques utilizados en el manejo de anomalías en sistemas complejos, como maquinaria industrial, procesos de producción y sistemas de transporte. Los equipos críticos estáticos, como los intercambiadores de calor, requieren especial atención para asegurar su funcionamiento dentro de las condiciones de diseño. Una falla en estos equipos puede tener impactos ambientales, riesgos para el personal y la productividad, y afectar la integridad del sistema, generando un alto impacto económico y reduciendo la confiabilidad operacional. Los avances tecnológicos han mejorado los instrumentos de adquisición de datos y las técnicas de detección y diagnóstico de fallos. Se están desarrollando aplicaciones de técnicas inteligentes en las diferentes etapas de la protección, y las posibilidades de hibridación continúan creciendo.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal realizar el diagnóstico de fallos en equipos críticos estacionarios del laboratorio de mecatrónica en la Universidad de Pamplona. El proceso metodológico se basa en el método científico, con un enfoque descriptivo simple y experimental. En la etapa inicial; se realizó una investigación inicial sobre

la caracterización y las técnicas de detección y diagnóstico utilizadas en los intercambiadores de calor y una revisión sobre el estado del arte sobre los equipos estacionarios. En una segunda etapa; se realizó la caracterización de los sistemas estacionarios críticos, la sinergia entre las variables a estudiar, la caracterización física y su documentación. En la tercera etapa, se diseñó un procedimiento experimental para la captura de la data, su proceso de organización, y tratamiento de análisis, tanto de la planta en estado funcional, como en estado de fallo, el diseño de modelos matemáticos identificados del comportamiento de la planta, aplicando el método de dos puntos, se calculó el PID con el método de Ziegler – Nichols, y se ajustó el PID utilizando métodos heurísticos como la tabla ensayo error, y la evaluación de estos diseños, en cuanto a perturbaciones, ruidos y fallos; se emplearon métodos basados en residuales comparativos del modelo de la planta con las plantas reales, se realizó el estudio estadístico descriptivo de la función de densidad de frecuencias, y se formularon hipótesis de detección, basado en los rangos inferior y superior, con valores del 95% de confianza en cada rango. En la etapa de implementación, se hizo una propuesta para la modificación física, con base en las características disponibles del banco y un ajuste en la programación del PLC.

El principal resultado fue el diseño de una metodología de mejora en la ingeniería de confiabilidad industrial, basada en el análisis estadístico de residuales comparativos entre la planta modelo sin fallos y las plantas reales. Además, se realizó un estudio del estado del arte en sistemas de detección y diagnóstico de fallos, técnicas de monitoreo y normatividad vigente. Se caracterizaron los equipos críticos estacionarios del laboratorio de mecatrónica y se propuso la ingeniería de implantación industrial. Los análisis estadísticos permitieron establecer umbrales de detección y diagnóstico para fallos por obstrucción en los intercambiadores de



calor y fallos de lectura anormal del instrumento. Estos resultados validaron los experimentos realizados y propusieron un sistema de implantación industrial con requisitos mínimos.

A nivel industrial, los equipos estacionarios críticos supervisados por métodos de detección y diagnóstico de fallos presentan niveles más altos de confiabilidad operacional. Además, se reduce el tiempo de inactividad, se apoya al sistema de mantenimiento predictivo y se mejora la seguridad y el rendimiento del equipo.

Palabras Claves: Intercambiador de calor; Características Invariantes; Modelo de Identificación; Método de dos puntos de Smith; Sintonización del PID; Métodos Heurísticos de Sintonización; Metodología Experimental; Tabla Ensayo Error; Método Ziegler and Nichols; Simulación del controlador, detección y diagnóstico, residuales, análisis estadístico descriptivo de variación de frecuencias.

CONTENIDO

	P.
LISTADO DE TABLAS.....	18
LISTADO DE FIGURAS	22
LISTADO DE ECUACIONES.....	32
LISTA DE ANEXOS.....	37
GLOSARIO.....	39
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	42
INTRODUCCIÓN	46
1 EL PROBLEMA	48
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	48
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	52
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	53
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	53
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	53
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	53
1.5 LIMITACIONES	54
2 MARCO TEÓRICO.....	55
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	55
2.1.1 ALGO DE HISTORIA.....	55
2.1.2 ANTECEDENTES	57
2.2 BASES TEÓRICAS	60
2.2.1 EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....	60



2.2.2	TENDENCIAS ACTUALES DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....	61
2.2.3	CONCEPTOS DE FALLO Y FALLA	65
2.2.4	AUTOMATIZACIÓN	69
2.2.5	CONTROL DE PROCESOS.....	69
2.2.6	SUPERVISIÓN AUTOMÁTICA Y MONITOREO DE PROCESOS.....	71
2.2.7	SISTEMAS DE DETECCIÓN DE FALLOS.....	73
2.2.8	SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO DE FALLOS	77
2.2.9	CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE UN SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS	83
2.2.10	TÉCNICAS DE MONITOREO BASADAS EN CONDICIÓN	86
2.2.11	ÍNDICES DE MANTENIMIENTO CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD CMD.	87
2.2.12	EQUIPOS CRÍTICOS ESTACIONARIOS.....	89
2.3	ASPECTOS LEGALES	92
3	CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO	94
3.1	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	95
3.2	DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE INVESTIGACIÓN	95
3.2.1	ETAPA PROEMIO.....	95
3.2.2	ETAPA OPERACIONAL	96
3.2.3	ETAPA DDF+	98



3.2.4	ETAPA IMPLEMENTACIÓN.....	98
3.3	OBJETO DE ESTUDIO	98
3.3.1	EQUIPOS E INSTRUMENTOS.	98
	INTERCAMBIADOR DE CALOR	99
	TANQUE DE ALMACENAMIENTO	99
3.4	PARAMETRIZACIÓN Y VARIABLES.	99
3.5	LOS INSTRUMENTOS Y MECANISMOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	102
3.5.1	DISEÑO DE LA HOJA DE REGISTRO DE LA MÁQUINA	103
3.5.2	PLANOS DE LA MÁQUINA	103
3.5.3	DIAGRAMA ENTRADA, PROCESO Y SALIDA (E-P-S).....	104
3.6	CRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE LOS FALLOS A DETECTAR.....	104
3.7	MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE LA PLANTA.....	105
3.7.1	ASPECTOS BÁSICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA	106
3.7.2	MODELO MATEMÁTICO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA (MÉTODO DE LOS DOS PUNTOS).	109
3.7.3	MODELO MATEMÁTICO PARA LA LEY DE CONTROL DEL PROCESO IDENTIFICADO	112
3.7.4	MÉTODOS HEURÍSTICOS DE AJUSTE Y MEJORA DEL SINTONIZADOR PID.	113



3.7.5	MODELO MATEMÁTICO PARA LA DETECCIÓN DE LA PLANTA BASADO EN ECUACIONES DE PARIDAD CON FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.	114
3.7.6	INCORPORACIÓN DEL DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN INTERCAMBIADOR DE CALOR BASADO EN LA DIFERENCIA ENTRE RESIDUALES GEOMÉTRICOS	118
3.7.7	MODELO MATEMÁTICO DE LA SEGUNDA DIFERENCIA ENTRE RESIDUALES PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE LA PLANTA	120
3.7.8	MATEMÁTICA IMPLÍCITA AL FALLO DOS: LECTURA ANORMAL DEL INSTRUMENTO	124
3.7.9	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE MEDIDAS DE TENDENCIAS CENTRAL Y MEDIDAS DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA.	125
3.8	MEDIDAS ESTADÍSTICAS PARA EL SISTEMA DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE LA PLANTA.....	125
3.8.1	MEDIA ARITMÉTICA Y VALOR PROMEDIO.....	125
3.8.2	VARIANZA	126
3.8.3	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	126
3.8.4	COEFICIENTE DE ASIMETRÍA.....	126
3.8.5	CURTOSIS O APUNTAMIENTO	127
3.8.6	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD	127
3.8.7	DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES	129

3.8.8	ESTIMACIÓN DE PATRONES RESIDUALES BASADOS EN MEDIDAS ESTADÍSTICAS	129
3.8.9	INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAMBIOS PERMITIDOS MÁXIMOS EN LOS PATRONES RESIDUALES	130
3.8.10	PRUEBAS DE HIPÓTESIS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LAS MEDIDAS ESTADÍSTICAS, PARA LA DETECCIÓN Y EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS.....	131
3.9	ESQUEMA GENERAL DE IMPLANTACIÓN INDUSTRIAL	134
4	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	136
4.1	ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE FALLOS EN INTERCAMBIADORES DE CALOR	136
4.1.1	MÉTODOS DE DETECCIÓN CONSULTADOS.....	138
4.1.2	MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO CONSULTADOS.	141
4.1.3	MÉTODOS HÍBRIDOS CONSULTADOS.	143
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS ESTACIONARIOS DEL LABORATORIO DE MECATRÓNICA.....	144
4.2.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA.	145
4.2.2	EL INTERCAMBIADOR DE CALOR	154
4.2.3	TANQUE DE ALMACENAMIENTO	155
4.3	SELECCIÓN DE LOS FALLOS A DETECTAR	157

4.4 ANÁLISIS DETALLADO DE LOS EFECTOS DE LOS FALLOS SOBRE EL SISTEMA	159
4.5 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS	160
4.5.1 PLANEACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS	161
4.6 REALIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS	165
4.7 MODELO FUNCIONAL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR (PMSF)	177
4.7.1 LEY DE CONTROL PID DE LA PLANTA, EN ESTADO NORMAL DE FUNCIONAMIENTO.	181
4.7.2 SIMULACIÓN DE LA PLANTA Y LA LEY DE CONTROL EN ESTADO NORMAL DE FUNCIONAMIENTO.	181
4.7.3 AJUSTE DE LA LEY DE CONTROL UTILIZANDO MÉTODOS HEURÍSTICOS (TABLA ENSAYO ERROR)	185
4.7.4 SECUENCIA DE MEJORA DEL SINTONIZADOR PID	193
4.7.5 EVALUACIÓN DE LA PLANTA Y LA LEY DE CONTROL OPTIMIZADA CONTRA RUIDOS, PERTURBACIONES Y FALLOS	194
4.8 ANÁLISIS COMPARATIVO DE DETECCIÓN ENTRE MODELOS CALCULADOS DE LA PLANTA	201
4.8.1 DETECCIÓN DE FALLO 1, OBSTRUCCIÓN O ATASCAMIENTO; FALLO DE UN TUBO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR	201
4.8.2 DETECCIÓN DE FALLO 1, OBSTRUCCIÓN O ATASCAMIENTO; FALLO DE DOS TUBOS EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR, ENTRE MODELOS	206



4.8.3	DETECCIÓN DE FALLO 1, OBSTRUCCIÓN O ATASCAMIENTO; FALLO DE TRES TUBOS EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR, ENTRE MODELOS	208
4.8.4	DETECCIÓN DE FALLO 1, OBSTRUCCIÓN O ATASCAMIENTO; FALLO DE CUATRO TUBOS EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	211
4.8.5	DETECCIÓN DE FALLO 1, OBSTRUCCIÓN O ATASCAMIENTO; FALLO DE CINCO TUBOS EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	213
4.8.6	DETECCIÓN DE FALLO 2; LECTURA ANORMAL DEL INSTRUMENTO, SENSOR RTD PT100, EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	216
4.9	GENERACIÓN DE PATRONES BASADOS EN RESIDUALES DE LA PLANTA	
	MODELO SIN FALLA VS PLANTAS REALES	219
4.9.1	NORMALIZACIÓN Y PRE-AJUSTE DE LOS DATOS.....	219
4.9.2	CÁLCULO DE LOS RESIDUALES DEL MODELO DE LA PLANTA SIN FALLA VS LOS DATOS REALES SELECCIONADOS DE LA PLANTA EMPLEANDO SIMULINK	220
4.10	PATRONES RESIDUALES GEOMÉTRICOS.....	224
4.10.1	PATRÓN RESIDUAL DE REFERENCIA PARA DETECCIÓN; PATRÓN_ RPMSFvsPRSF.....	226
4.10.2	PATRONES RESIDUALES DE REFERENCIA PARA EL DIAGNÓSTICO DEL FALLO 1, OBSTRUCCIÓN O ATASCAMIENTO DE TUBOS.....	226
4.10.3	PATRÓN RESIDUAL DE REFERENCIA PARA EL DIAGNÓSTICO DEL FALLO 2, LECTURA ANORMAL DEL INSTRUMENTO.	229

4.11	RANGOS VALIDOS DE CONFIANZA PARA CADA PATRÓN RESIDUAL.....	229
4.11.1	RANGOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR	229
4.11.2	RANGOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS POR OBSTRUCCIÓN Y ATASCAMIENTO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	232
4.11.3	RANGOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLOS POR LECTURA ANORMAL DEL INSTRUMENTO EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	234
4.12	HIPÓTESIS NULA HO, HIPÓTESIS DE DETECCIÓN DE FALLO.....	234
4.13	HIPÓTESIS DE DIAGNÓSTICO DE FALLO	235
4.13.1	HIPÓTESIS H1, DIAGNÓSTICO DE FALLO DE OBSTRUCCIÓN Y ATASCAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	235
4.13.2	HIPÓTESIS H2, DIAGNÓSTICO DE FALLO LECTURA ANORMAL DEL INSTRUMENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	236
4.13.3	HIPÓTESIS H3, DIAGNÓSTICO DE FALLO DESCONOCIDO	237
4.14	ESQUEMA BÁSICO DE IMPLANTACIÓN INDUSTRIAL.....	238
4.14.1	ELECCIÓN DE ACCIONAMIENTOS.....	239
4.14.2	NECESIDADES ESPECÍFICAS	239
4.14.3	ALGORITMO DE CONTROL	240
4.14.4	ESTADOS FUNCIONALES DE LA COLUMNA SIEMENS 8WD4208-0AA.....	242



4.14.5	MODIFICACIÓN PROPUESTA PARA EL PROGRAMA DE SDDF	244
4.14.6	PROYECCIÓN FÍSICA IMPLANTACIÓN INDUSTRIAL DEL SISTEMA DE IMPLANTACIÓN INDUSTRIAL	244
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	246
5.1	CONCLUSIONES	246
5.2	RECOMENDACIONES.....	249
6	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	251
	ANEXOS.....	261

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las etapas de desarrollo de la tesis.....	97
Tabla 2. Parametrización de variables.....	100
Tabla 3. Relación de dependencia entre variables	101
Tabla 4. Referencias iniciales y finales de temperatura	110
Tabla 5. Niveles típicos de confianza más utilizados.	131
Tabla 6. Métodos de detección de fallos aplicados.....	141
Tabla 7. Métodos de diagnóstico de fallos.....	142
Tabla 8. Métodos Híbridos de detección y diagnóstico de fallos.....	144
Tabla 9. Diagrama de Entrada-Proceso-Salida del banco de control de temperatura.	149
Tabla 10. Características principales de los sensores.	151
Tabla 11. Modos de Fallas en Intercambiadores de calor (Basado en la Tabla A.33- Modos de Falla-Cambiadores de Calor de ISO-14224).....	155
Tabla 12. Modos de fallas en recipientes (Basado en Tabla A.53 – Modos de Falla – Recipientes de ISO 14224).	156
Tabla 13. Condiciones operativas de nivel bajo y nivel alto	162
Tabla 14. Puntos operativos funcionales del Intercambiador de calor (Simuladas).....	162
Tabla 15. Valores máximos y mínimos medidos en la prueba de modelado por identificación.	176

Tabla 16. Valores Iniciales para la construcción del modelo matemático del funcionamiento normal de la planta.....	179
Tabla 17. Tiempo para alcanzar el 63.2% y 28.2% de la curva dinámica del modelo de la planta en estado normal	180
Tabla 18. Parámetros característicos del modelo de la planta en estado normal.....	180
Tabla 19. Valores característicos Kc, Ti, y Td, Método de Ziegler – Nichols.	181
Tabla 20. Parámetros principales de la ley de control del PID	181
Tabla 21. Puntos característicos de referencia para la evaluación del comportamiento dinámico de la gráfica en el estímulo.	183
Tabla 22. Características de la curva de respuesta del modelo de la planta simulado.	184
Tabla 23. Resultados de la Mejora 1 de la ley de control PID (reducción del valor proporcional al 50%).	187
Tabla 24. Resultados de la mejora 2 de la ley de control PID (Reducir el valor Integral al 80% y mantener la reducción del valor proporcional al 50%)	188
Tabla 25. Resultados de la Mejora 3 Cambiar el valor Proporcional al 70% y mantener el valor Integral al 80%.....	189
Tabla 26. Resultados de la Mejora 4 Cambiar el valor Integral al 75% y mantener el valor Proporcional al 70%	190

Tabla 27. Resultados de la Mejora 5 aumento del valor derivativo en 50% y mantener el valor Integral al 75% y el Proporcional al 70%.	192
Tabla 28. Secuencia de sintonización de la Ley de control PID, Criterios de evaluación y evaluación del proceso de Mejora.	193
Tabla 29. Valores Iniciales para la construcción del modelo matemático del funcionamiento de la planta con un tubo tapado	202
Tabla 30. Tiempo para alcanzar el 63.2% y 28.2% de la curva dinámica del modelo de la planta en estado de fallo con un tubo obstruido	203
Tabla 31. Parámetros característicos del modelo de la planta en estado de fallo con un tubo obstruido	204
Tabla 32. Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de dos tubos	206
Tabla 33. Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de tres tubos	209
Tabla 34. Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de cuatro tubos ..	212
Tabla 35. Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de cinco tubos....	214
Tabla 36. Parámetro del fallo Lectura anormal del instrumento	217
Tabla 37. Características dimensionales de las datas analizadas, para la identificación de los procesos.....	219
Tabla 38. Archivos de Excel® con la data real ajustada para el cálculo de los patrones.	220



Tabla 39. Relación de residuales mostrados en al Gráfica.	223
Tabla 40. Selección de valores de tiempo de estabilización.	225
Tabla 41. Valores promedios y de desviación estándar de los residuales de la planta modelada sin falla vs los fallos simulados en ella.....	230
Tabla 42. Variables digitales requeridas.	241
Tabla 43. Relaciones booleanas para la columna.....	242
Tabla 44. Sistema de codificación alfanumérico.	262
Tabla 45. Nomenclatura de los sistemas del banco de control de temperatura.	262
Tabla 46. Nomenclatura de los Equipos, Instrumentos o Componentes	263

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Laboratorios de la sede de Villa del Rosario, (a) Banco de Nivel (b) Banco de temperatura	54
Figura 2. Patrones de fallas	67
Figura 3. Diagrama I-P-F (Basado en Osarenren, 2015, P. 10).	68
Figura 4. Sistema Automatizado.....	69
Figura 5. Niveles de acción en el proceso (Basado en Iserman, 2006, P. 18. Fig.2.4)..	72
Figura 6. Métodos para la detección de fallos (Basado en Isermann, 2006, P. 6 Fig. 1.4).	73
Figura 7. Esquema del chequeo de límites.....	74
Figura 8. Función de densidad de probabilidad de la variable observada Y. (Tomada de Iserman, 2006, P. 98).....	75
Figura 9. Señales armónicas. (a) Amplitud Modulada. (b) Frecuencia Modulada. (c) fase modulada. (Tomado de Iserman, 2006, P. 86 fig. 6.3).....	75
Figura 10. Esquema general de la detección de fallos basados en el modelado de procesos (Basado en Iserman, 2006, P. 62. Fig. 5.1).....	76
Figura 11. Esquema de análisis PCA (Iserman, 2006, P. 268 Fig. 13.1).....	77
Figura 12. Métodos para el diagnóstico de fallos (Basado en Isermann, 2006, P.290 Fig. 15.3).....	78

Figura 13. Identificación de patrones.	80
Figura 14. Ejemplo de la clasificación polinomial (Tomado de Isermann, 2006, P. 301 Fig. 16.6).....	80
Figura 15. Ejemplo de un árbol de decisión para dos clases de fallos (Tomado de Isermann, 2006, P. 303.Fig. 16.7).....	81
Figura 16. Sistema de diagnóstico con generador de residuos (Tomado de Verde, Gentil, & Morales-Menéndez, 2013, P. 155 Fig. 5.6).	82
Figura 17. Ejemplo de clasificación geométrica (Tomado de Iserman, 2006, P. 299, Fig. 16.5).	83
Figura 18. Intercambiador de calor (Tomado de Holmman, 2010, P 529 Fig. 10-3).	91
Figura 19. Tanque de almacenamiento industrial.	91
Figura 20. Metodología aplicada al proyecto de investigación	94
Figura 21. Gráfica de relación de dependencia entre variables	102
Figura 22. Sistema de agregación de valor fabril, empresarial o de servicios (Mora, 2009, pág. 47).....	104
Figura 23. Representación gráfica de un sistema.....	108
Figura 24. Características típicas de una curva de respuesta a un sistema de segundo orden (tomado de Ogata 2010).	108
Figura 25. Proceso para identificar la planta con el método de los dos puntos.	110

Figura 26. Gráfica de la planta y el controlador en lazo cerrado en SIMULINK.....	113
Figura 27. Modelo de identificación de la planta sin fallas.	114
Figura 28. Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos.	116
Figura 29. Esquema gráfico del cambio de residual de estado sin fallo a estado con fallo.	118
Figura 30. Esquema del diagrama de bloques del modelo residual de múltiples fallos	119
Figura 31. Esquema con mapas de fallos aditivos	121
Figura 32. Diagrama de error.	123
Figura 33. Esquema eléctrico de resistencia en paralelo	124
Figura 34. Función de densidad de probabilidad normal de la variable observada (tomado de Iserman 2006)	128
Figura 35. Secuencia metodológica para la generación de patrones residuales basados en análisis estadísticos.	129
Figura 36. Región de aceptación y rechazo de la hipótesis (Iserman, 2006).	131
Figura 37. Fases de un Proyecto de implantación del sistema de control (Basado en Balcells y Romeral)	135
Figura 38. Fallos comunes en intercambiadores de calor.	138

Figura 39. Ubicación de los instrumentos de medición en el banco de control de temperatura.	150
Figura 40. Esquema del Lazo de control principal.	153
Figura 41. Puntos de acceso del intercambiador de calor.....	153
Figura 42. Puntos de acceso al Tanque de Almacenamiento	156
Figura 43. Número de Riesgo Prioritario de los fallos en el INTERCAMBIADOR DE CALOR.	157
Figura 44. Número de Riesgo Prioritario de los fallos en el TANQUE DE ALMACENAMIENTO.	158
Figura 45. Etapas del diseño de los experimentos	161
Figura 46. Esquema simulado de obstrucción y atascamiento del Intercambiador de calor.....	163
Figura 47. Esquema eléctrico simulado del estado de funcionamiento de la RTD.	164
Figura 48. Diagrama de proceso para el desarrollo del experimento	166
Figura 49. Esquema de conexión entre el PC, el PLC y la pantalla HMI.....	167
Figura 50. Adecuación del banco de control de temperatura para el desarrollo del experimento	168
Figura 51. Configuración inicial del banco de control de temperatura en la pantalla HMI.	169

Figura 52. Gráfica de la dinámica de estabilización del banco de control de temperatura.	169
Figura 53. Condiciones finales de operación	169
Figura 54. Esquema de repetición de la dinámica de estabilización del proceso.	170
Figura 55. Procedimiento de retiro de la tapa cerrada o de retorno	171
Figura 56. Limpieza y secado de los tubos en el extremo visibles del intercambiador de calor.....	172
Figura 57. Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) un tubo, (b) dos tubos.	172
Figura 58. Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) tres tubos, (b) cuatro tubos.....	173
Figura 59. Fallo de obstrucción y atascamiento de cinco tubos.	174
Figura 60. Alteración de la física del sensor para provocar la lectura anormal del instrumento.	176
Figura 61. Gráficas de respuesta de temperatura T4 (a) y Porcentaje de la bomba (b) de la PRUEBA 17 08 04 2022 Estado Normal de la planta	178
Figura 62. Sección dinámica Ampliada de la Prueba 17 08 04 2022	180
Figura 63. Diagrama de bloques del modelo matemático del banco y el sistema de control PID calculado	184
Figura 64. Gráfica de respuesta del modelo matemático del banco en condiciones normales con el sistema de PID calculado.....	184

Figura 65. Gráfica comparativa de la Planta inicia (negro) Vs Mejora 1 (Rojo)	186
Figura 66. Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 1 (Rojo) Vs Mejora 2 (Magenta).	187
Figura 67. Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 2 (Magenta) Vs Mejora 3 (Azul)	189
Figura 68. Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 3 (Azul) Vs Mejora 4 (Verde)	190
Figura 69. Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 4 (Verde) Vs Mejora 5 (Verde Oscuro).....	191
Figura 70. Gráfica de respuesta comparativa de la Planta inicial (Negro) Vs Mejora 5 (Verde Oscuro)	194
Figura 71. Diagrama de evaluación del sistema de control contra ruidos.	195
Figura 72. Gráfica de respuesta de la simulación con la evaluación contra ruidos.	195
Figura 73. Diagrama de evaluación del sistema contra perturbaciones	196
Figura 74. Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra Perturbaciones.....	197
Figura 75. Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en la Ganancia K.	198
Figura 76. Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en la ganancia de la planta	198

Figura 77. Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en la constante de tiempo.	199
Figura 78. Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en la constante de tiempo.	199
Figura 79. Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en el tiempo muerto	200
Figura 80. Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en el tiempo muerto	200
Figura 81. Gráficas de respuesta de temperatura T4 y Porcentaje de la bomba de la PRUEBA 23 09 06 2022 Estado de fallo con un tubo obstruido.	202
Figura 82. Sección dinámica Ampliada de la Prueba 24 09 06 2022	203
Figura 83. Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de un tubo del intercambiador de calor.....	204
Figura 84. Gráfica de respuesta del proceso de detección de fallo de una obstrucción de un tubo en el intercambiador de calor.	205
Figura 85. Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de dos, tubos del intercambiador de calor	207
Figura 86. Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de dos, tubos obstruidos en el Intercambiador de calor.....	208
Figura 87. Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de tres, tubos del intercambiador de calor	210

Figura 88. Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de tres tubos obstruidos en el Intercambiador de calor.....	210
Figura 89. Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de cuatro tubos del intercambiador de calor	213
Figura 90. Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de cuatro tubos obstruidos en el Intercambiador de calor.....	213
Figura 91. Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de cinco tubos del intercambiador de calor	215
Figura 92. Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de cinco tubos obstruidos en el Intercambiador de calor.....	216
Figura 93. Esquema residual de detección del fallo de lectura anormal del instrumento	218
Figura 94. Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de lectura anormal del instrumento en el Intercambiador de calor	218
Figura 95. Diagrama de Cálculo de Residuales. Planta Modelo Sin Fallos Vs Plantas Reales.	221
Figura 96. Gráficas de respuesta, Planta modelo (color Negro) y Plantas Reales con y sin fallas.....	222
Figura 97. Residuales datos planta seleccionada real vs planta modelo sin fallo; REFERENCIA (ResidualPMSFvsPRSF).....	223

Figura 98. Gráficas individuales de los residuales.	224
Figura 99. Residuales datos planta seleccionada real vs planta modelo fallo del Instrumento; (ResidualPMSFvsPRFI)	224
Figura 100. Patrón residual de referencia para detección, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPRSF	226
Figura 101. Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 1 tubo obstruido, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPR1F	226
Figura 102. Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 2 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPR2F	227
Figura 103. Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 3 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPR3F	227
Figura 104. Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 4 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPR4F	228
Figura 105. Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 5 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPR5F	228
Figura 106. Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo del Instrumento, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPRFI	229
Figura 107. Gráfica comparativa de diagramas de frecuencia, valores medios y valores de umbrales dados en los residuales de la planta modelada y las simulaciones de fallas.....	230

Figura 108. Gráfica comparativa de diagramas de frecuencia, valores medios y valores de umbrales de los residuales de la planta modelada sin fallos contra las plantas reales del fallo por obstrucción.	232
Figura 109. Valores probables del sistema de monitoreo.	238
Figura 110. Columna SIEMENS 8WD4208-0AA.....	239
Figura 111. Esquema de implantación del SDDF.	240
Figura 112. GRAFCET Propuesta del programa de SDDF.	243
Figura 113. Esquema físico propuesto de implantación.....	244
Figura 114. Esquema proyectado de la pantalla HMI.	245

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Media y varianza de la variable monitoreada (Tomado de Iserman, 2006, P. 97).	74
Ecuación 2. Cambio de temperatura.	110
Ecuación 3. Parámetros del 63.2% y el 28.3%	110
Ecuación 4. Tiempo de estabilización.	111
Ecuación 5. Tiempo Muerto.	111
Ecuación 6. Ganancia del sistema.	111
Ecuación 7. Función de transferencia de la planta de primer orden con retardo.	111
Ecuación 8. Parámetro K_c	112
Ecuación 9. Parámetro τ_i	112
Ecuación 10. Parámetro τ_d	112
Ecuación 11. Parámetro K_p	113
Ecuación 12. Parámetro K_i	113
Ecuación 13. Parámetro K_d	113
Ecuación 14. Tiempo de estabilización (τ).	115
Ecuación 15. Tiempo Muerto (θ)	115
Ecuación 16. Ganancia del sistema. (K)	115

Ecuación 17. Data Proveniente del proceso real (1)	115
Ecuación 18. Modelo del proceso (2).....	116
Ecuación 19. Relación de modelos funcionamiento normal y modelo del fallo.....	116
Ecuación 20. Representativa del diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos.	117
Ecuación 21. Ecuación de error polinomial	117
Ecuación 22. Ecuación del diagrama residual sin error.	117
Ecuación 23. Ecuación Residual del fallo 1	118
Ecuación 24. Ecuación residual del fallo 2.....	118
Ecuación 25. Ecuación residual del fallo n.....	119
Ecuación 26. Ecuación del residual del fallo n en función del fallo detectado y el modelo del fallo	119
Ecuación 27. Formulación del mapa invariante de los fallos.....	120
Ecuación 28. Representación simplificada de espacios de estados.	121
Ecuación 29. Representación Expandida de los fallos en espacios de estado.	121
Ecuación 30. Representación de un fallo en espacios de estado.	121
Ecuación 31. Representación del fallo en espacios de estado agregando un observador de estado.	121
Ecuación 32. Expresión de la diferencia entre espacios de estados.....	122

Ecuación 33. Expresión de la diferencia en espacios de estado incluido la función estocástica.....	122
Ecuación 34. Error de estimación	122
Ecuación 35. dinámica del error.	122
Ecuación 36. Función del error.....	123
Ecuación 37. Coeficiente de temperatura de resistencia (según Creus Sole, 2010). ..	124
Ecuación 38. Resistencia equivalente en paralelo	125
Ecuación 39. Media Muestral	126
Ecuación 40. Varianza.....	126
Ecuación 41. Desviación Estándar	126
Ecuación 42. Coeficiente de Asimetría.	127
Ecuación 43. Coeficiente de Curtosis.	127
Ecuación 44. Cambio de la variable	128
Ecuación 45. Cambio de la Varianza.....	128
Ecuación 46. Z de la distribución normal.	130
Ecuación 47. Desigualdad para los intervalos de confianza	130
Ecuación 48. Esquema de Hipótesis nula.....	132
Ecuación 49. Esquema de Hipótesis Alternativa X.	133

Ecuación 50. Cambio de temperatura modelo de planta funcionamiento normal.....	179
Ecuación 51. Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia.....	182
Ecuación 52. Cambio de temperatura modelo de planta funcionamiento con un tubo obstruido	202
Ecuación 53. Modelo matemático de la planta en estado de fallo con un tubo obstruido, expresado en funciones de transferencia.....	204
Ecuación 54. Modelo matemático de la planta en estado de fallo con dos tubos obstruidos	206
Ecuación 55. Modelo matemático de la planta en estado de fallo con tres tubos obstruidos.	209
Ecuación 56. Modelo matemático de la planta en estado de fallo con cuatro tubos obstruidos.	212
Ecuación 57. Modelo matemático de la planta en estado de fallo con cinco tubos obstruidos.	214
Ecuación 58. Modelo matemático de la planta en estado de fallo de lectura anormal del instrumento.	217
Ecuación 59. Hipótesis nula H_0 , Hipótesis de detección.....	235
Ecuación 60. Hipótesis H_1 , Hipótesis de diagnóstico por fallo de obstrucción y atascamiento.	236



Ecuación 61. Hipótesis H2, Hipótesis de diagnóstico por fallo lectura anormal del instrumento.	237
Ecuación 62. Hipótesis H3, Diagnóstico de Fallo desconocido	238

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Sistema de codificación alfanumérico	262
Anexo B. Listado general de codificación	264
Anexo C. Hoja de registro de la máquina.	265
Anexo D. Planos del Banco de Control de Temperatura.....	271
Anexo E. FGD-02 Hoja de registro Sensores.	275
Anexo F. Modos de Fallos en intercambiadores de calor de coraza y tubos (OREDA-2002).	278
Anexo G. Modos de Fallos en Recipientes (OREDA-2002).	279
Anexo H. Criterios de valoración de niveles de severidad, ocurrencia y detectabilidad para la construcción del AMEF, (Basado en la NORMA SAE J1739).....	280
Anexo I. Análisis de Modos y Efectos de Fallos en el Intercambiador de calor.	281
Anexo J. Análisis de Modo y Efecto de Fallo en el Tanque de Almacenamiento.	282
Anexo K. Análisis Fallo Intercambiador de calor Fuga externa de procesos a medias.	283
Anexo L. Análisis falla del intercambiador de calor Fuga Externa de Utilidades medias.	285
Anexo M. Análisis fallo del Intercambiado de Calor lectura anormal del instrumento.	287
Anexo N. Análisis fallo del Intercambiado de Calor Enchufado/ Atascado.	289



Anexo O. Análisis fallos en el tanque de almacenamiento Lectura anormal del instrumento	291
Anexo P. Análisis de fallo en el tanque de almacenamiento fuga externa de medios de proceso.....	292
Anexo Q. Lista de chequeo del experimento de identificación.	293
Anexo R. Especificaciones físicas de instalación del SENSOR SITRANS TH100 SLIM.	294
Anexo S. Histórico del proceso de adecuación y captura de información.	295
Anexo T. Capturas de condiciones ambientales del laboratorio y flujo de agua de agua de proceso a diferentes horas y en diferentes pruebas.	297
Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16).	298
Anexo V. Tabla de valores de temperatura para las termorresistencias RTD PT100 (fragmento de la TABLA 6-5 del Libro de Creus Sole 2010).....	314
Anexo W. Lista de variables del programa	315
Anexo X. Recursos utilizados en el proyecto.....	316

GLOSARIO

Análisis: Proceso posterior a la medición que consiste en verificar el cumplimiento de un estándar e identificar las tendencias y las causas de su desviación, a través de la comparación y la relación para determinar el estado de funcionamiento de sistemas, equipos, componentes y partes. (ACIEM, 2012)

Análisis de datos: Proceso posterior a la medición que consiste en comparar y relacionar datos para determinar el estado de funcionamiento de sistemas, equipos, componentes y partes. (ACIEM, 2012)

Análisis de fallos: Examen lógico y sistemático de un elemento que presenta un fallo, con el fin de identificar y analizar el mecanismo de fallo, la causa de fallo y las consecuencias del fallo. (AENOR, 2002)

Avería: Estado de un elemento caracterizado por la incapacidad para desarrollar una función requerida, excluyendo la incapacidad durante el mantenimiento preventivo o por otras acciones planificadas, o debido a la falta de recursos externos. (AENOR, 2002)

Base de datos: Conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso. (ACIEM, 2012)

Causa de fallo: Razón que conduce al fallo. (AENOR, 2002) / Evento o suceso que se considera como fundamento u origen cuando los sistemas, equipos, componentes o partes han perdido la capacidad de funcionamiento. (ACIEM, 2012)

Confiabilidad: probabilidad que un de un sistema, equipo, componente o parte no falle o funcione correctamente en un determinado tiempo en unas condiciones dadas y con unos rendimientos definidos. (ACIEM, 2012)

Desviación estándar: Medida de dispersión que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable. Se determina cómo la raíz cuadrada de la varianza. (ACIEM, 2012)

Diagnóstico de averías: Acciones tomadas para el reconocimiento de averías, su localización e identificación de la causa. (AENOR, 2002) / Proceso que consiste en medir, analizar y conceptualizar el estado de los sistemas, equipos, componentes o partes en relación con un estándar establecido. (ACIEM, 2012)

Disponibilidad: Capacidad de un elemento de encontrarse en un estado para desarrollar una función requerida bajo unas condiciones determinadas en un instante dado o bien durante un intervalo de tiempo determinado, asumiendo que se proveen los recursos externos requeridos. (AENOR, 2002)

Efecto de falla: Hecho o acontecimiento resultante cuando los sistemas, equipos, componentes o partes han perdido capacidad para realizar su función. (ACIEM, 2012)

Ensayo: Toda prueba o examen cuyo fin es determinar las propiedades o características (mecánicas, eléctricas, químicas, entre otras) de un material, producto, proceso o servicio. Los ensayos se realizan acorde a procedimientos estandarizados. (ACIEM, 2012)

Fallo: Cese en la capacidad de un elemento para desarrollar una función requerida. (AENOR, 2002)

Fiabilidad: Capacidad de un elemento de desarrollar una función requerida bajo unas condiciones dadas durante un intervalo de tiempo determinado. (AENOR, 2002)

Ingeniería de mantenimiento: Organismo consultivo que constituye el sistema de control de la dirección del mantenimiento para corregir y mejorar la gestión. Su misión es perfeccionar las técnicas de organización, los métodos y procedimientos de trabajo, favoreciendo la implantación de la política de mantenimiento más adecuada y el desarrollo de nuevas ideas. (ACIEM, 2012)

Mantenibilidad: Capacidad de un elemento bajo unas condiciones de uso dadas para mantenerse en, o ser devuelto a un estado en el cual pueda desarrollar una función requerida, cuando el mantenimiento se ejecuta bajo condiciones determinadas y utilizando procedimientos y recursos preestablecidos. (AENOR, 2002)

Mantenimiento: Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual pueda desarrollar la función requerida. (AENOR, 2002)

Media: Medida de tendencia central, que trata de representar por sí sola a todo un conjunto de datos. Se calcula por medio del cociente entre la sumatoria de los datos y la cantidad de ellos. (ACIEM, 2012)

Medición: Proceso inicial del diagnóstico que consiste en hallar el valor de una magnitud por medio de métodos cualitativos o cuantitativos en sistemas, equipos, componentes o partes. (ACIEM, 2012)

Mejora: Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, destinadas a mejorar la seguridad de funcionamiento de un elemento sin cambiar su función requerida. (AENOR, 2002)

Modo de la falla: Forma particular en la que un sistema, equipo, componente o parte pierde capacidad para realizar su función. (ACIEM, 2012)

Monitoreo de condición: Comprobación del estado real de un equipo, sistema, componente o parte mediante control sistemático periódico o continuo de un parámetro significativo. Equivale a control de estado o control de condición. (ACIEM, 2012)

Monitorización: Actividad desarrollada manual o automáticamente, destinada a observar el estado actual de un elemento. (AENOR, 2002)

Patrón: Hecho aislado y conocido que sirve como fundamento para crear una unidad de medida. (ACIEM, 2012)

Variable: Característica que al ser medida en diferentes elementos, es susceptible de adoptar diferentes valores. (ACIEM, 2012)

Varianza: Medida de dispersión que se determina cómo la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media. (ACIEM, 2012)

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

α	Coefficiente de temperatura de la resistencia
α	Valor de significancia
σ	Desviación estándar
σ_{PRNDet}	Desviación estándar patrón residual normal sin fallo detección
$\sigma_{PR1FDiag}$	Desviación patrón residual con un tubo fallado diagnóstico
$\sigma_{PR2FDiag}$	Desviación patrón residual con dos tubos fallados diagnóstico
$\sigma_{PR3FDiag}$	Desviación patrón residual con tres tubos fallados diagnóstico
$\sigma_{PR4FDiag}$	Desviación patrón residual con cuatro tubos fallados diagnóstico
$\sigma_{PR5FDiag}$	Desviación patrón residual con cinco tubos fallados diagnóstico
$\sigma_{PRFIDiag}$	Desviación patrón residual con fallo del Instrumento diagnóstico
σ^2	Varianza
σ_o	Varianza de la muestra ponderada
θ	Tiempo Muerto (método de los dos puntos)
τ	Tiempo de estabilización (método de los dos puntos)
τ_i	Parámetro τ_i . (Método Ziegler – Nichols)
τ_d	Parámetro τ_d . (Método Ziegler – Nichols)
μ	Valor medio o promedio
μ_o	Valor medio de la muestra ponderada
$\mu_{PRNDe Inf. \alpha/2}$	Límite inferior para detección, del Valor medio del residual de la planta real modelada sin fallos contra la data de la planta real sin fallos
$\mu_{PRNDe Sup. \alpha/2}$	Límite superior para detección, del Valor medio del residual de la planta real modelada sin fallos contra la data de la planta real sin fallos
μ_{PRNDet}	Promedio patrón residual normal sin fallo detección
$\mu_{PR1FDiag}$	Promedio patrón residual con un tubo fallado diagnóstico
$\mu_{PR2FDiag}$	Promedio patrón residual con dos tubos fallados diagnóstico
$\mu_{PR3FDiag}$	Promedio patrón residual con tres tubos fallados diagnóstico
$\mu_{PR4FDiag}$	Promedio patrón residual con cuatro tubos fallados diagnóstico
$\mu_{PR5FDiag}$	Promedio patrón residual con cinco tubos fallados diagnóstico
$\mu_{PRFIDiag}$	Promedio patrón residual con fallo del Instrumento diagnóstico
$\Delta G_m(s)$	Residual que describe los errores del modelo
$\Delta G_p(s)$	Residual que representa los errores de la planta
ΔT_{em}	Delta de Temperatura
$\Delta \mu$	Variación en la media
$\Delta_{Entrada}$	Delta de la entrada
Δ_{Salida}	Delta de la salida
$+\delta$	Umbral superior
$-\delta$	Umbral inferior
$APRNDet$	Asimetría patrón residual normal sin fallo detección
$APR1FDiag$	Asimetría patrón residual con un tubo fallado diagnóstico

APR2FDiag	Asimetría patrón residual con dos tubos fallados diagnóstico
APR3FDiag	Asimetría patrón residual con tres tubos fallados diagnóstico
APR4FDiag	Asimetría patrón residual con cuatro tubos fallados diagnóstico
APR5FDiag	Asimetría patrón residual con cinco tubos fallados diagnóstico
APRFIDiag	Asimetría patrón residual con fallo del Instrumento diagnóstico
C.A.	Coficiente de Asimetría
C.C.	Coficiente de Curtosis.
CPRNDet	Curtosis patrón residual normal sin fallo detección
CPR1FDiag	Curtosis patrón residual con un tubo fallado diagnóstico
CPR2FDiag	Curtosis patrón residual con dos tubos fallados diagnóstico
CPR3FDiag	Curtosis patrón residual con tres tubos fallados diagnóstico
CPR4FDiag	Curtosis patrón residual con cuatro tubos fallados diagnóstico
CPR5FDiag	Curtosis patrón residual con cinco tubos fallados diagnóstico
CPRFIDiag	Curtosis patrón residual con fallo del Instrumento diagnóstico
DataPRSF	Data Planta Real Sin Fallos
DataPR1F	Data Planta Real con Un Fallo
DataPR2F	Data Planta Real con Dos Fallos
DataPR3F	Data Planta Real con Tres Fallos
DataPR4F	Data Planta Real con Cuatro Fallos
DataPR5F	Data Planta Real con Cinco Fallos
DataPRFI	Data Planta Real con Fallo del Instrumento
FDD	Detección y diagnóstico de fallas (Fault Detection and Diagnostic)
$f_{dp}(Y_i)$	función de densidad de densidad de probabilidad
FMEA	Análisis de Modos y Efectos de Fallos
$G_m(s)$	Modelo calculado de la planta real monitoreada, Representada en función de transferencia
$G_p(s)$	Planta real monitoreada, Representada en función de transferencia
H_0	Hipótesis nula (Hipótesis de detección)
H_x	Hipótesis Alternativa X
H_1	HIPÓTESIS ALTERNATIVA H1(<i>hipótesis de diagnóstico del fallo por obstrucción y atascamiento</i>)
H_2	HIPÓTESIS ALTERNATIVA H2; (<i>hipótesis de diagnóstico del fallo por lectura anormal del instrumento</i>)
H_3	Hipótesis H3, Diagnóstico de Fallo desconocido
K	Ganancia del sistema (método de los dos puntos)
K_c	Parámetro K_c (Método Ziegler – Nichols)
K_d	Parámetro K_d (Sintonización de controlador PID)
K_i	Parámetro K_i (Sintonización de controlador PID)
K_p	Parámetro K_p (Sintonización de controlador PID)
M_p	Sobre elongación
NRP	Número de Riesgo Prioritario
PID	Proporcional Integral y Derivativo
PLC	Programador Lógico Computacional

PM1F	Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de un tubo en el intercambiador de calor
PM2F	Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de dos tubos en el intercambiador de calor
PM3F	Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de tres tubos en el intercambiador de calor
PM4F	Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de cuatro tubos en el intercambiador de calor
PM5F	Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de cinco tubos en el intercambiador de calor.
PMFS	Modelo del fallo 2; lectura anormal del instrumento, sensor RTD PT100, en el intercambiador de calor
PMSF	Modelo funcional del intercambiador de calor sin fallos
Q_c	Caudal agua de proceso
R_a	Resistencia anormal de funcionamiento
R_{eq}	Resistencia equivalente
R_o	Resistencia en ohmios a 0°C.
R_t	Resistencia en ohmios a t °C
$r'(s)$	Residual entre planta real contra planta modelada.
ResidualPMSFvsPRSF	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real sin falla (REFERENCIA)
ResidualPMSFvsPR1F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con una falla
ResidualPMSFvsPR2F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con dos fallas
ResidualPMSFvsPR3F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con tres fallas
ResidualPMSFvsPR4F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con cuatro fallas
ResidualPMSFvsPR5F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con cinco fallas
ResidualPMSFvsPRFI	Residuales datos planta seleccionada real vs planta modelo fallo del Instrumento
$t_{63.28\%}$	Constante de tiempo
$T_{28.3\%}^{\circ}$	Temperatura al 28.3% del inicio de la dinámica
$T_{63.2\%}^{\circ}$	Temperatura al 63.2% del inicio de la dinámica
$T_{Inicial}^{\circ}$	Temperatura Inicial
T_{Final}°	Temperatura Final
t_d	Tiempo de retardo
TEE	Tabla Ensayo Error
test	Tiempo de estímulo (s)
t_f	Temperatura final (°C)
t_i	Temperatura inicial (°C)
T_{iC}	Temperatura Salida Agua de proceso
T_{iH}	Temperatura Salida Agua de recirculación
T_{oC}	Temperatura Entrada Agua de proceso
T_{oH}	Temperatura Entrada Agua de recirculación
t_p	Tiempo Pico
t_r	Tiempo de subida
T_r	Temperatura de retardo (°C)



t_s	Tiempo de asentamiento
T_s	Temperatura de asentamiento (s)
$U(s)$	Señal de entrada de la variable manipulada
$X(s)$	Variable de entrada del proceso en las ecuaciones de transferencia
$\bar{X}$	Valor medio de la lectura
$Y(t)$	Variable de salida del proceso real
$Y(s)$	Variable de salida del proceso en las ecuaciones de transferencia
$Y_p(s)$	Variable de salida del proceso real en las ecuaciones de transferencia
$Y_m(s)$	Variable de salida del proceso modelado en las ecuaciones de transferencia
$Y_{\max}$	Valor máximo de la variable de salida
$Y_{\min}$	Valor mínimo de la variable de salida
Z	Z de la distribución normal

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico humano está ligado a las necesidades colectivas y es empujado hacia la satisfacción de estas frente a las oportunidades que plantea el entorno contemporáneo. Dentro de este comportamiento evolutivo social la industria ha sufrido cambios drásticos en todos los sectores productivos: el sector primario (Producción de materias primas), el sector secundario (Manufactura) y el sector terciario (Bienes y Servicios). El ingeniero se ve obligado a competir arduamente por ser un líder en todos los sistemas productivos, ya que se han creado múltiples disciplinas para mejorar la competitividad, las ingenierías se han distinguido por enfocarse ampliamente en la productividad y la reducción de costos.

La confiabilidad operacional es un factor crucial en la industria, especialmente en equipos críticos como los intercambiadores de calor. Estos equipos enfrentan condiciones extremas y requieren una atención especial para garantizar que operen dentro de las condiciones de diseño. Un fallo en este tipo de equipos puede tener consecuencias graves, desde impactos ambientales y riesgos para el personal hasta pérdidas económicas y deterioro de la integridad del sistema. En el campo de la detección y diagnóstico de fallos, los avances tecnológicos han brindado mejores instrumentos de adquisición de datos y han permitido la aplicación de técnicas inteligentes en las diferentes etapas de la protección. Las posibilidades de hibridación y mejora de las técnicas de detección y diagnóstico de fallos continúan creciendo constantemente.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal mejorar la ingeniería de confiabilidad operacional industrial de los equipos críticos estacionarios en el laboratorio de mecatrónica de la Universidad de Pamplona. Para lograrlo, se desarrolló una metodología que permitió el diagnóstico de fallos en estos equipos. La implementación de sistemas de detección y diagnóstico de fallos en equipos estacionarios críticos en entornos industriales ha demostrado beneficios significativos, como una mayor confiabilidad operacional, reducción del tiempo de inactividad, mejora de la seguridad y optimización del rendimiento del equipo.

La estructura del proyecto inicia con una revisión del estado del arte sobre los sistemas de detección y diagnóstico de fallos en los intercambiadores de calor, después se efectuó una evaluación de las características físicas, condiciones operativas, y relación de la variables al interior del intercambiador de calor, se realizó la puesta en marcha del banco y se diseñaron las pruebas de captura de datos en estado normal de funcionamiento y en estado de falla, con la data recolectada se organizó la información, y se normalizo tanto en amplitud como en sincronización de los datos, se aplicaron los métodos de los dos puntos para hacer la identificación matemática de las diferentes plantas y el cálculo de los residuales entre la planta modelada sin fallos con las plantas reales, estos datos permitieron calcular los valores estadísticos descriptivos basados en la función de densidad de probabilidad de frecuencias, dando como resultados umbrales de aceptación con un intervalo de confianza del 95%.

1 EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Las industrias están aplicando cambios importantes “con el incremento de la demanda por la eficiencia, la calidad de la producción y la integración de los procesos y sistemas de control automático en procesos con seguridad crítica y alto costo...” (Iserman, 2006, pág. V) según el párrafo anterior, es posible afirmar que en la actualidad las empresas buscan innovar en la tecnología, los procesos y máquinas son más complejos, con mejor funcionamiento y más seguros, Moubray, en procesos y máquinas complejas se “...incrementa el número de componentes que pueden fallar, incrementa el número de interfaces o conexiones entre los componentes. Esto a su vez incrementa el número y variedad de fallas que pueden ocurrir.” (Moubray, 2004), de igual forma; “...sumado a lo anterior se evidencia el aumento en la demanda de seguridad y confiabilidad” (Zambrano, Tarantino, Aranguren, & Agudelo, 2012), tiempo atrás la ONU en 1975, definió la actividad final de toda entidad organizada como Producción = Operación + Mantenimiento; Tavares, afirma que entre las funciones del mantenimiento en una organización se han encontrado: la reducción del tiempo de paralización, la reparación en un tiempo oportuno y la garantía de funcionamiento en las instalaciones (Tavares, s. f.). Estas tareas aparentemente sencillas, pueden volverse realmente un dolor de cabeza para el área de mantenimiento.

Para atender las necesidades de mantenimiento en las empresas, es necesario comprender ¿cuál es la función del mantenimiento?, “La función concreta de mantenimiento es sostener la funcionalidad y el cuerpo de un objeto o aparato productivo para que cumpla su función de producir bienes o servicios” (Mora, 2009), al igual que las empresas el

mantenimiento también se ha transformado junto con la industria, “El mantenimiento, día a día, está rompiendo las barreras del pasado, hasta dejar de verse como un gasto para convertirse en el mayor generador de utilidades industriales y el responsable de la sostenibilidad de la empresa” (García, 2014), para las empresas quiere decir que al invertir en el mantenimiento de “...los equipos se va a obtener el mínimo costo total de producción, porque no va a ser necesario hacer cambios en corto tiempo de los equipos que se desgastan por su uso, paso de tiempo, accidentes ocasionales, entre otros.” (Salazar, 2017).

La evolución del mantenimiento ha permitido la creación de varias tendencias, vertientes o estrategias del mantenimiento; son muchas clasificaciones basados en diferentes características, sin embargo de forma global es posible resaltar tres grupos de mantenimiento, El mantenimiento correctivo, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento predictivo, (Mantenimiento Industrial, s.f.) se deben resaltar las filosofías o tendencias modernas del mantenimiento entre las cuales hay; la TERO TECNOLOGÍA (Mora, 2009), la gestión de activos o Norma ISO 55000, Mantenimiento total Productivo (TPM) (Nakajima, 1991), el Mantenimiento Centrado En Confiabilidad (MCC) (Moubray, 2004), según Mora (Mora, 2009), las empresas que pueden implementar alguno de estos enfoques tácticos “...alcanzan la madurez para el manejo real y conceptual de las acciones posibles de mantenimiento, empiezan a adoptar una estructura para el desarrollo secuencial, lógico y organizado del conjunto de acciones de mantenimiento que aplican”.

A pesar del desarrollo en el mantenimiento, la amplia tecnología, y los sistemas de control cada vez más veloces que trabajan en tiempo real; Noria Corporation, (Noria Corporation, 2014) afirma que; “Las máquinas fallan por diversas razones; no todas las fallas son iguales” agrega “Esto es lo que se llama “pérdida de función” de la máquina o

componente.” por tal motivo, es necesario buscar la forma de conservar los sistemas críticos y altamente críticos sin la aparición de la tan indeseada falla; “El término “falla de máquina” o “descompostura” usualmente implica que la máquina ha dejado de hacer la función de diseño o lo que se espera de ella” (Noria Corporation, 2014), o como lo dice el enfoque del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), analizar hasta qué punto es o no tolerable la consecuencia de la falla (Moubray, 2004), “Cabe notar que los sistemas automáticos modernos ayudan a prevenir condiciones anormales al disminuir el riesgo, mas no lo excluyen” (Verde, Gentil, & Morales-Menendez, 2013); Gastelbondo, Tarantino, & Aranguren, (Gastelbondo, Tarantino, & Aranguren, 2007) afirman que las variaciones de los parámetros fuera del umbral de funcionamiento también “...afectan en su mayor parte el buen funcionamiento del sistema provocando desde una reducción en el desempeño hasta la posibilidad de accidentes más graves”. Según Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, “Dado que las industrias petroquímicas pierden aproximadamente 20mil millones de dólares cada año, han calificado los eventos anormales como su principal problema que debe ser resuelto” (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002). Sin embargo, no todas las organizaciones productivas pueden aplicar el mantenimiento de forma estandarizada, Moubray (Moubray, 2004) afirma; “...uno de los mayores desafíos que enfrenta el personal de mantenimiento es no solo aprender que son estas técnicas sino decidir cuales valen la pena y cuales no para sus propias organizaciones.”

En muchas aplicaciones industriales, los equipos críticos estacionarios funcionan bajo condiciones altamente exigentes; según Storch De García, “La seguridad de personas, bienes y medio ambiente es una preocupación importante en la sociedad que afecta de manera acuciante a las industrias química y del petróleo” y agrega; pero estas industrias “...se

caracterizan por tener pocos accidentes, pero cuando se producen, de severidad (alcance y efectos) elevada” (Storch De Garcia, 1998). “En la industria generalmente los intercambiadores de calor se encuentran expuestos al medio ambiente, lo cual afecta la vida útil de los sensores, ocasionando fallas parciales o totales. Por eso es importante asegurar la continua operación de los equipos cuando se presentan fallas en los sensores.” (Medina, Escobar, Juárez-Romero, Guerrero-Ramírez, & López-Zapata, 2013), “...Los tanques que contienen líquidos industriales, pueden contener líquidos altamente tóxicos o inflamables y estos o se pueden perder...” (IPN-ESLA-UZ, s. f.). Finalmente; “A pesar de las continuas mejoras en los procesos de supervisión e inspección de accidentes y fallas en oleoductos continúan ocurriendo ya sea debido a errores internos (materiales, procesos de construcción, diseño), por corrosión en diferentes formas (interna, externa, bajo tensión), por desastres naturales (temporadas de lluvia, movimientos sísmicos) o daños originados por terceros (excavaciones por terceras partes, sabotaje). Estos accidentes deben ser tomados muy seriamente no solo debido a las pérdidas económicas que se pueda originar, sino principalmente a la posibilidad de generar pérdida de vidas humanas y daños irreparables al medio ambiente.” (Zambrano M. , 2013).

Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002) coincidiendo con lo expresado anteriormente por Moubray, afirma:

“Existe abundante bibliografía sobre el diagnóstico de fallas de proceso que abarca desde métodos analíticos hasta inteligencia artificial y enfoques estadísticos. Desde una perspectiva de modelado, existen métodos que requieren modelos de procesos precisos, modelos semicuantitativos o modelos cualitativos. En el otro extremo del espectro, hay métodos que no asumen ninguna forma de información

de modelo y se basan únicamente en datos de proceso históricos. Además, dado el conocimiento del proceso, existen diferentes técnicas de búsqueda que se pueden aplicar para realizar el diagnóstico. Tal colección de desconcertante variedad de metodologías y alternativas a menudo plantea un desafío difícil para cualquier aspirante que no sea especialista en estas técnicas. Algunas de estas ideas parecen tan distantes entre sí que un investigador o profesional no experto a menudo se queda preguntándose sobre la idoneidad de un método para su situación de diagnóstico.”

Basados en los párrafos anteriores, es posible afirmar que sin importar la tecnología, las fallas están siempre presentes en cualquier sistema, ya sea crítico o altamente crítico, la ingeniería de confiabilidad, asocia firmemente en la monitorización de máquinas, equipos, procesos y componentes las Técnicas de Monitoreo Basadas en Condición (TMBC) y los sistemas de diagnóstico y detección de fallos, junto con estrategias o filosofías de mantenimiento, Moubray, “...si hacemos elecciones adecuadas, es posible mejorar el rendimiento de los activos y al mismo tiempo contener y hasta reducir el costo de mantenimiento” (Moubray, 2004), ¿los sistemas de detección y diagnóstico de fallas mejoran la confiabilidad de los sistemas estacionarios críticos?

1.2 Formulación del problema

¿Es posible diseñar una metodología basada en la hibridación de técnicas de monitoreo basados en condición y sistemas de detección y diagnóstico de fallos con el propósito de mejorar la ingeniería de confiabilidad industrial aplicada a equipos estacionarios críticos?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Diagnosticar los fallos de los equipos críticos estacionarios para el incremento en la ingeniería de confiabilidad operacional industrial, en el laboratorio de Mecatrónica en la Universidad De Pamplona.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar el estado del arte de los sistemas de detección y diagnóstico de fallos, las técnicas de monitoreo basados en condición enfocados al mantenimiento centrado en confiabilidad.
- Caracterizar los equipos críticos estacionarios del laboratorio de Mecatrónica.
- Diseñar el sistema híbrido de detección y diagnóstico de fallos en un equipo estacionario crítico del laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de Pamplona en Villa del Rosario.
- Proponer la ingeniería de implantación industrial como metodología de mejora para la ingeniería de confiabilidad.

1.4 Justificación de la investigación

El presente proyecto provee a la gestión mantenimiento de una empresa o al grupo de ingenieros responsables del mantenimiento, una herramienta que les permitirá evaluar los sistemas de detección y diagnóstico de fallos de sus instalaciones, medir la eficacia de dichos sistemas ante la presencia de fallos incipientes, crear distintas alternativas de hibridación entre los sistemas de diagnóstico y detección de fallos y la técnicas de monitoreo basados en

condición y finalmente generar alternativas estratégicas de mantenimiento viables para la empresa.

El impacto del desarrollo de la presente propuesta de investigación está definido en la mejora de la ingeniería de confiabilidad y se manifiesta en la reducción de la tasa de fallas de los sistemas productivos, esto se verá reflejado en el aumento de la confiabilidad de los equipos críticos estacionarios, disminuyendo el riesgo de presentar alguna falla y trasladando los costos operativos, de mantenimiento y de tiempo muerto a niveles tolerables

1.5 Limitaciones

Dentro de las principales limitaciones del presente proyecto de tesis, se especifica que la validación de la metodología de mejora, se realizaran en el laboratorio del programa de ingeniería Mecatrónica sede Villa del Rosario, específicamente sobre el Banco de control de temperatura, Figura 1

Figura 1.
 Laboratorios de la sede de Villa del Rosario, (a) Banco de Nivel (b) Banco de temperatura



(a)



(b)

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Algo de historia...

En los años treinta, dentro de los complejos industriales de las refinerías de petróleo y las plantas químicas se desarrollaron los inicios de los procedimientos para la detección y diagnóstico de fallos de sistemas complejos; basados en redundancia física con equipos poco flexibles se monitoreaban los sistemas; se utilizaban registradoras de papel y osciloscopios para las variables de mayor riesgo.

Sobre los años sesenta, en el mundo de las máquinas rotativas, era común el uso de análisis espectrales en el intervalo de frecuencia de señales acústicas para diagnosticar la desalineación, el desbalanceo y los alabes dañados entre otros. Por esta misma época, la industria aeroespacial con el uso de computadoras implemento algoritmos de control sobre los sistemas automatizados. “las primeras contribuciones en los años sesenta sobre los métodos de detección basados en modelos tuvieron como aplicación principal en la industria aeroespacial” (Verde, Gentil, & Morales-Menendez, 2013). Los primeros libros de monitoreo y supervisión surgen de los problemas de la industria química y nuclear (Himmelblau & Riggs, 2012).

Diez años más tarde; el MIT (Instituto técnico de Massachusetts), empleo herramientas basadas en modelos analíticos, como los observadores de estados y métodos de identificación; Beard 1971 implemento la idea era remplazar la redundancia física por la analítica, esto lo llevo al diseño de filtros sensibles a ciertas fallas y se conoce como Beard-jones Fault Detection

Fiter, que posteriormente sería llamado enfoque geométrico, Jones 1973 y Massoumnia 1986.

En los años ochenta, el bajo costo de los dispositivos industriales, los desarrollos tecnológicos de la instrumentación, los avances en el control y la inteligencia artificial, empujaron el desarrollo de técnicas de detección y diagnóstico, bajo la formulación de nuevos algoritmos, se incluyen el análisis de sistemas mecánicos, redes de distribución, la industria del transporte (Verde, Gentil, & Morales-Menendez, 2013), VENKATASUBRAMAIAAN organiza los métodos para la detección y diagnóstico de fallos basados en: datos históricos, modelos cualitativos o modelos cuantitativos.

Destacaron varios grupos académicos; WOLD, 1978 métodos generales de diagnóstico basados en funciones correlacionales entre variables y pruebas de hipótesis; SCHUERMANN 1996, clasificación estadística de patrones, VENKATASUBRAMAIAAN, 1989, Redes neuronales, HENLEY 1984, Sistemas Expertos. Las anteriores técnicas de análisis se desarrollaron apoyándose en teorías estadísticas de los datos históricos. Simultáneamente se empezó a implementar el filtro de kalman y el sistema de máximo de verosimilitud generalizado desarrollado por WILLSKY y JONES 1976, para el diagnóstico de sistemas.

Según Verde, Gentil, & Morales-Menendez, se mostraron varias herramientas "...la idea de usar un observador para generar señales representativas de las fallas de los instrumentos (Clark, 1978), generar directamente relaciones redundantes a partir de las relaciones de un sistema (CHow y willsky, 1984), y buscar las condiciones de estos en condiciones de falla, vía identificación de parámetros (Iserman, 1993)" (Verde, Gentil, & Morales-Menendez, 2013).

A principios de la década de los 90's, se presenta la primera reunión de la IFAC o por sus siglas en inglés International Federation of Automatic Control; que se reúne cada tres años; de esta primera reunión resultaron dos consecuencias importantes, la primera fue que se trataron temas relacionados con la seguridad de proceso, y la potencialidad de los métodos basados en modelos analíticos, y se creó el comité técnico SafeProces, y se logró establecer un vocabulario científico común (Isermann 1997; Iserman y Balle 1997).

Otros aportes fueron presentados desde la inteligencia artificial. Reiter 1987, propuso calificar los eventos de fallas como sospechosos y candidatos. En el año 2003 De Kleer y Kurien, cubre modelos cualitativos y cuantitativos con aplicaciones al sector salud, las telecomunicaciones y la electrónica.

2.1.2 Antecedentes

El mantenimiento es casi tan antiguo como la misma industria, con la llegada de equipos críticos fue necesario el desarrollo de una gran cantidad de técnicas y metodologías capaces de mantenimiento de identificar los fallos en condiciones tempranas de su operación; existe una extensa cantidad de material bibliográfico al respecto, a continuación, se presenta una breve recopilación de algunos artículos recientes y relevantes a considerar.

Alrededor del mundo, investigadores como Catelani, Ciani, & Venzi, (2017) el primero miembro activo de la IEEE, el segundo miembro calidad senior IEEE, redactaron el artículo titulado en inglés "Condition-based Maintenance and Markov Modelling for avionics devices" o de la traducción en al español: "Mantenimiento basado en condiciones y modelado de Markov para dispositivos de aviónica" resaltan en su artículo el interés de las industrias por el mantenimiento, la disponibilidad y las técnicas de evaluación en entornos críticos, señalan que

dichas aplicaciones tienen un alto rendimiento y alta disponibilidad, presentan al mantenimiento basado en condición (CBM) y el modelado de Markov como unas técnicas ideales para la realización del mantenimiento en este tipo de dispositivos, agregan que para aplicación es críticas, la latencia prolongada rara vez es aceptable, estos sistemas se monitorean e inspeccionan con frecuencia, como resultado, se reparan y el sistema se restablece en intervalos de tiempo cortos, no se concierne los ciclos de mantenimiento y por lo tanto, el interés principal es lograr la confiabilidad promedio a largo plazo durante todo el período de ciclos de mantenimiento que corresponde a la solución de estado estacionario del modelo de circuito cerrado donde se tienen en cuenta todas las transiciones de reparación. Como una conclusión importante resaltan que: “el análisis transitorio representa la tasa de falla instantánea promedio durante un único período de mantenimiento cíclico, mientras que el análisis de estado estacionario es una buena aproximación de la tasa de falla promedio a largo plazo en intervalos de mantenimiento múltiples.”

Desde Brasil, los investigadores; Ramos, Paixão de Medeiros, & Strottmann, (2015), presentaron el artículo “Maintenance Cost Optimization for Multiple Components Using a Condition Based Method” o por su traducción al español; “Optimización de costos de mantenimiento para múltiples componentes usando un método basado en la condición” señalan; dado que la planificación del mantenimiento afecta directamente la disponibilidad y el costo del ciclo de vida de los componentes y sistemas, se pueden adoptar técnicas de mantenimiento preventivo para determinar un programa de mantenimiento conveniente, reduciendo el número de eventos de falla inesperados, presenta otros beneficios, como el aumento de la disponibilidad del equipo, la reducción de los costos de mantenimiento y el aumento de la vida útil del equipo. Indican que: El problema de la optimización de CBM puede

formularse como la búsqueda del programa de mantenimiento óptimo para un conjunto de componentes, de modo que se minimice el costo de mantenimiento promedio por unidad de tiempo. Plantean un método de optimización de costos de mantenimiento para múltiples componentes, que cuenta con los beneficios económicos de reparar múltiples componentes al mismo tiempo en lugar de programar intervenciones de mantenimiento para diferentes componentes en diferentes instantes de tiempo, según las recomendaciones de optimización individuales. Concluyen que "...reduce el costo total de mantenimiento programando actividades de mantenimiento preventivo para múltiples componentes simultáneamente, en lugar de programar intervenciones de mantenimiento para diferentes componentes en diferentes instantes de tiempo, basados en optimizaciones individuales."

Otro estudio similar, fue presentado por los investigadores: Kant, Pandey, & Chandrasekaran, (2013), con el artículo titulado; "Analysis of the Condition Based Monitoring System for Heavy Industrial Machineries" o por su traducción al español "Análisis del sistema de monitoreo basado en la condición para maquinarias industriales pesadas" establecen en el artículo que, la condición de una máquina requiere el conocimiento de los efectos de diferentes condiciones de operación, se basa en la capacidad de detectar la disparidad entre una máquina saludable y una defectuosa. Afirman que "En el escenario actual, muchas industrias están reemplazando el mantenimiento predictivo por el mantenimiento hasta el final y, en algunos casos, con el mantenimiento preventivo, donde las piezas mecánicas se reemplazan periódicamente independientemente de la condición mecánica de la maquinaria." Y agregan que "...la medición de la vibración es una de las más esenciales para detectar y diagnosticar cualquier desviación de las condiciones usuales de la máquina. El monitoreo de la vibración de la maquinaria es la técnica más efectiva, utilizada para rastrear las condiciones de operación de

las máquinas, lo que reducirá aún más los costos de mantenimiento y el consiguiente tiempo de inactividad causado por la falla catastrófica de las maquinarias de la industria simultáneamente.”

Los tres artículos presentan al mantenimiento basado en condición, como un sistema de monitoreo que optimiza el funcionamiento de los diferentes equipos y sistemas críticos, como en los dispositivos de aviones, utilizan diferentes técnicas para su implementación, las cadenas de Markov, los sistemas de monitoreo por vibraciones y técnicas de gestión industrial.

El interés por la seguridad industrial a nivel mundial ha llevado al desarrollo de sistemas de detección y diagnóstico de fallos cada vez más efectivos, y rigurosos, se han presentado investigaciones en diferentes lugares del planeta que evidencian la importancia de esta rama de la ciencia.

2.2 Bases teóricas

Los procesos productivos actuales, llevan consigo la responsabilidad de proveer la más alta calidad en sus productos terminados, para lograr este nivel de calidad, muchas empresas hicieron grandes inversiones en la automatización de todos sus procesos, cada sistema productivo es tratado como un conjunto de elementos que trabajan armónicamente con un propósito común; según Duffuaa, Raouf, & Campbell, “Para producir con un alto nivel de calidad, el equipo de producción debe operar dentro de las especificaciones, las cuales pueden alcanzarse mediante acciones oportunas del mantenimiento.” (2013, P. 29)

2.2.1 El mantenimiento industrial

¿Qué es el mantenimiento?: La norma UNE-EN 13306:2002, lo define como la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de

vida de un elemento, destinada a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual puede desarrollar una función requerida.

Existen varias formas de hacer mantenimiento; Zambrano & Leal, (Zambrano & Leal, 2006), presentan una organización bastante amplia en su libro Fundamentos básicos de mantenimiento, clasificándolos de la siguiente manera: Mantenimiento Rutinario, Mantenimiento Programado, Mantenimiento Por Avería, Mantenimiento Correctivo, Mantenimiento Circunstancial, Mantenimiento Predictivo, Mantenimiento Preventivo, otros autores afirman que existen solo tres tipos de mantenimiento; Predictivo, Preventivo Y Correctivo; “Las tareas predictivas implican chequear si algo está fallando. El mantenimiento preventivo consiste en reacondicionar o reemplazar elementos a intervalos fijos. El mantenimiento conectivo significa reparar las cosas cuando están fallando o cuando fallaron” (Moubray, 2004), el mismo autor propone una nueva forma de mantenimiento y las denomina; tareas detectives.

2.2.2 Tendencias actuales del mantenimiento industrial

2.2.2.1 Mantenimiento correctivo.

Esta tendencia es una de las más antiguas formas de mantenimiento, prácticamente nace con la misma industria; según Mora “Las piezas y equipos se llevan al límite de su vida útil, hasta la falla y la recuperación de la función inicial, que consiste en reemplazar la pieza que no funciona” (Mora, 2009).

2.2.2.2 Mantenimiento estratégico o programado.

El mantenimiento estratégico nace en la fusión de tres modelos administrativos conocidos; Formulación, Ejecución Y Evaluación Estratégica; Ruiz, (Ruiz, s. f.) señala que esta tendencia de mantenimiento debe atravesar las siguientes etapas;

1. Visión y Misión.
2. Diagnóstico.
3. Objetivos y Metas.
4. Estrategias y Políticas.
5. Asignación de recursos.
6. Medir y Evaluar Resultados.

2.2.2.3 Mantenimiento total productivo TPM.

Fue desarrollado en Japón en la década de los 60's liderado por SEIICHI NAKAJIMA, quien es el padre del TPM, y está plasmado en el libro "TPM Nyumon" transcrito a varios idiomas, Nakajima, afirma "...es el mantenimiento productivo realizado por todos los empleados a través de actividades de pequeños grupos." (Nakajima, 1991), la principal característica del TPM, es la formulación del mantenimiento autónomo, en la que se valen del trabajador u operador del equipo como primera línea de acción para atender las máquinas.

El desarrollo del TPM se enfoca en doce pasos específicos:

- Paso 1:** anuncio de la alta dirección de la decisión de introducir el TPM
- Paso 2:** Lanzamiento de campaña educativa
- Paso 3:** Crear organizaciones para promover el TPM
- Paso 4:** Establecer políticas y metas para el TPM
- Paso 5:** Formular un plan maestro para el desarrollo del TPM
- Paso 6:** El "disparo de salida" del TPM
- Paso 7:** Mejorar la efectividad del equipo
- Paso 8:** Establecer un programa de mantenimiento autónomo para los operarios
- Paso 9:** Establecer un programa de mantenimiento para el departamento de mantenimiento
- Paso 10:** Conducir entrenamiento para mejorar capacidades de operación y mantenimiento
- Paso 11:** Desarrollo temprano de un programa de gestión de equipos

Paso 12: Implantación plena del TPM y contemplar metas más elevadas

2.2.2.4 *Gestión de activos.*

Es el resultado de las actuales técnicas de gestión del mercado financiero; basado en la norma PAS-55 (*Publicly Available Specification number 55*) de la British Standards Institution, aplicada en entornos competitivos; según Zampolli, "...se relaciona con la manera de administrar los riesgos con eficiencia, tomar decisiones de inversión capaces de generar el máximo retorno de los activos, reducir las pérdidas y asegurar la confiabilidad y la calidad dentro de un mercado regulado y exigente." (Zampolli, 2012).

La estructura de gestión propuesta por esta especificación se basa en los siguientes puntos:

1. Requisitos generales
2. Política de gestión de activos
3. Planes, objetivos y estrategias
4. Controles y facilitadores
5. Implementación de planes de gestión de activos en las actividades de todo el ciclo de vida
6. Evaluación y mejora del desempeño
7. Análisis crítico mediante la revisión del proceso de gestión de activos

2.2.2.5 *Mantenimiento centrado en confiabilidad MCC.*

El origen del mantenimiento centrado en confiabilidad se estableció propiamente a finales de los 80, principios de los 90. La aviación comercial, fue la primera industria en detectar que debía dedicarse igual cantidad de esfuerzo en hacer bien las tareas de mantenimiento como en asegurarse que dichas tareas fueran las necesarias para la aeronaves; según

Moubray, “El darse cuenta de eso dio lugar al desarrollo de procesos de tomas de decisión comprensivos que se conocieron dentro de la industria aeronáutica con el nombre de MSNG3” (2004, P. 6), más adelante la American Society of Automotive Engineers, publica la norma SAE JA 1011 “Criterio de evaluación del proceso de mantenimiento”, en 1991, JHON MOUBRAY publica el libro Reliability-Centred Maintenance o RCM; este hombre conocido como el padre del RCM, define el mantenimiento centrado en confiabilidad de la siguiente manera: “...un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual.”

EL éxito del RCM o por sus siglas en español MCC, se basa en el enfoque que hace sobre el mantenimiento, el mantenimiento no está orientado a la avería, Jhon Moubray el mantenimiento se prioriza de acuerdo a la consecuencia de la falla, de esta manera se organizan las máquinas y equipos por su impacto ante el medio ambiente, la vida humana y el proceso, “...si una falla tiene serias consecuencias, haremos un gran esfuerzo para intentar evitarla. Por otro lado, si no tiene consecuencias o tiene consecuencias leves, quizás decidamos no hacer más mantenimiento...” (Moubray, 2004. P. 10).

El proceso de implantación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad según Moubray, (Moubray, 2004) debe responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
2. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿En qué sentido es importante cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

2.2.3 Conceptos de fallo y falla

2.2.3.1 Avería o falla.

Según Mora, “La falla de un sistema se define como un evento que provoca la pérdida total o parcial de la capacidad de un equipo para realizar las funciones para las cuales se diseña.” (Mora, 2009), está claro una falla o una avería no es un estado deseable de una máquina.

2.2.3.2 Clasificación de las fallas.

A continuación, se presentan las definiciones de una de las clasificaciones de fallas elaborada por Silva & Orrego, (Silva & Orrego, 2014).

Falla Evidente: Un modo de falla cuyos efectos se tornan evidentes para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

Falla Funcional: Un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado.

Falla Múltiple: Un evento que ocurre si una función protegida falla mientras su dispositivo o sistema protector se encuentra en estado de falla.

Falla Oculta: Un modo de falla cuyo efecto no es evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

Falla Potencial: Una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en proceso de ocurrir.

2.2.3.3 Patrones de aparición de la falla en función del tiempo.

Durante un largo periodo de tiempo se relacionaron los conceptos de ciclo de vida del equipo con los patrones de aparición de la falla, a este comportamiento de falla, se le denominó Curva de la bañera o curva de Davies, este patrón de comportamiento identifica tres etapas fundamentales de la vida de un equipo, la fase I o fase de fallas prematuras, en todo equipo las condiciones de transporte instalación y puesta en marcha, inciden en un incremento de la aparición de fallas, esto ocurre mientras llega el periodo de asentamiento; una vez alcanzado el asentamiento inicia la fase II, también conocido como periodo de madurez o vida útil, durante este periodo las fallas son de origen técnico y operativo, la probabilidad de la aparición es mucho menor y tiende a ser constante, se procede a la fase III o periodo de envejecimiento, donde las fallas comienzan a incrementarse, la corrosión, la fatiga y el desgaste pasan factura al equipo los eventos de falla tiene un mayor impacto (Mora, 2009).

El anterior patrón de funcionamiento obedece solo a cierto tipo de máquinas, en general se descubrió que existen por lo menos seis patrones de fallas, (Osarenren, 2015.) ver Figura 2.

Patrones de fallas

Patrón A: Es el ya conocido curva de la bañera, descrito en los párrafos anteriores;

Patrón B: Inicialmente muestra una probabilidad de falla casi constante o de bajo crecimiento, terminando en una zona de deterioro o desgaste.

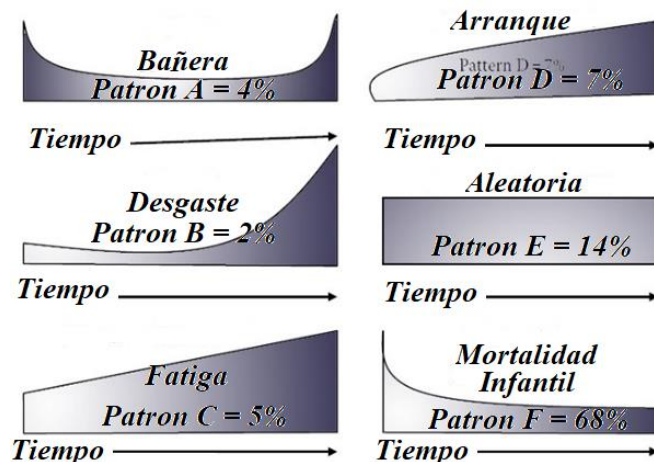
Patrón C: Se caracteriza en equipos donde el crecimiento de la tasa de fallas es lento pero no define claramente una edad de desgaste.

Patrón D: Refiere a equipos donde la probabilidad de falla cuando esta nuevo es baja y se incrementa hasta un valor constante durante su vida útil.

Patrón E: este patrón muestra una probabilidad constante de fallas, en todas las edades por igual.

Patrón F: Este patrón tiene una probabilidad de falla alta durante su periodo inicial de funcionamiento, luego decae hasta una probabilidad constante que nuevamente se incrementa lentamente.

Figura 2.
 Patrones de fallas



Nota Tomado de (Moubray, 2004)

Hoy día, existe una mayor apreciación sobre los patrones de fallas en los equipos, esto ha promovido toda una serie de nuevas tendencias de mantenimiento, basado en condición, predictivo, basado en la edad, basado en el tiempo, por avería entre otros; (Duffuaa, Raouf, & Campbell, 2013).

2.2.3.4 Evolución de la falla (Diagrama I-P-F).

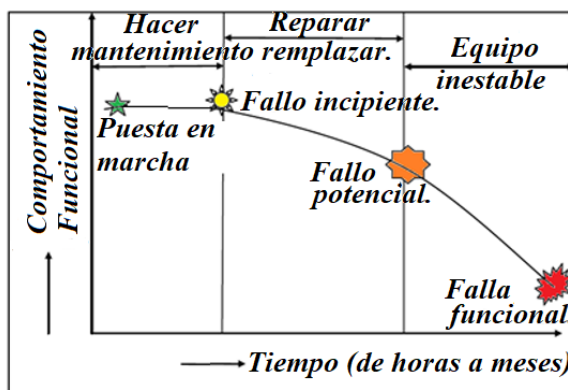
Todos los equipos cuando inician su funcionamiento están en las mejores condiciones posibles de su estado, a medida que cumple su trabajo, presenta una degradación, Las fuerzas repentinas y/o excesivas precipitan la falla inmediata, mientras que las fuerzas habituales inducen y mantienen el progreso de varios tipos de procesos de deterioro bajo los cuales el componente eventualmente ya no puede resistir los niveles de fuerza habituales, (Nachlas, 2005). Las fallas o averías en función de su condición tienen tres etapas específicas para su

aparición; Fallo Incipiente, Fallo Potencial Y Falla Funcional: (Osarenren, 2015.) Ver Figura 3.

Diagrama I-P-F (Basado en Osarenren, 2015, P. 10).

Figura 3.

Diagrama I-P-F (Basado en Osarenren, 2015, P. 10).



Según Moubray, “muchos modos de falla no se relacionan con la edad, la mayoría de ellos da algún tipo de advertencia de que están en el proceso de ocurrir, o de que están por ocurrir.” el autor agrega, el Fallo Incipiente; “Punto en que la falla comienza a producirse (no necesariamente relacionado con la edad)”, El punto de fallo potencial, “...es un estado identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o en el proceso de ocurrir”, El punto de falla Funcional “...se define como la incapacidad de cualquier activo físico de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario.” (Moubray, 2004)

2.2.3.5 Tipos y clases de severidad de las fallas y fallos.

Basado en el concepto presentado en la publicación de OREDA (European Safety, Reliability & Data Association ESReDA, 1998), sección “Severity class type (c)” pagina 42:

FALLA CRITICA: una falla que provoca la completa e inmediata perdida de la capacidad de un sistema para proporcionar su salida.

FALLA DEGRADADA: Es una falla que no es crítico, pero que impide que el sistema proporcione su salida dentro de las especificaciones. Tal falla generalmente pero no necesariamente, sería gradual o parcial y puede convertirse en una falla crítica en el tiempo.

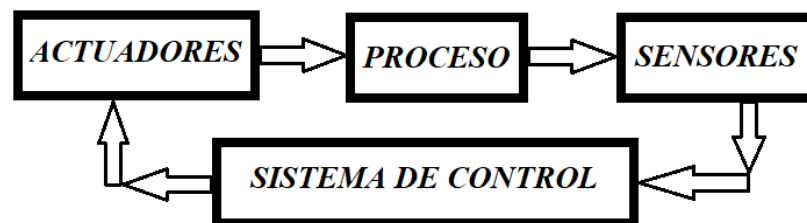
FALLA INCIPIENTE: Una falla que no causa una inmediata pérdida de la capacidad del sistema para proporcionar su salida, pero que, si no se atiende, podría resultar en una falla crítica o degradada en el futuro cercano.

DESCONOCIDA: Falla severidad de la falla no pudo ser deducida.

2.2.4 Automatización

La industria se direccionó hacia la automatización con el propósito de lograr los siguientes objetivos; mejora de la calidad, aumento de la productividad y la flexibilidad del sistema productivo; según Sanchis, Romero, & Ariño, la automatización (ver Figura 4. Sistema Automatizado) está referida al termino automatismo y lo define como “Se define un sistema (máquina o proceso) automatizado como aquel capaz de reaccionar de forma automática (sin la intervención del operario) ante los cambios que se producen en el mismo, realizando las acciones adecuadas para cumplir la función para la que ha sido diseñado.” (Sanchis, Romero, & Ariño, 2010).

Figura 4.
Sistema Automatizado



2.2.5 Control de procesos

El control de procesos hace referencia al control retroalimentado (feedback control); según Mandal, “El control de realimentación es una operación que, en presencia de fuerzas

perturbadoras, termina por reducir la diferencia entre el estado real de un sistema y un estado deseado arbitrariamente variado del sistema y que lo hace sobre la base de esta diferencia” (Mandal, 2006).

Ogata, (Ogata, 2010) resalta la importancia del control automático en la ingeniería y la ciencia y presenta las siguientes definiciones:

Variable controlada y señal de control o variable manipulada. La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.

Plantas. Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular.

Procesos. El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado

Sistemas. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema

debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

Perturbaciones. Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada.

2.2.6 Supervisión automática y monitoreo de procesos

Todo proceso controlado tiene un diagrama esquemático similar al de la figura 3, en él se puede identificar el conjunto ACTUADOR/PLANTA/SENSOR-TRANSMISOR, un CONTROLADOR y un SETPOINT Figura 4.

Sistema Automatizado, que cierran el lazo de retroalimentación, estos elementos conformarían el nivel básico de automatización de la secuencia de control, según (Iserman, 2006), las acciones de supervisión están asignadas en un nivel medio y en los niveles más altos se realizan otras actividades más específicas como la coordinación, la administración y la optimización.

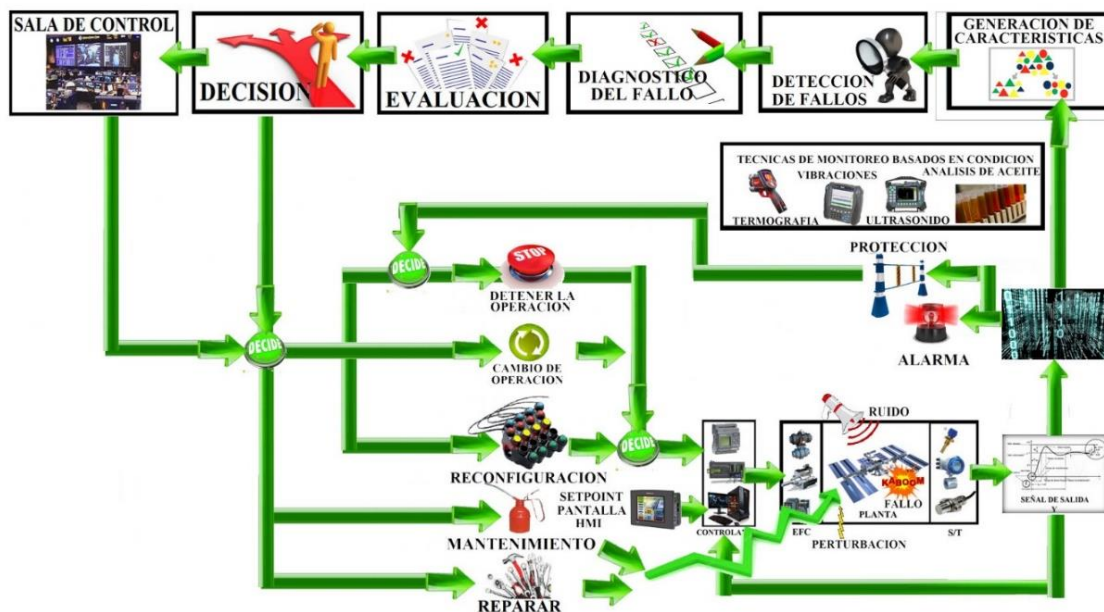
El autor (Iserman, 2006) especifica que la supervisión de un proceso técnico en normal operación, con un sistema de control, se comporta basado en el chequeo de límites o el chequeo de umbrales, de alguna de las variables de salida $Y(t)$, esta medida es comparada con las cantidades especificadas como la zona de tolerancia; $Y_{\min} > Y(t) > Y_{\max}$ activando una alarma si esta es excedida.

Existen varios niveles de tareas, acción o intervención en un proceso, Figura 5.

Niveles de acción en el proceso (Basado en Iserman, 2006, P. 18. Fig.2.4); La primera tarea en

la supervisión es el MONITOREO, Iserman, lo define como medición de variables que son chequeadas con respecto a tolerancias, generando alarmas para el operador, después una alarma es generada y el operador toma las acciones apropiadas para contrarrestar la desviación. (Iserman, 2006), de cualquier manera, si se excede el umbral el estado del proceso es peligroso y la contención puede ser generada de forma automática, esta es la segunda tarea de supervisión; LA PROTECCIÓN AUTOMÁTICA, en el caso de un estado peligroso para el proceso, la función de monitoreo única de forma automática la contención apropiada. Usualmente al proceso está comandado por un botón de emergencia que lo ubica en un estado seguro.

Figura 5.
 Niveles de acción en el proceso (Basado en Iserman, 2006, P. 18. Fig.2.4)



Este proceso es el método clásico de protección y monitoreo automático, pero existen sistemas cuyo proceso no cuenta con un periodo de tiempo muy corto para prevenir una falla catastrófica, para esto es necesario otro tipo de sistema de control.

2.2.7 Sistemas de detección de fallos

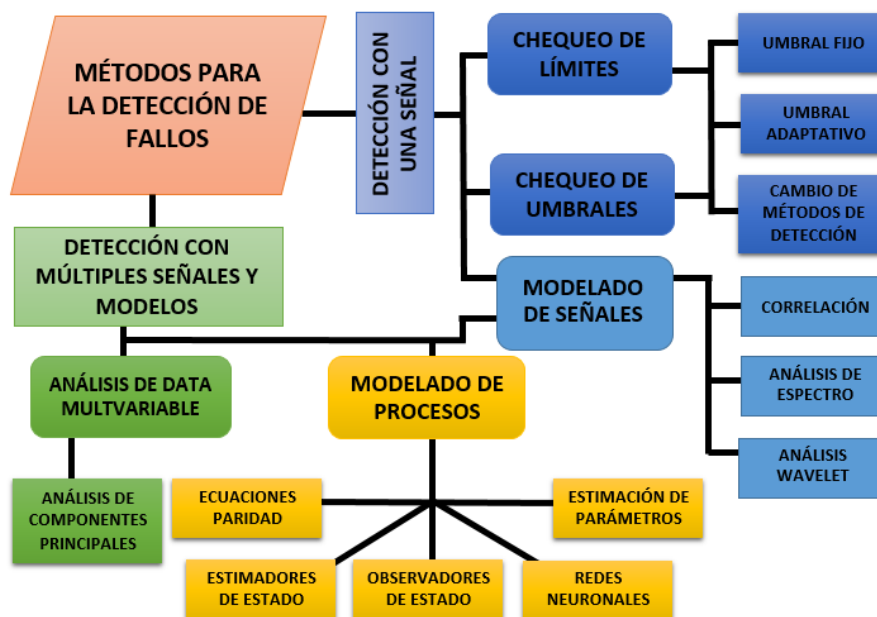
Los métodos avanzados de supervisión, detección y diagnóstico de fallas, son diseñados para satisfacer los siguientes requerimientos: Detección temprana de pequeños fallos con un comportamiento abrupto o tiempo incipiente. Diagnóstico de fallos en el proceso o en partes del proceso, manipulando sus componentes o elementos de medición (instrumentación). Detección de fallos en lazo cerrado. Supervisión de procesos en estados transitorios.

Isermann, (Iserman, 2006) organiza los métodos de detección de fallos de la siguiente forma, Figura 6.

Métodos para la detección de fallos (Basado en Isermann, 2006, P. 6 Fig. 1.4).:

Figura 6.

Métodos para la detección de fallos (Basado en Isermann, 2006, P. 6 Fig. 1.4).

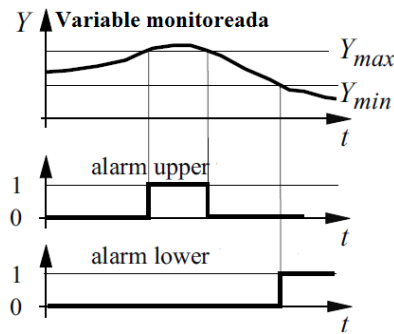


2.2.7.1 Métodos para la detección de fallos.

Chequeo De Límites. (Figura 7.

Esquema del chequeo de límites) Es el método más frecuente y simple utilizado en la detección de fallos, se compara la variable medida o monitoreada $Y(t)$ y esta es comparada con los valores de los valores permitidos, si estos límites son excedidos se activa una alarma.

Figura 7.
 Esquema del chequeo de límites



Chequeo De Umbrales. Normalmente las variables monitoreadas $Y_i(t)$ son del tipo estocásticas, con una cierta función de densidad de probabilidad $P(Y_i)$ tienen un valor medio, y una varianza;

Ecuación 1.

Media y varianza de la variable monitoreada (Tomado de Iserman, 2006, P. 97).

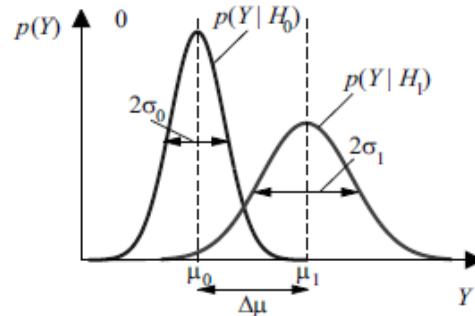
$$\mu_i = E\{Y_i(t)\}; \sigma_i = E\{[Y_i(t) - \mu_i]^2\};$$

Si la media y la desviación estándar cambian debido a la presencia de un fallo sus valores se representarán como μ_1 y σ_1 , produce un cambio en su curva tal como se evidencia en la Figura 8.

Función de densidad de probabilidad de la variable observada Y . (Tomada de Iserman, 2006, P. 98).

Figura 8.

Función de densidad de probabilidad de la variable observada Y . (Tomada de Iserman, 2006, P. 98).



Esta detección se puede realizar off-line, on-line o en tiempo real. Este método es de amplio interés para la detección de fallos.

Modelado de señales. (Figura 9.

Señales armónicas. (a) Amplitud Modulada. (b) Frecuencia Modulada. (c) fase modulada.

(Tomado de Iserman, 2006, P. 86 fig. 6.3).) Muchos procesos son caracterizados por su

comportamiento cíclico en el tiempo u oscilante, resultado de esto se obtiene señales

periódicas o con partes periódicas. los procesos aleatorios como ruidos acústicos, superficies

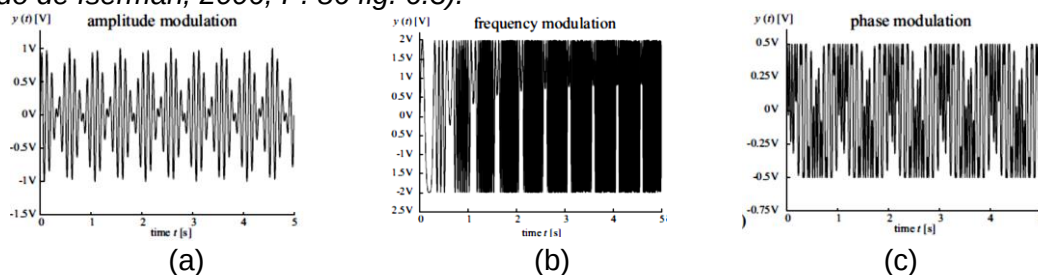
irregulares, flujo turbulento, conmutación ON-OFF de señales eléctricas, entre otras, resultan

en señales estocásticas. Ambos tipos de señales son útiles en la detección de fallos.

Figura 9.

Señales armónicas. (a) Amplitud Modulada. (b) Frecuencia Modulada. (c) fase modulada.

(Tomado de Iserman, 2006, P. 86 fig. 6.3).



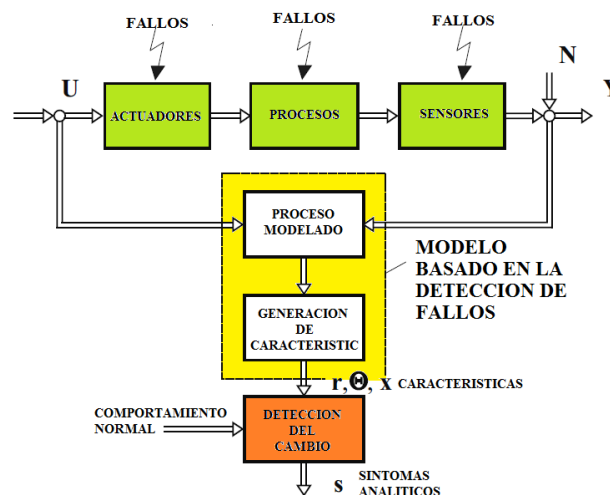
Dentro de los tipos de señales armónicas existen métodos basados en oscilaciones simples, superposición, métodos de amplitud, de frecuencia o fase modulada, y pulsaciones. entre los métodos de señales estocásticas, además el método de las señales estocásticas continuas en el tiempo, y el método de señales estocásticas en tiempo discreto.

Modelado de Procesos. Figura 10.

Esquema general de la detección de fallos basados en el modelado de procesos (Basado en Iserman, 2006, P. 62. Fig. 5.1) Los métodos de detección de fallos basados en el modelado, usan la relación entre la relación de varias variables para extraer la información de los cambios causados por los fallos, esas relaciones son más analíticas en forma de ecuaciones que modelan el proceso, Pero pueden ser utilizados en formas de reglas.

Figura 10.

Esquema general de la detección de fallos basados en el modelado de procesos (Basado en Iserman, 2006, P. 62. Fig. 5.1)



Entre algunas de las metodologías desarrolladas en el modelado de procesos se disponen de; modelado teórico y experimental, modelado estático de procesos, modelado lineal

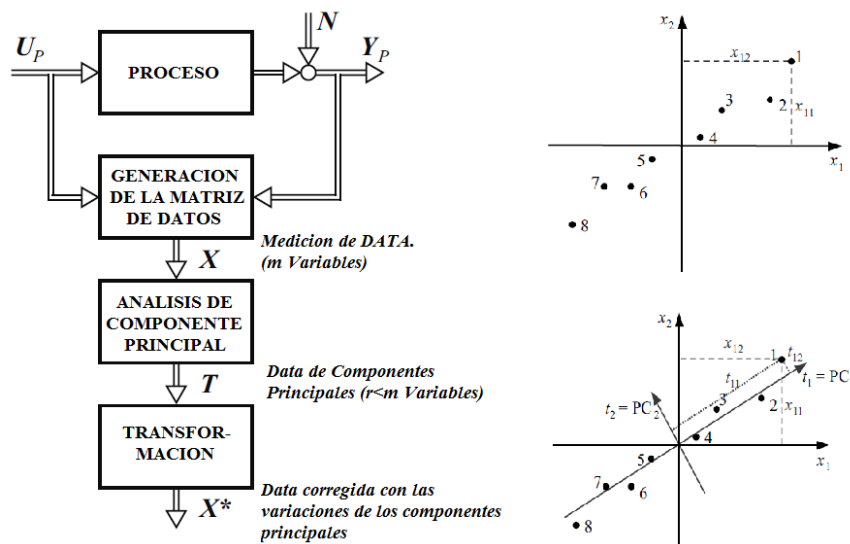
de procesos dinámicos y el modelado de procesos no lineales y adicionalmente el modelado de fallos.

Análisis de señales multivariable. (Figura 11.

Esquema de análisis PCA (Iserman, 2006, P. 268 Fig. 13.1.) En algunos procesos (sobre todo en la industria química) los métodos de detección de fallos requieren de un considerable y eventualmente gran esfuerzo, entonces los métodos para análisis y control de datos ofrecen un camino alternativo. Los métodos de análisis de componentes principales (PCA) y el método de proyección de estructuras latentes (PLS).

Figura 11.

Esquema de análisis PCA (Iserman, 2006, P. 268 Fig. 13.1).



2.2.8 Sistemas de diagnóstico de fallos

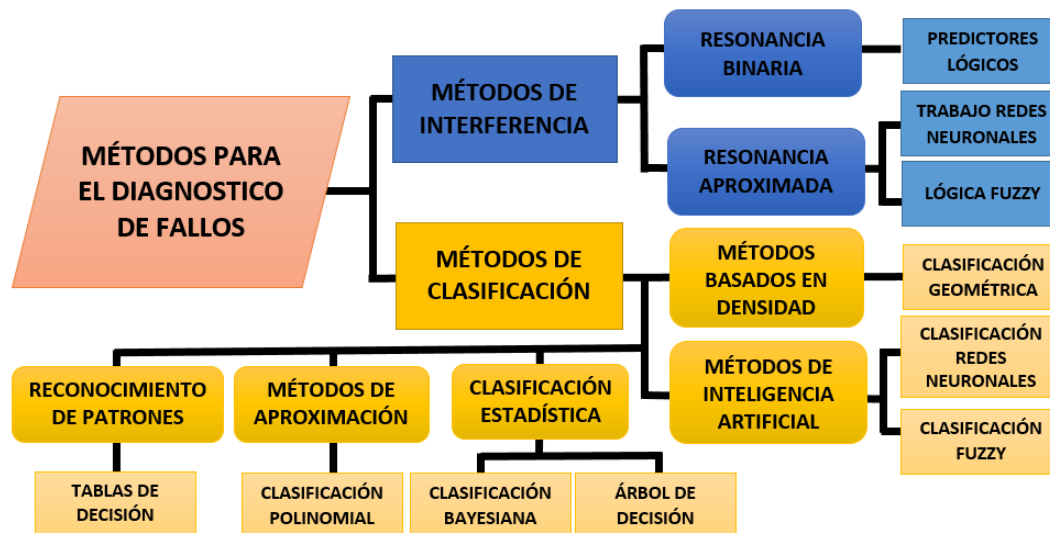
Según Iserman, (Iserman, 2006) Figura 12.

Métodos para el diagnóstico de fallos (Basado en Isermann, 2006, P.290 Fig. 15.3). las tareas para el diagnóstico de fallas consisten en la determinación de los tipos de fallas con muchos

detalles sobre el tamaño de la falla, la localización y el tiempo de detección. El procedimiento del diagnóstico de fallas consiste en observar los síntomas heurísticos y analíticos del equipo y conocer claramente y de forma anticipada los procesos.

Las entradas del diagnóstico basado en conocimiento están todos los síntomas disponibles como hechos y fallos relevantes conocidos del proceso, a continuación se presenta una breve descripción del proceso.

Figura 12.
 Métodos para el diagnóstico de fallos (Basado en Isermann, 2006, P.290 Fig. 15.3).



Síntomas Analíticos: Estos son el resultado del chequeo de límites de señales medidas o señales procesadas modeladas con los métodos de detección de fallos y los métodos de detección de cambios.

Síntomas Heurísticos: Son observaciones del personal operativo en formas de ruidos, oscilaciones, impresiones visuales como el color, el humo, obtenido por

inspección. Este diagnóstico usualmente es representado solo en forma cualitativa y empírica.

Procesamiento estadístico del histórico de fallos: Esta categoría depende del estado estadístico histórico del proceso. Esta data histórica depende de los registros en funcionamiento, las mediciones de cargas, las acciones de mantenimiento y reparación. Se observa con qué frecuencia ocurren las fallas dependiendo de la calidad de las mediciones.

Representación sintomática unificada: Para el procesado de todos los síntomas en los mecanismos de interferencia, es ventajoso el uso de la representación unificada. Una posibilidad es representar los síntomas analíticos y heurísticos asignando números entre cero y uno. Otra posibilidad es el uso del sistema FUZZY.

Correlación entre los síntomas y fallos: La propagación de fallos tiene los siguientes síntomas observables en general las causas físicas tienen efectos correlacionados.

2.2.8.1 Metodologías para el diagnóstico de fallos.

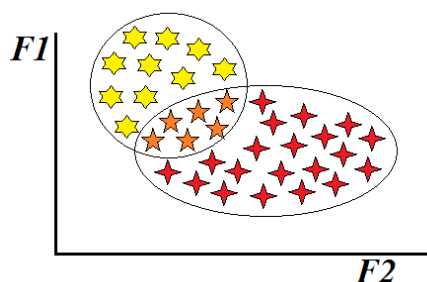
Reconocimiento de Patrones. (Figura 13.

Identificación de patrones.) Estos métodos son utilizados desde hace más de 40 años, Según Verde, Gentil, & Morales-Menendez, se utilizan para "...clasificar objetos dentro de un conjunto factible de clases a partir de un vector de las características que se asocia a un patrón, normalmente con cierta incertidumbre..." (2013, P.147)

El espacio vectorial es conocido como espacio de representación, de esta manera se identifica la clase asociada a un patrón determinado con el propósito de identificar un objeto en

particular, se pueden identificar diferentes tipos de objetos, por ejemplo: texto, ruidos, datos aleatorios entre otros. Verde, Gentil, & Morales-Menendez, aseguran que “Un factor importante para un buen desempeño de los métodos de clasificación es la existencia de patrones bien caracterizados...”(2013, P. 147)

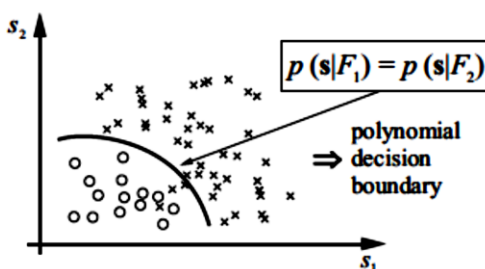
Figura 13.
 Identificación de patrones.



Métodos de aproximación. (Figura 14.

Ejemplo de la clasificación polinomial (Tomado de Isermann, 2006, P. 301 Fig. 16.6).) La clasificación polinomial usa una función especial de aproximación para las posteriores probabilidades. Es una forma lógica de optimización, porque la clasificación de los fallos es conocida en los datos de referencia.

Figura 14.
 Ejemplo de la clasificación polinomial (Tomado de Isermann, 2006, P. 301 Fig. 16.6).

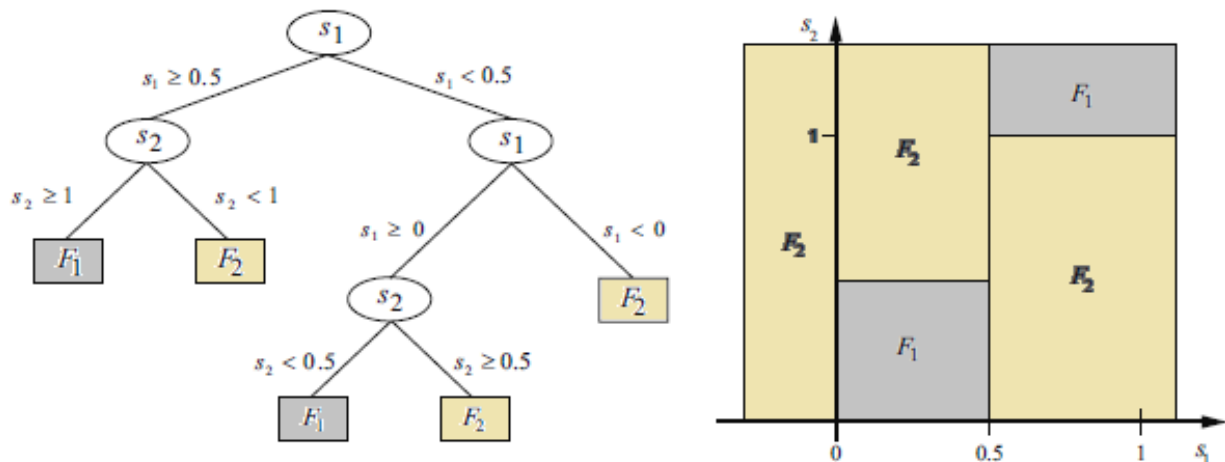


El polinomio de clasificación es utilizado de la siguiente manera: Evaluación de todo el polinomio (Uno por cada tipo de fallo), encontrar el máximo punto calculado, que corresponda a un punto del polinomio planteado.

Clasificación estadística. (Figura 15.

Ejemplo de un árbol de decisión para dos clases de fallos (Tomado de Isermann, 2006, P. 303.Fig. 16.7).) Dentro de este tipo de métodos se aplican los métodos de clasificación bayesianos y el árbol de decisiones; por una parte los métodos de clasificación bayesianos; este método es basado en suposiciones estadísticas sobre la distribución estadística de síntomas.

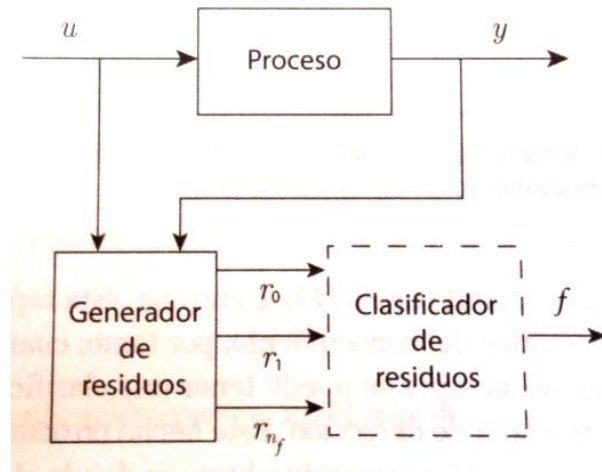
Figura 15.
 Ejemplo de un árbol de decisión para dos clases de fallos (Tomado de Isermann, 2006, P. 303.Fig. 16.7).



Según Verde, Gentil, & Morales-Menendez, "...clasifica patrones de fallas usando la teoría estadística de aprendizaje, asume que la presencia (o ausencia) de las características particulares de una falla no están relacionadas con la presencia (o ausencia) de cualquier otro conjunto de características"(2013), por otra parte los árboles de decisiones; este sistema extrae

más información que las bases de datos; la distribución y construcción de un árbol de decisiones también involucra la probabilidad de ocurrencia del evento.

Figura 16.
 Sistema de diagnóstico con generador de residuos (Tomado de Verde, Gentil, & Morales-Menéndez, 2013, P. 155 Fig. 5.6).



Métodos de inteligencia artificial. (Figura 16.

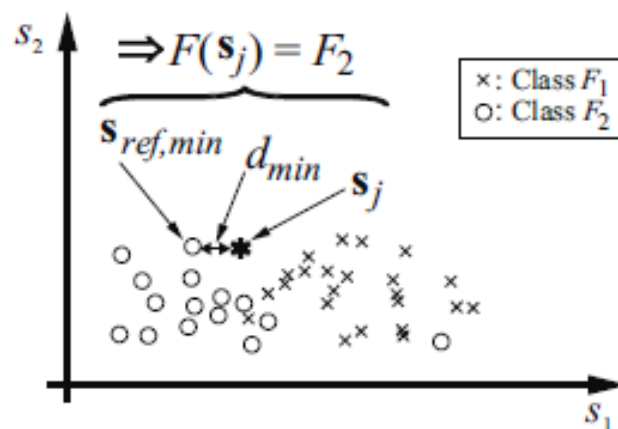
Sistema de diagnóstico con generador de residuos (Tomado de Verde, Gentil, & Morales-Menéndez, 2013, P. 155 Fig. 5.6).) Algunos procesos dadas sus características complejas tienen comportamientos dinámicos que desarrollan caracterizaciones estadísticas poco confiables; al estudiar este tipo de situaciones, se pueden utilizar las redes neuronales artificiales, con su propiedad de aproximadores a partir de muy poca información, son una herramienta ideal para realizar este tipo de diagnósticos; según Verde, Gentil, & Morales-Menendez, existen dos tipos de arquitecturas para desarrollar los clasificadores de fallos; “la primera integra a todo el clasificador en un solo sistema, y en este caso no existe el concepto de residuo” (Verde, Gentil, & Morales-Menendez, 2013), agregan “en la segunda arquitectura

está formada por un generador de residuos que pueden ser diseñados por RNA o con cualquier otra herramienta matemática, y el clasificador de residuos propiamente dicho...”

Métodos basados en densidad. (Figura 17.

Ejemplo de clasificación geométrica (Tomado de Iserman, 2006, P. 299, Fig. 16.5.) Los clasificadores geométricos determinan la clase de afiliación de un dato puntual y su distancia con los datos de referencia. Estos valores de referencia son caracterizados por sus valores y la asignación de la clase.

Figura 17.
 Ejemplo de clasificación geométrica (Tomado de Iserman, 2006, P. 299, Fig. 16.5).



Resonancia Binaria y Aproximada. Para el diagnóstico de fallos basados en reglas de los procesos continuos con síntomas continuos en sus variables, el método de resonancia aproximada es más apropiado que las decisiones binarias. Basado en el conocimiento heurístico disponible, en el modelo heurístico del proceso y al efecto ponderado, diferentes diagnósticos con razonamientos hacia adelante y hacia atrás pueden ser aplicados.

2.2.9 Características deseables de un sistema de diagnóstico de fallas

Venka Venkatasubramaian (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002) y compañía, identifican en un artículo titulado “A review of process fault detection and diagnosis part I: Quantitative model-based methods” un conjunto de características deseables de un sistema de diagnóstico de fallas, los autores señalan que este grupo de características no siempre figuran para todos los métodos de diagnósticos.

Detección rápida y diagnóstico Idealmente un sistema de diagnóstico debe detectar y diagnosticar rápidamente el mal funcionamiento del proceso. Esta característica esta contrapuesta al rendimiento tolerable durante el funcionamiento, debido a que son sensibles a las influencias de alta frecuencia.

Aislamiento. Esta característica hace referencia a la capacidad del sistema de distinguir entre fallas. “En condiciones ideales libres de ruido e incertidumbres de modelado, esto equivale a decir que el clasificador de diagnóstico debería ser capaz de generar una salida que es ortogonal a las fallas que no se han producido” (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002)

Robustez. Existen varios aspectos que hacen que un sistema de detección sea robusto, primero que la degradación del sistema sea lenta, en lugar de fallar de forma abrupta, segundo, es deseable que el sistema soporte los ruidos e incertidumbres.

Identificabilidad de novedad. Esta característica hace referencia a la capacidad del sistema de diagnóstico de decidir si el proceso está operando normalmente o anormalmente, si existe una anomalía, debe identificar si es por un mal funcionamiento conocido, desconocido o novedoso.

Estimación del error de clasificación. Esta característica resultaría muy útil para el usuario, si "...el sistema de diagnóstico pudiera proporcionar una estimación a priori del error de clasificación que puede ocurrir. Dichas medidas de error serían útiles para proyectar niveles de confianza en las decisiones de diagnóstico del sistema..." (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002) y permitirle al usuario formarse una idea de la fiabilidad del proceso.

Adaptabilidad. Muchos procesos industriales, presentan diferentes cambios, algunos por la materia prima utilizada, las condiciones de operación, el estado de envejecimiento de los equipos entre otros, "...Por lo tanto, el sistema de diagnóstico debe ser adaptable a los cambios. Debería ser posible desarrollar gradualmente el alcance del sistema a medida que surgen nuevos casos y problemas, a medida que se dispone de más información." (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002)

Explicación. Los sistemas de diagnóstico deben informar sobre las posibles causas sobre cómo se originó el mal funcionamiento o la falla, este factor es clave para el diseño de sistemas de soporte de decisiones en línea y facilitar la correcta evaluación y acción de los operarios.

Requisitos de modelado. Al respecto los autores referenciados afirman: "La cantidad de modelos necesarios para el desarrollo de un clasificador de diagnóstico es un tema importante. Para una implementación rápida y sencilla de los clasificadores de diagnóstico en tiempo real, el esfuerzo de modelado debe ser lo mínimo posible." (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002)

Almacenamiento y requisitos computacionales. Los sistemas de detección en línea plantean algoritmos computacionales no tan complejos, pero que requieren de un tratamiento detallado y un almacenamiento.

Identificabilidad de fallas múltiples. Esta es una característica compleja, por una parte, la capacidad de identificar diferentes fallas es ideal, pero la interacción entre las fallas proponen un desafío importante. Segundo, plantear por separado combinaciones de fallas se considera infructuoso en procesos grandes. Dado el caso “En un sistema general no lineal, las interacciones suelen ser sinérgicas y, por lo tanto, un sistema de diagnóstico puede no ser capaz de utilizar los patrones de fallas individuales para modelar el efecto combinado de las fallas.” (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002).

2.2.10 Técnicas de monitoreo basadas en condición

Jhon Moubray (Moubray, 2004) especifica que las técnicas de mantenimiento a condición más sensibles suelen involucrar el uso de algún tipo de maquinaria para detectar fallas potenciales. En otras palabras, se emplean equipos para monitorear el estado de otros equipos. Estas técnicas se conocen como monitoreo de condición (CONDITION MONITORING) para distinguirlas de otros tipos de mantenimiento a condición.

El monitoreo de condición abarca varios centenares de técnicas diferentes. Todas esas técnicas fueron diseñadas para detectar los efectos de las fallas (mejor dicho, los efectos de las fallas potenciales, como ser cambios en las características de vibración, cambios en la temperatura, partículas en el aceite lubricante, filtraciones, etc.). Estas técnicas se clasifican en el Apéndice 4 bajo los siguientes títulos:

- Efectos dinámicos

- Efectos de partícula
- Efectos químicos
- Efectos físicos
- Efectos de temperatura
- Efectos eléctricos

Estas técnicas se pueden considerar como versiones altamente sensibles de los sentidos humanos. Muchas de estas técnicas, hoy en día, son realmente muy sensibles y algunas pueden detectar una falla potencial varios meses (y hasta años) antes de la falla funcional. No obstante, una de las mayores limitaciones de casi todos los dispositivos de monitoreo de condición es que controlan sólo una condición. Por ejemplo, un analizador de vibración sólo monitorea vibraciones y no puede detectar cambios químicos o de temperatura. Con lo que la mayor sensibilidad se paga con la pérdida de versatilidad que tienen los sentidos humanos.

Las diferentes técnicas también determinan las fallas con distintos grados de precisión. Se deben tener en cuenta ambos factores cuando se determina la factibilidad de cada técnica.

En general, las técnicas de monitoreo de condición son espectacularmente efectivas cuando son apropiadas, pero cuando son inapropiadas pueden representar una pérdida de tiempo muy costosa y a veces decepcionante. Por lo tanto, el criterio para evaluar si las tareas a condición son técnicamente factibles y si merecen la pena ser realizadas, debe ser aplicado con especial rigor a las técnicas de monitoreo de condición.

2.2.11 Índices de mantenimiento confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad CMD.

“La confiabilidad, la Mantenibilidad y la disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos que tiene el mantenimiento para su análisis y su evaluación” (Mora, 2009).

2.2.11.1 Confiabilidad.

“La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo...” (European Safety, Reliability & Data Association ESReDA, 1998). Un equipo que falle mucho, tendrá una tasa de fallas alta y será poco confiable, si la frecuencia de falla es baja, la confiabilidad se puede catalogar como aceptable, pero, si no hay fallas en el equipo, se considera que este es 100% confiable; “Un equipo con un muy buen diseño, con excelente montaje, con adecuadas pruebas de trabajo en campo y con un apropiado mantenimiento nunca debe fallar (en teoría)...”; (Mora, 2009) sin embargo, “...se puede esperar que el equipo más confiable falle...” (Bazovsky, 2013, pág. 282).

“La confiabilidad está estrechamente relacionada con la calidad de un producto y es con frecuencia considerada un componente de ella. La calidad se define cualitativamente como la cantidad de satisfacción en cuanto a los requerimientos de los usuarios de un producto. La confiabilidad se interesa por cuánto tiempo el producto continúa en funcionamiento después de entrar en operación. Una baja calidad del producto implica disminución de su confiabilidad, de la misma manera que una calidad alta implica confiabilidad elevada.” (Mora, 2009)

“La confiabilidad se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno.” (Mora, 2009).

2.2.11.2 Mantenibilidad.

La Mantenibilidad se asocia con la reparación, con la facilidad con que un elemento o dispositivo se puede restaurar (arreglar) a sus condiciones de funcionamiento establecidas, esto implica que: el diseño, la fabricación, el transporte, la instalación y montaje, los operarios, el ciclo de trabajo, la hoja de vida (es decir los mantenimientos realizados), se incluye tener en cuenta todas las características y hechos previos ocurridos antes de alcanzar ese estado de normalidad, las normas industriales, los proveedores, los repuestos, la limpieza, el impacto ambiental que genera, etc., que influyen directamente en el grado de Mantenibilidad de un equipo (Mora, 2009)

“Mantenibilidad es la probabilidad de que un elemento, máquina o dispositivo, puedan regresar nuevamente a su estado de funcionamiento normal después de una avería, falla o interrupción productiva.” (Mora, 2009).

2.2.11.3 Disponibilidad.

Es una característica que indica la capacidad de un equipo para cumplir su función. Para una empresa la disponibilidad de un equipo es esencial, tanto como la seguridad de este. “Hay varios métodos para lograrlo, y uno es construir un equipo que cuando falle sea fácil de recuperar, y el otro es que sean confiables y, por lo tanto, demasiado costosos” (Knezevic, 1996).

“Disponibilidad es la probabilidad de que el equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables.” (Mora, 2009).

2.2.12 Equipos críticos estacionarios

Una máquina puede fallar por muchos motivos; cada falla que ocurre, tiene un impacto diferente dentro de la organización, en ocasiones la falla incide en la cantidad de elementos de producción, o en la calidad del producto, en ocasiones el daño puede representar consecuencias graves a la seguridad e integridad de las persona y graves daños al medio ambiente (Moubray, 2004), si al concepto visto previamente, también se considera, que los daños se presentan con cierta regularidad y en ocasiones es posible determinar la probabilidad de ocurrencia, se refiere al concepto de criticidad; según Crespo, Moreu de Leon, & Sanches, La “Criticidad: es una medida de riesgo en la operación de un equipo, depende de la probabilidad que se produzca un modo de fallo y su severidad” (Crespo Márquez, Moreu de León, & Sánchez Herguedas, 2004, pág. 125) la criticidad es un valor que se obtiene cualitativamente de una matriz de riesgo, a mayor sea el número con el que se cualifique un sistema, mayor será su criticidad.

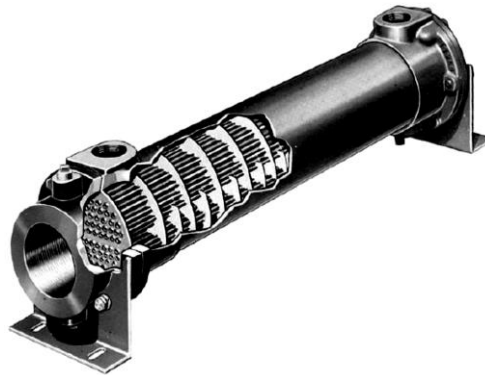
Un equipo estacionario crítico, son todos aquellos equipos industriales que cuyo valor de criticidad es elevado, respecto a la frecuencia de ocurrencia de las fallas y a la consecuencia de esta, a continuación, se describen algunos equipos críticos estacionarios.

2.2.12.1 Intercambiador de calor.

Muchas aplicaciones de ingeniería requieren de dispositivos capaces de realizar el intercambio de calor entre dos fluidos (Figura 18.

Intercambiador de calor (Tomado de Holmman, 2010, P 529 Fig. 10-3.) ; según Incropera & DeWitt, “El dispositivo que se utiliza para llevar a cabo este intercambio se denomina intercambiador de calor, y las aplicaciones específicas se pueden encontrar la calefacción de locales y acondicionamiento de aire, producción de potencia, recuperación de calor de desecho y algunos procesamiento químicos” (Incropera & DeWitt, 1996).

Figura 18.
Intercambiador de calor (Tomado de Holmman, 2010, P 529 Fig. 10-3).



2.2.12.2 Tanque Deposito Industrial.

Según Pullarcot, “Un tanque de almacenamiento es un contenedor, generalmente para almacenar líquidos y, a veces, gases comprimidos (tanque de gas).” (Pullarcot, 2015), Los tanques de almacenamiento operan bajo ninguna (o muy poca) presión interna, diferenciándolos de los recipientes a presión. Los tanques de almacenamiento (Figura 19. Tanque de almacenamiento industrial.) a menudo tienen forma cilíndrica, son perpendiculares al suelo con fondos planos y tienen un techo fijo o flotante.

Figura 19.
Tanque de almacenamiento industrial.



Por lo general, existen muchas regulaciones ambientales aplicadas al diseño y operación de los tanques de almacenamiento, que a menudo dependen de la naturaleza del fluido contenido en el mismo. Los tanques de almacenamiento sobre tierra (AST) difieren de los tanques de almacenamiento subterráneo (UST) con respecto a las consideraciones de diseño y, por lo tanto, a las regulaciones aplicables.

Como se mencionó, los tanques están destinados a transportar grandes cantidades de líquido, vapor o incluso sólidos para una variedad de aplicaciones de proceso. Las aplicaciones de proceso incluyen lo siguiente, aparte de la función de almacenamiento pura:

1. Settling
2. Mezcla
3. Cristalización
4. Separación de fases
5. Intercambio de calor
6. Reactores

Una de las clasificaciones fundamentales empleadas en los tanques se basa en la ubicación del tanque, ya sea sobre la superficie o debajo, cuyas características de diseño y fabricación varían drásticamente. La cantidad de tanques sobre el nivel del suelo es muy

superior a la de los que se encuentran bajo tierra, y tienen su fondo descansando directamente sobre una base de tierra o concreto. En algunos casos específicos, los tanques se colocaron en grillajes, lo que facilita la inspección periódica de las placas inferiores del tanque.

2.3 Aspectos legales

EN 60706-3:2006 Mantenibilidad de equipos. Parte 3: Verificación y recogida, análisis y presentación de datos (IEC 60706-3:2006). (Ratificada por AENOR en mayo de 2007.)

ISO 14224 Industria de Petróleo y Gas – Recolección e Intercambio de Datos de Confiabilidad y Mantenimiento de Equipos

OREDA Offshored Reliability Data 2002. 3rd Edition

SAE JA1011 “Criterio de evaluación del proceso de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad”

SAE J-1739 Potential Failure Mode and Effects Analysis

UNE 200001-3-11:2003 Gestión de la confiabilidad. Parte 3-11: Guía de aplicación. Mantenimiento centrado en la fiabilidad.

UNE 20654-5:1998 Guía de mantenibilidad de los equipos. Parte 5: Sección 4: Ensayos de diagnóstico.

UNE 20863:1996 Guía para la presentación de resultados de predicciones de fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

UNE-EN 13306:2002 Terminología del mantenimiento.

UNE-EN 13460:2003 Mantenimiento. Documentos para el mantenimiento.

UNE-EN 15341:2008 Mantenimiento. Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento.

UNE-EN 61703:2003 Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento.

SAE – J1739/JA 1011 (FMEA)

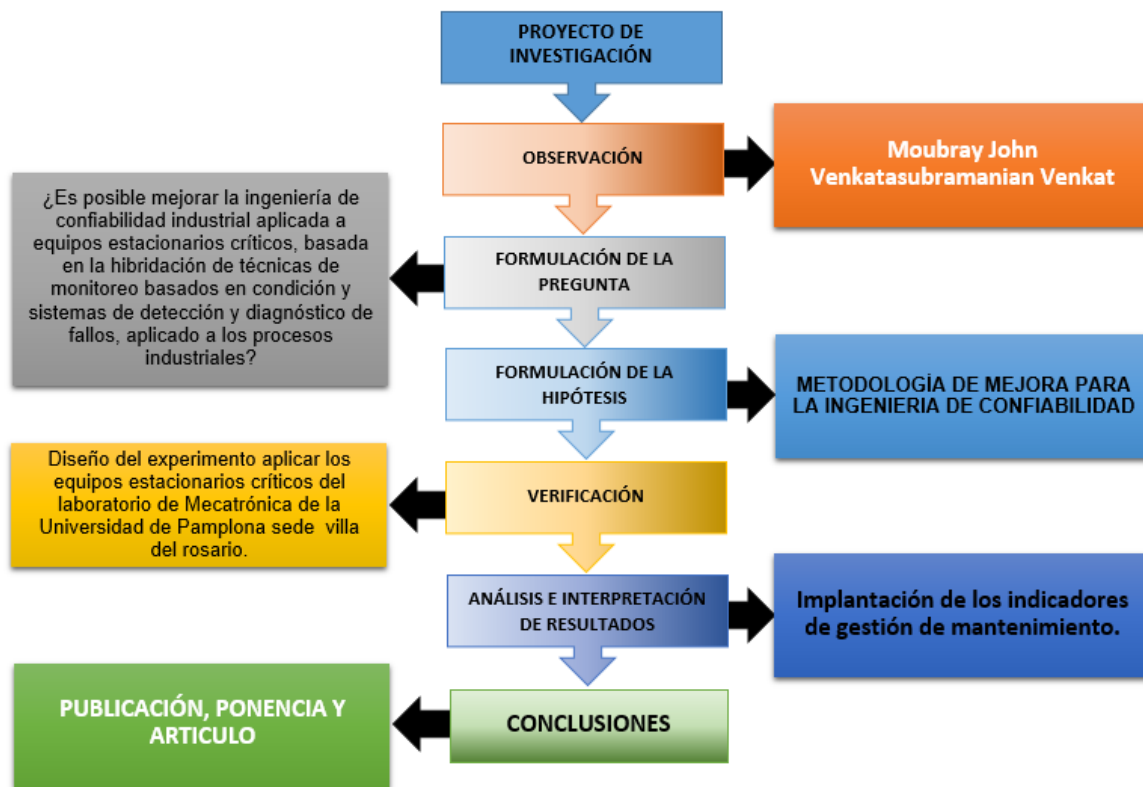
SAE – 1011 Evaluation Criteria for RCM Processes

Las definiciones empleadas en este proyecto de investigación, en cuanto al área de mantenimiento están definidas por la norma Venezolana COVENIN 3049-93 Mantenimiento Definiciones.

3 CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO

Toda investigación científica, debe estar enmarcada dentro de los seis pasos del desarrollo establecidos por el método científico, según Fidias, “EL metodo científico es el conjunto de pasos, tecnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas de investigacion mediante la prueba de verificación de hipótesis” (Fidias, 1999), el autor indica que los pasos son: observacion, formulacion de la pregunta, formulacion de la hipótesis, verificación, analisis e interpretación de resultados, y conclusiones, la Figura 20, presenta la ruta de aplicación del metodo científico en funcion del desarrollo propuesto para el proyecto de investigacion.

*Figura 20.
 Metodología aplicada al proyecto de investigación*



3.1 Diseño de la investigación

El tipo de diseño de investigación más adecuado para el desarrollo del presente proyecto, según Arístides Vara, es el de un diseño descriptivo simple; el autor lo define de la siguiente forma; “Estos diseños están hechos para describir con mayor precisión y fidelidad posible, una realidad...” (Vara, 2012), la presente investigación lleva por nombre diagnosticar los fallos de los equipos críticos estacionarios para el incremento en la ingeniería de confiabilidad operacional industrial, en el laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de Pamplona; este proyecto se plantea en función de cinco objetivos a desarrollar, de manera general, se establece el estado del arte de los sistemas de detección y diagnóstico de fallos aplicados a los equipos estacionarios críticos, caracterizar los equipos estacionarios críticos del laboratorio de Mecatrónica, desarrollar una metodología de mejora para la ingeniería de confiabilidad, proponer la ingeniería de implantación industrial y la validación de la metodología en un equipo estacionario crítico del laboratorio.

La investigación permite establecer una metodología de implantación industrial que incremente la ingeniería de confiabilidad operacional industrial a través de la detección y diagnóstico de fallos en los equipos estacionarios críticos y validar su aplicación en el banco de control de temperatura del laboratorio de Mecatrónica sede Villa del Rosario.

3.2 Descripción de las etapas de investigación

3.2.1 Etapa proemio

Es la etapa inicial del proyecto, sobre la cual se desarrolla el objetivo número uno, y consiste en determinar, las técnicas utilizadas en los intercambiadores de calor o equipos similares para la detección y diagnóstico de fallas (FDD), y las técnicas de monitoreo basado

en condición utilizados en estos equipos. Para su desarrollo se realiza una consulta del estado del arte de estos temas en las bases de datos disponibles en la Universidad de Pamplona. La información primaria se recolecta y se documenta.

3.2.2 Etapa operacional

Es la segunda etapa del proyecto, comprende el desarrollo de instrumentos, a través de los cuales se pueda establecer el estado funcional del equipo, con el objetivo de definir métodos que permitan incrementar la ingeniería de confiabilidad operacional de un equipo, en sus aspectos esenciales como la fiabilidad. Esta etapa involucra el desarrollo del segundo objetivo del proyecto de investigación, consiste en establecer la composición o estructura básica de un equipo y la sinergia entre sus componentes, el desarrollo de la actividad está fundamentado en el análisis documental y la observación no experimental, la información recolectada, se recopilará en una hoja de registro de información técnica de la máquina y los planos del banco, la actividad se enlaza con la aplicación del mantenimiento centrado en confiabilidad al establecer la función primaria o tarea que cumple, el estado de sus sistemas y componentes y las funciones secundarias del equipo, las fallas funcionales, los modos, efectos y consecuencias de falla, fijar las estrategias para prevenir o predecir las fallas. finalmente, con una inspección visual inicial se podrá determinar el estado funcional del equipo y establecer si está en condiciones para su uso, de otra forma concretar las acciones que permitan reestablecerlo a sus condiciones iniciales de funcionamiento.

En la siguiente Tabla 1 se observan las etapas de desarrollo de la investigación y los pasos o secuencias que están contempladas para cada una de ellas;

Tabla 1.
Descripción de las etapas de desarrollo de la tesis.

ETAPAS DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN		
ETAPA	CONCEPTO	PASOS
Proemio	Comprende la estructuración del estado del arte de los sistemas de detección de fallos, las técnicas de diagnóstico de fallos, los sistemas tolerantes a fallos y las técnicas de monitoreo basadas en condición, aplicado a los intercambiadores de calor y equipos similares,	1. Recolección de la Información: Exploración de las temáticas objeto de la investigación, en las bases de datos, disponibles en la Universidad de Pamplona. (ScienceDirect, IEEE, y Springer) 2. Clasificación: de los Artículos más relevantes de los años 2013-2018. 3. Organización: Identificación de los aspectos comunes, características de hibridación y control tolerante a fallos. 4. Análisis: Procesar y documentar la información organizada para el proyecto de investigación y generar conclusiones.
Operacional	Comprende en la caracterización de los componentes y sistemas del laboratorio de Mecatrónica Extensión de Villa del Rosario. El diseño y aplicación de instrumentos de medición y evaluación de los componentes.	5. Caracterización de los componentes del banco de control de temperatura del laboratorio de Mecatrónica extensión Villa del Rosario. 6. Diseño. y aplicación de los instrumentos para la valoración del estado funcional del equipo 7. Diseño y aplicación de los instrumentos para mejorar la fiabilidad del equipo de laboratorio 8. Desarrollo y aplicación de instrumentos para medir y evaluar la capacidad requerida por el personal encargado de manipular el banco.
DDF+.	Comprende la generación de instrumentos para la evaluación de la seguridad del equipo, la atención de eventos anormales y la propuesta del protocolo de implantación industrial.	9. Diseño de los instrumentos para medir y evaluar la seguridad del equipo. 10. Diseño del protocolo de atención de eventos anormales para la selección de estrategias de hibridación entre las técnicas de detección de fallos, las técnicas de diagnóstico de fallos y el control tolerante a fallos. 11. Propuesta de diseño del protocolo de implantación industrial.
Implementación	Comprenden las etapas de aplicación de los instrumentos diseñados la validación del proceso de implantación industrial al caso de estudio: BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA. Y finalmente el análisis de resultados, formulación de conclusiones y recomendaciones.	12. Aplicación de los instrumentos diseñados en la etapa operacional, al caso de estudio: BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA. 13. Aplicación de los instrumentos diseñados en la etapa DDF+, al caso de estudio: BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA. 14. Análisis y procesamiento de la información obtenida de la implantación industrial y la aplicación de los instrumentos diseñados en la etapa operacional, al caso de estudio: BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA. 15. Conclusiones y recomendaciones

Fuente: Autor

3.2.3 Etapa DDF+

Consiste en la etapa fundamental del proyecto y pretende desarrollar un instrumento guía, que establezca una metodología de implantación industrial, que proponga estrategias de hibridación entre las técnicas de detección de fallas y las técnicas de diagnóstico de fallas facilitando alternativas apropiadas, para un proceso o equipo industrial.

3.2.4 Etapa implementación

Es la etapa final del proyecto de investigación, considera la aplicación de los dos instrumentos desarrollados, iniciando con el instrumento propuesto en la etapa operacional, la evaluación inicial de la confiabilidad operacional, y aplicando el instrumento desarrollado en la implantación industrial, sobre un equipo estacionario crítico, caso de estudio “aplicación de los instrumentos sobre el banco de control de temperatura del laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de Pamplona extensión Villa del Rosario” con el objetivo de diagnosticar los fallos de los equipos críticos estacionarios para el incremento en la ingeniería de confiabilidad operacional industrial, en el laboratorio de Mecatrónica en la Universidad de Pamplona.

3.3 Objeto de estudio

El presente proyecto de investigación tiene como objeto de estudio, el desarrollo de una metodología de implantación de un sistema de detección y diagnóstico de falla para los equipos estacionarios críticos.

3.3.1 Equipos e instrumentos.

El banco de control de temperatura, es un laboratorio complejo, debido a los múltiples sistemas que lo conforman, varios de sus componentes tienen características estacionarias de

funcionamiento y cuasi-estacionarias, dentro de sus componentes se presentan varios equipos; el intercambiador de calor, el tanque de almacenamiento, los sistemas de tuberías y la válvula electroneumática.

Intercambiador de calor

Es un equipo crítico, que tiene como principio básico transferir temperatura de un sistema A; a un sistema B, por lo general el proceso de transferencia de calor se realiza a través de la conducción térmica, entre el fluido del sistema A con una superficie, la cual se encuentra en contacto con el fluido del sistema B al reverso de la línea de transferencia de calor.

Tanque De Almacenamiento

Un tanque de almacenamiento también es un equipo crítico, la función principal es contener de manera estática un fluido, bajo unas características específicas de temperatura, y presión.

3.4 Parametrización y variables.

EL banco de control de temperatura, utiliza diferentes señales las cuales trabajan cerca de un punto de operación, pero dada su característica termo-dinámicas y de turbulencia, hacen que su comportamiento sea variable. En el intercambiador de calor, las variables más comunes son la temperatura, pero al considerar la aparición de las fallas es necesario estimar como se afecta su comportamiento. Definir las variables cuantitativas que intervienen en el proceso, permite observar con claridad e identificar qué elementos son independientes y cuales son dependientes, cuales variables se presentarán como interviniente y cuales como variables

anormales. En la Tabla 2 se recopilan algunos detalles importantes de las variables a considerar de la prueba de recolección de datos.

Tabla 2.
Parametrización de variables

VARIABLES DEL SISTEMA	SÍMBOLO	TIPO DE VARIABLE	Control	RANGO DE VALORES	INSTRUMENTO
Caudal agua de proceso	Qc	Independiente	No controlada	1 – 35 (L/min)	Caudalímetro
Temperatura Entrada Agua de proceso	ToC	Independiente	No controlada	18 – 25 (°C)	RTD-PT 100 TT103
Temperatura Salida Agua de proceso	TiC	Dependiente	Monitoreada	22 – 35 (°C)	RTD-PT 100 TT104
Caudal agua de recirculación	Qh	Depende del funcionamiento de la motobomba	Programada	1 – 135 (L/min)	CONTROL
Temperatura Entrada Agua de recirculación	Toh	Independiente	Programada	18 – 60 (°C)	RTD-PT 100 TT101
Temperatura Salida Agua de recirculación	Tih	Dependiente	No controlada	50 – 58 (°C)	RTD-PT 100 TT102
Apertura de la Válvula		Dependiente	Controlada	0 – 100 (%)	EFC
Porcentaje de funcionamiento de la bomba		Independiente	Programada	0 – 100 (%)	EFC
Resistencia térmica		Dependiente	No controlada	0 - 1	EFC

Fuente: autor

Según la Tabla 3.

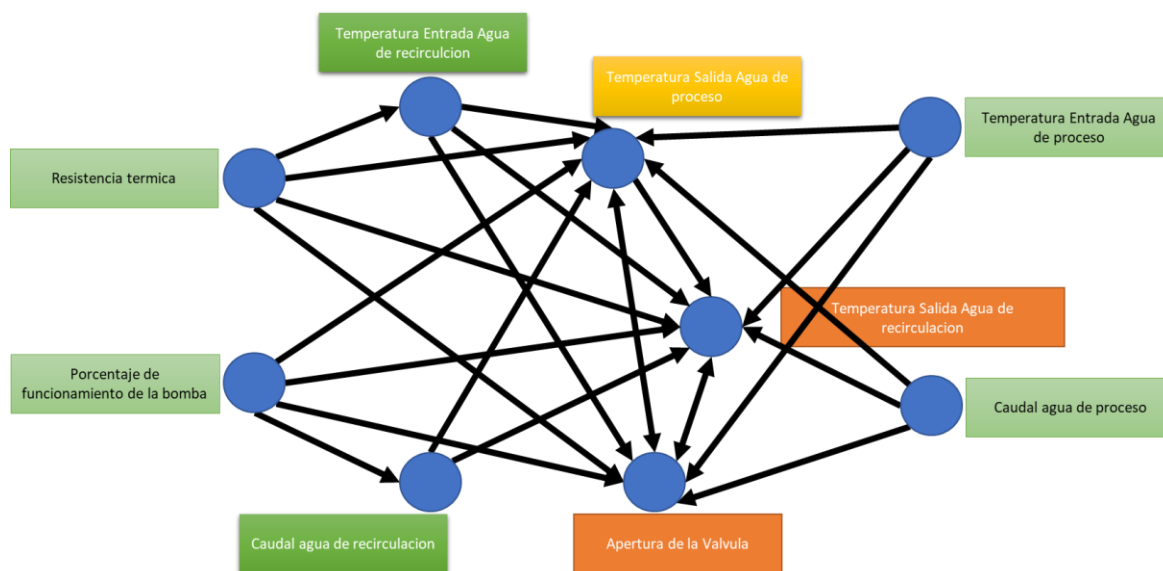
Relación de dependencia entre variables, la temperatura entrada agua de proceso, caudal agua de proceso, porcentaje de funcionamiento de la bomba y resistencia térmica funcionan como parámetros independientes.

Tabla 3.
Relación de dependencia entre variables

Relación de dependencia									
VARIABLES DEL SISTEMA	Temperatura Entrada Agua de proceso	Temperatura Salida Agua de proceso	Temperatura Entrada Agua de recirculación	Temperatura Salida Agua de recirculación	Caudal agua de proceso	Caudal agua de recirculación	Apertura de la Válvula	Porcentaje de funcionamiento de la bomba	Resistencia térmica
Temperatura Entrada Agua de proceso	No Aplica	Independiente	independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
Temperatura Salida Agua de proceso	Dependencia	No Aplica	Dependiente	Independiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente
Temperatura Entrada Agua de recirculación	Independiente	Independiente	No Aplica	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Dependiente
Temperatura Salida Agua de recirculación	Dependiente	Dependiente	Dependiente	No Aplica	Dependiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente
Caudal agua de proceso	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	No Aplica	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente
Caudal agua de recirculación	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	No Aplica	Dependiente	Dependiente	Independiente
Apertura de la Válvula	Dependencia	Dependiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente	Dependiente	No Aplica	Dependiente	Dependiente
Porcentaje de funcionamiento de la bomba	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	No Aplica	Independiente
Resistencia térmica	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	Independiente	No Aplica

Fuente autor

Figura 21.
 Gráfica de relación de dependencia entre variables



La Figura 21.

Gráfica de relación de dependencia entre variables, identifica a Temperatura Salida Agua de proceso, que corresponde a la variable monitoreada del sistema, la Apertura de la Válvula, que corresponde a la variable controlada y Temperatura Salida Agua de recirculación, la cual es una variable controlada indirectamente, son las variables que presentan mayor dependencia.

3.5 Los instrumentos y mecanismos de recolección de información

Un instrumento de medición es “...aquel que registra datos observables que representan verdaderamente a los conceptos o variables que el investigador tiene en mente” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014), en la actual investigación se necesitó de diversos instrumentos de recolección de información; tales instrumentos son:

- Hoja de registro de la máquina.

- Planos de la máquina.
- Diagrama de Entrada – Proceso – Salida.
- Sistemas de control y protección
- Análisis de Modos y Efectos de Fallos AMEF.

Dentro del diseño de los instrumentos y mecanismos de recolección de información se tuvo en cuenta las características de autenticidad, fiabilidad, Integridad, y disponibilidad, contempladas en la norma UNE-ISO 15489-1 información y documentación. gestión de documentos.

Codificación de los formatos de recolección de información

3.5.1 Diseño de la hoja de registro de la máquina

La primera actividad de la etapa operacional se diseñó con el propósito de conocer a profundidad los equipos estacionarios críticos, para esto se recopiló la información aportada por el fabricante, el administrador del equipo, los manuales detallados de los diferentes sistemas, los usuarios, toda esta información se organizó dentro de la HOJA DE REGISTRO DE LA MÁQUINA.

Según, Torres, La hoja de registro de la máquina debe contener “...nombre de la máquina, número interno y modelo, origen, información del fabricante y proveedor de repuestos con sus respectivos medios de comunicación, elementos a cambiar, antigüedad de esta, componentes mecánicos, eléctricos, de seguridad...” (Torres., 2005) entre otros aspectos.

3.5.2 Planos de la máquina

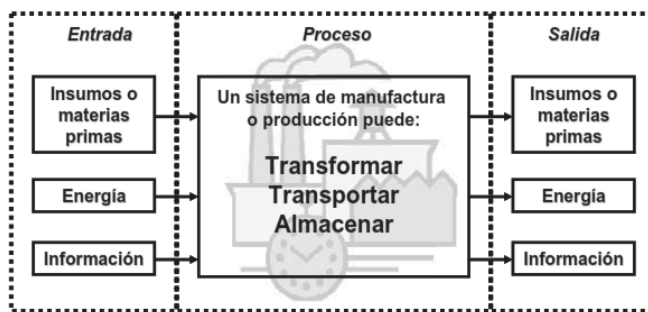
Según Higgins, Mobley, & Smith, Los planos de instalación eléctrica y de tuberías para la planta deben estar disponibles para los trabajadores del área de mantenimiento para una evaluación rápida en la ejecución de su trabajo. Estos deben mantenerse actualizados, los

planos representan un ahorro de tiempo y dinero para usar en la planificación de la reparación, reemplazo o modificación de las instalaciones existentes. (Higgins, Mobley, & Smith, 2002, pág. 1.24)

3.5.3 Diagrama entrada, proceso y salida (E-P-S)

Basados en el enfoque Kantiano, "...en un sistema básico de producción se pueden reconocer tres elementos: productores (personas), fábricas (entorno) y máquinas (artefactos), los cuales interactúan y permiten la elaboración industrial..." (Mora, 2009, pág. 47) el sistema de agregación de valor fabril, empresarial o de servicios, consta de tres etapas (Figura 22); Entrada, Proceso, Salida.

Figura 22.
 Sistema de agregación de valor fabril, empresarial o de servicios (Mora, 2009, pág. 47).



3.6 Criterio para la selección de los fallos a detectar

El banco de control de temperatura es una máquina elaborada con múltiples componentes, cada componente desarrolla un proceso específico, cumpliendo con su función de diseño, son muy diversos los daños que se pueden encontrar dentro de un solo componente y con consecuencias igualmente variadas, para los equipos seleccionados.

EL criterio utilizado para seleccionar los fallos a detectar se establece al evaluar el Número de Riesgo Prioritario; para calcular este indicador es necesario aplicar el Análisis de

Modos y Efectos de Fallos, por sus siglas en ingles FMEA; según la NORMA SAE J 1739, Los objetivos de dicha norma, se pueden cumplir mejor considerando lo siguiente: 1. Identificación de riesgo, 2. Priorización de riesgos y 3. Mitigación de riesgos (SAE International, 2009); un FMEA permite determinar todas las posibles formas que un proceso o producto puede fallar (McDermott, Mikulak, & Beauregard, 2009), esta metodología permite alcanzar una mejor comprensión de lo que ocurre con el banco de control de temperatura al presentar una falla en sus componentes, de cierta manera, el método permite evaluar los aspectos más importantes de una falla o fallo, tal como son SEVERIDAD, OCURRENCIA Y LA DETECCIÓN

Al multiplicar la clasificación de los tres factores (gravedad $\times$ ocurrencia $\times$ detección), se determinará un Número de Riesgo Prioritario (NRP) para cada modo y efecto de falla potencial. El número de prioridad de riesgo (que variará de 1 a 1,000 para cada modo de falla) se usa para clasificar la necesidad de acciones correctivas para eliminar o reducir los modos de falla potenciales.; (McDermott, Mikulak, & Beauregard, 2009)

3.7 Modelos matemáticos para el sistema de detección y diagnóstico de fallos de la planta.

Los modelos matemáticos son herramientas de análisis que simplifican la interpretación de un evento físicamente complejo y busca un planteamiento matemático que lo interprete de forma adecuada y con una gran precisión; según (SMITH & CORRIPIO, 2012)

“El trabajo del ingeniero es diseñar un sistema de control que pueda mantener la variable controlada en el punto de control. Cuando ya ha logrado esto, debe ajustar el controlador de manera que se reduzca al mínimo la operación de ensayo y error que se requiere para mantener el control. Para

hacer un buen trabajo, el ingeniero debe conocer las características o “personalidad” del proceso que se va a controlar, una vez que se conoce la “personalidad del proceso” el, ingeniero puede diseñar el sistema de control y obtener la “personalidad del controlador” que mejor combine con la del proceso.”

Con base al párrafo anterior, la interpretación matemática de un evento físico permite capturar la “personalidad” del evento, aquellos rasgos que caracterizan la identidad del suceso, usando fórmulas que se adaptan a modelos de primer y segundo orden, según (Ogata, 2010) “Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien.”

3.7.1 Aspectos básicos para la identificación de la planta

Existen diferentes modelos matemáticos utilizados en el control de procesos, para identificar la física del proceso a utilizar, estos modelos dependen del tipo de sistema a trabajar y las condiciones propias del funcionamiento o el desarrollo de los cambios en el proceso. La caracterización de un Intercambiador de calor, del tipo coraza y tubos, está basada en el monitoreo de variables de temperatura en las entradas y salidas del intercambiador y las condiciones de flujo en las dos trayectorias, el cual se comporta bajo las siguientes características:

- a. Un porcentaje alto de funcionamiento de la bomba; implica un caudal alto de flujo de agua en la línea de agua caliente, y este transfiere una cantidad de calor mayor a la línea de agua fría, al variar el porcentaje de funcionamiento de la bomba a otro nivel inferior, el flujo de agua baja y la temperatura a la salida de la línea de agua fría también

baja; es decir la causa y el efecto son proporcionales, por otro lado, el proceso reúne una gran cantidad de incertidumbres, rugosidades, distribución no lineal del flujo de calor, líneas de gradientes de temperaturas al interior del intercambiador, por tal razón el proceso se considera un SISTEMA NO LINEAL.

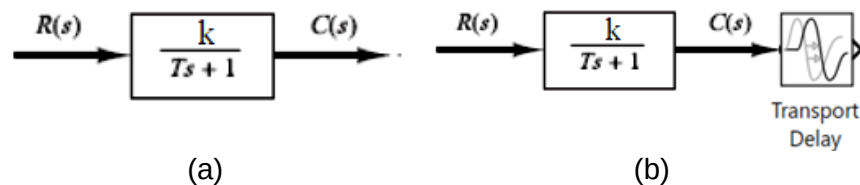
- b. Los flujos máscicos en las líneas de agua caliente, está controlado por el variador de velocidad del intercambiador de calor, pese a que la línea de flujo de agua fría depende de la corriente de agua del sistema público, pueden ser consideradas como constantes, adicionalmente, es posible despreciar el efecto de la perdida de calor con el ambiente, que hace el cambio de temperatura durante el día, puesto que el tamaño del intercambiador es pequeño y los experimentos se desarrollaron en horarios similares de 8 am a 2 pm. Esta descripción permite establecer que el proceso es variante en el tiempo o en el DOMINIO DEL TIEMPO.
- c. Los procesos que involucran cambios de temperaturas son considerados lentos, es decir que requieren periodos de tiempo más largos para alcanzar la estabilización o mantener un cambio.

El principal objetivo de formular un modelo matemático, consisten en describir el funcionamiento y análisis de la respuesta transitoria y estacionaria del sistema, para el proceso descrito anteriormente, se utilizará un modelo matemático de identificación para el sistema de segundo orden.

Los sistemas de primer orden se pueden representar, utilizando el software SIMULINK, con el siguiente diagrama de bloques (Ogata, 2010), (ver Figura 23 a); Debido a la acción que

involucra el tiempo muerto del sistema, el diagrama de bloques de un sistema de primer orden cambia (ver Figura 23b), y se representa :

Figura 23.
 Representación gráfica de un sistema



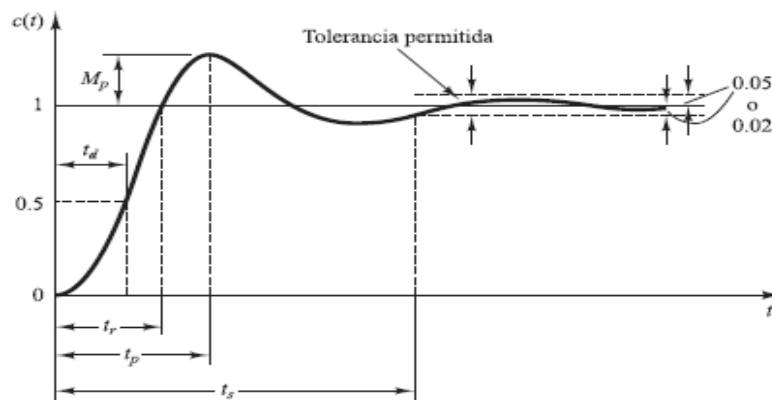
Nota: (a) Diagrama de estado de un sistema de primer orden, (b) Diagrama de estado de un sistema de primer orden con retardo

Donde:

K = Ganancia

T = Tiempo de estabilización

Figura 24.
 Características típicas de una curva de respuesta a un sistema de segundo orden (tomado de Ogata 2010).



Donde:

td = Tiempo de retardo

tr = Tiempo de subida

tp = Tiempo Pico

Mp = Sobre elongación

ts = Tiempo de asentamiento

La gráfica de respuesta del sistema con retardo; presenta unas características similares a la de la Figura 24.

Características típicas de una curva de respuesta a un sistema de segundo orden (tomado de Ogata 2010). Donde se aprecian los principales indicadores de análisis (Ogata, 2010).

3.7.2 Modelo matemático para la identificación de la planta (método de los dos puntos).

El método de los dos puntos (Figura 25.

Proceso para identificar la planta con el método de los dos puntos.) es un modelo matemático estadístico aproximado, que permite deducir los principales parámetros de una gráfica real de respuesta, para un sistema conocido, el método parte de las premisas que inicialmente el proceso se encuentra funcionando de forma estable, en lazo abierto (sin ninguna acción de control), a partir de este punto se incide un estímulo conocido, sobre la variable manipulada, variando la acción de elemento final de control a una segunda posición definida, este método es desarrollado por la secuencia metodológica desarrollada a continuación:

En el caso particular del presente proyecto de investigación, la variable manipulada es la frecuencia del variador de frecuencia que gobierna el flujo de agua caliente en la línea de agua de recirculación en el intercambiador de calor, esta variación, tiene efecto sobre la temperatura a la salida del agua fría del intercambiador de calor, siendo esta última la variable controlada, se inicia de la estimación de los valores tomados de la data recolectada en el proceso y se ubican los datos requeridos en Tabla 4.

Referencias iniciales y finales de temperatura.

Figura 25.
 Proceso para identificar la planta con el método de los dos puntos.



Tabla 4.
 Referencias iniciales y finales de temperatura

Puntos	Temperatura (C°)	Ciclos	STEP
Inicio	$T^{\circ}_{Inicial}$	$C_{inicial}$	$S_{inicial}$
Final	T°_{Final}	C_{final}	S_{final}

Basados en los datos de la Tabla 4 Se procede a calcular Ecuación 2 el cambio de temperatura (variable controlada)

Ecuación 2.
 Cambio de temperatura.

$$\Delta Tem = T^{\circ}_{Final} - T^{\circ}_{Inicial}$$

Con la Ecuación 2, se calculan los parámetros iniciales al 63.2% y al 28.3% de la temperatura T4, Ecuación 3.

Ecuación 3.
 Parámetros del 63.2% y el 28.3%

$$T^{\circ}_{63.2\%} = T^{\circ}_{Inicial} + 0.632 * \Delta Tem$$

$$T^{\circ}_{28.3\%} = T^{\circ}_{Inicial} + 0.283 * \Delta Tem$$

Con los valores de la variable controlada al 63.2% y al 28.3%, se relacionan con los valores equivalentes en la gráfica en el eje de las abscisas, para el caso en particular la cantidad de ciclos de toma de data.

$$T^{\circ}_{63.2\%} \rightarrow C_{63.2\%}$$

$$T^{\circ}_{28.3\%} \rightarrow C_{28.3\%}$$

Identificados los valores de los ciclos, se usa el factor de conversión, basado en el número de segundos por ciclo, para el caso en particular la relación de conversión es:

$$1\text{Ciclo} = 1.5\text{ Segundos}$$

Se fijan los tiempos (en segundos) relacionados a los parámetros utilizados en la identificación:

$$\begin{aligned} C_{63.2\%} &\rightarrow t_{63.2\%} \\ C_{28.3\%} &\rightarrow t_{28.3\%} \end{aligned}$$

Con los tiempos estimados, se calculan los parámetros característicos Ecuación 4.

Tiempo de estabilización. Ecuación 5.

Tiempo Muerto. Ecuación 6.

Ganancia del sistema. para el modelo de identificación de la planta método de los dos puntos.

Ecuación 4.

Tiempo de estabilización.

$$\tau (\text{Tiempo de estabilización}) \quad \tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.2\%})$$

Ecuación 5.

Tiempo Muerto.

$$\theta (\text{Tiempo Muerto}) \quad \theta = t_{63.2\%} - \tau$$

Ecuación 6.

Ganancia del sistema.

$$K (\text{Ganancia}) \quad K = (\Delta_{Salida})/(\Delta_{Entrada})$$

Con los tres parámetros principales del modelo de identificación de la planta, se plantea la función de transferencia de la planta; Ecuación 7.

Función de transferencia de la planta de primer orden con retardo.

Ecuación 7.

Función de transferencia de la planta de primer orden con retardo.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \left(\frac{K}{\tau s + 1} \right) e^{-\theta s}$$

3.7.3 Modelo matemático para la ley de control del proceso identificado

Basados en las características no lineales del proceso estudiado dentro del intercambiador de calor, este se linealiza en un pequeño tramo, alrededor de la zona de operación; se propone utilizar un controlador tipo PID, para desarrollarlo como ley de control, se utilizará el método Ziegler – Nichols, luego se ajusta utilizando una tabla ensayo error.

El método Ziegler – Nichols, se basa en el uso de tres parámetros fundamentales K_p , K_i y K_d , los cuales depende de tres parámetros iniciales K_c , τ_i y τ_d .

Del modelo de la planta; se toman como base los parámetros; tiempo de estabilización, tiempo muerto y ganancia:

τ (Tiempo de estabilización) θ (Tiempo Muerto) K (Ganancia)

Con estos parámetros, se calculan los parámetros K_c , τ_i y τ_d Ecuación 8.

Parámetro K_c Ecuación 9.

Parámetro τ_i . Ecuación 10.

Parámetro τ_d .

Ecuación 8.
 Parámetro K_c

$$K_c \quad K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{-1}$$

Ecuación 9.
 Parámetro τ_i .

$$\tau_i \quad \tau_i = 2.0 \tau \left(\frac{\theta}{\tau} \right)$$

Ecuación 10.
 Parámetro τ_d .

$$\tau_d \quad \tau_d = 2.0 \tau \left(\frac{\theta}{\tau} \right)$$

Los parámetros K_p , K_i y K_d , se calculan con las siguientes ecuaciones Ecuación 11.

Parámetro K_p . Ecuación 12.

Parámetro K_i . Ecuación 13.

Parámetro K_d ..

Ecuación 11.

Parámetro K_p .

$$K_p \quad K_p = K_c$$

Ecuación 12.

Parámetro K_i .

$$K_i \quad K_i = K_c / \tau_i$$

Ecuación 13.

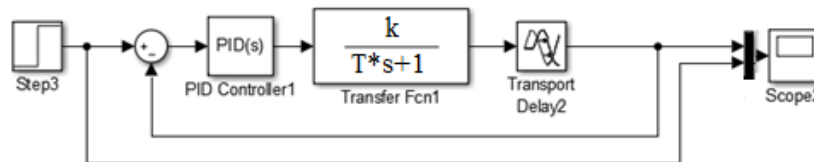
Parámetro K_d .

$$K_d \quad K_d = K_c * \tau_d$$

Los resultados de los parámetros del controlador, junto a los parámetros de la característica de funcionamiento de la planta permiten construir la Figura 26, una simulación del comportamiento de la planta, bajo condiciones de control PID.

Figura 26.

Gráfica de la planta y el controlador en lazo cerrado en SIMULINK



3.7.4 Métodos heurísticos de ajuste y mejora del sintonizador PID.

Los métodos heurísticos para sintonización y afinado del controlador (Villajulca J. , 2019), permiten conseguir un PID robusto con características más ajustadas o ideales para alcanzar una estabilidad en el proceso con el mejor comportamiento dinámico; este método tiene el propósito de efectuar cambios controlados en los valores del PID, y observando las características en la gráfica de respuesta del modelo controlado, si estas características son

más adecuadas que las del controlador anterior, el cambio se mantiene y se evalúa un nuevo cambio.

3.7.5 Modelo matemático para la detección de la planta basado en ecuaciones de paridad con función de transferencia.

Las ecuaciones de paridad son utilizadas como métodos de detección de fallos utilizando múltiples modelos (Iserman, 2006) “Una forma sencilla de detectar fallas en el proceso es comparar el comportamiento del proceso con un modelo de proceso que describe el comportamiento nominal, es decir, no defectuoso.” El resultado de esta comparación es un residuo, si este tiene un valor de cero, los datos comparados son considerados iguales, la planta no tiene fallo, pero si el residuo es cero, se presenta la detección de un cambio en el funcionamiento de la planta. El autor agrega que “El diseño de residuales se puede realizar con funciones de transferencia o en la formulación con espacios de estado.”

Para el desarrollo del presente proyecto se elaboraron varios modelos de la planta, con el fin de identificar los parámetros característicos de la planta con los diferentes modelos inducidos en la planta; modelo de funcionamiento normal, modelo de funcionamiento con el fallo en la obstrucción o atascamiento y modelo de funcionamiento con el fallo en el funcionamiento anormal del instrumento; Se asume el conocimiento del modelo cuyos parámetros son fijos, es decir; conforman MAPAS INVARIANTES.

En la sección 3.7.1 se plantea que la data fue tomada en lazo abierto, teniendo como proceso un modelo representado similar al de la Figura 27:

*Figura 27.
Modelo de identificación de la planta sin fallas.*



El Proceso se modela como la reacción a la curva, registrando la señal de entrada y la salida. Luego se procede a identificar los parámetros característicos (Ecuación 14).

Tiempo de estabilización (τ), Ecuación 15.

Tiempo Muerto (θ), Ecuación 16.

Ganancia del sistema. (K);

Ecuación 14.

Tiempo de estabilización (τ)

$$\tau \text{ (Tiempo de estabilización)} = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.2\%})$$

Ecuación 15.

Tiempo Muerto (θ)

$$\theta = t_{63.2\%} - \tau$$

Ecuación 16.

Ganancia del sistema. (K)

$$K = \frac{\Delta \text{Salida}}{\Delta \text{Entrada}} = \frac{T^{\circ}_{Final} - T^{\circ}_{Inicial}}{\%_{Final} - \%_{Inicial}}$$

Entonces:

Ecuación 17.

Data Proveniente del proceso real (1)

$$G_p(s) = \frac{Y_p(s)}{U(s)}$$

Al registrar los datos del proceso real (1) Ecuación 17 o planta en estado normal de funcionamiento, se condicionan las características físicas de los otros dos modelos a comparar; modelo de funcionamiento con el fallo en la obstrucción o atascamiento y modelo de funcionamiento con el fallo en el funcionamiento anormal del instrumento, esto incluye el tiempo muerto y su representación Ecuación 18.

Pero:

Ecuación 18.
Modelo del proceso (2)

$$G_m(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{K e^{-T_o s}}{\tau s + 1}$$

Del proceso de experimentación, y forzando el estado físico de la falla, se asume el conocimiento del modelo cuyos parámetros son fijos, es decir; conforman MAPAS INVARIANTES, de tal manera que se establece una relación entre el modelo en estado normal de la planta y el modelo en estado de falla Ecuación 19; Tal que:

Ecuación 19.
Relación de modelos funcionamiento normal y modelo del fallo

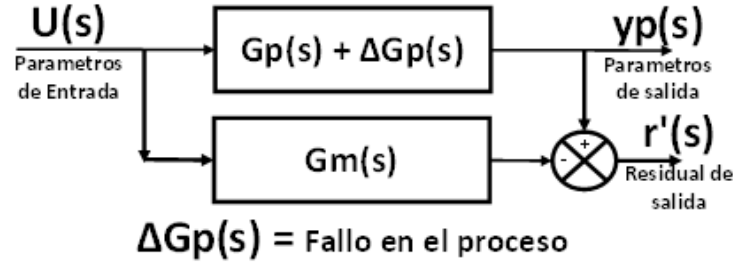
$$G_p(s) = G_m(s) + \Delta G_m(s)$$

Donde:

$\Delta G_m(s)$ Residual que describe los errores del modelo,

Es importante notar en los algoritmos de detección y diagnóstico. Se analiza el esquema del siguiente diagrama de bloques.

Figura 28.
 Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos.



De tal manera que el valor del residual de detección de fallos se plantea la Ecuación 20.

Representativa del diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos.

Ecuación 20.
 Representativa del diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos.

$$r'(s) = Y_p(s) - Y_m(s) = Y_p(s) - G_m(s)U(s)$$

Reacomodando la Ecuación 17.

$$r'(s) = [G_p(s) + \Delta G_p(s)]U(s) - G_m(s)U(s)$$

De (3) $G_p(s) = G_m(s) + \Delta G_m(s)$

$$r'(s) = [\cancel{G_m(s)} + \Delta G_m(s) + \Delta G_p(s) - \cancel{G_m(s)}]U(s)$$

$$r'(s) = [\Delta G_m(s) + \Delta G_p(s)]U(s)$$

Siendo $\Delta G_m(s)$ Determinado por:

$$\Delta G_m(s) = G_p(s) - G_m(s)$$

Entonces; se establece la Ecuación 21:

Ecuación 21.

Ecuación de error polinomial

$$r'(s) = \underbrace{[G_p(s) - G_m(s)]}_{\text{Error de Modelado}} + \underbrace{\Delta G_p(s)}_{\text{Fallo}} U(s)$$

Se interpreta de Ecuación 21 que si no hay fallo $\Delta G_m(s) = 0$ entonces $r'(s) =$

$\Delta G_m(s)U(s)$, Conocido en sus límites, Entonces Ecuación 22

Ecuación 22.

Ecuación del diagrama residual sin error.

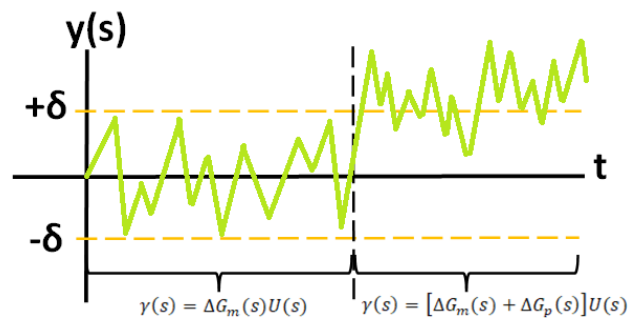
$$r'(s) = \Delta G_m(s)U(s)$$

Con base en las ecuaciones; Ecuación 21 y Ecuación 22, es posible fijar el estado de la planta sin fallo o con fallo; tal como se observa en la Figura 29.

Esquema gráfico del cambio de residual de estado sin fallo a estado con fallo.

Figura 29.

Esquema gráfico del cambio de residual de estado sin fallo a estado con fallo.



Donde:

$|y(s)| > \delta$; Detección de la Presencia de un fallo en el proceso.

3.7.6 Incorporación del diagnóstico de fallos en intercambiador de calor basado en la diferencia entre residuales geométricos

Para el diagnóstico y su definición, se interpreta como ubicación del fallo y su magnitud, basado en el esquema que se muestra a continuación (ver Figura 30);

Ecuación 23.

Ecuación Residual del fallo 1

$$r'_1(s) = [G_p(s) + \underbrace{\Delta G_{p1}(s)}_{\text{Fallo 1}} - G_m(s) - \underbrace{\Delta G_m(s)}_{\text{Error del modelo}} - \Delta G_{F1}(s)]U(s) \quad (7)$$

Ecuación 24.

Ecuación residual del fallo 2.

$$r'_2(s) = [G_p(s) + \underbrace{\Delta G_{p2}(s)}_{\text{Fallo 2}} - G_m(s) - \underbrace{\Delta G_m(s)}_{\text{Error del modelo}} - \Delta G_{F2}(s)]U(s) \quad (8)$$

Ecuación 25.

Ecuación residual del fallo n.

$$r'_n(s) = [\underbrace{G_p(s) + \Delta G_{pn}(s)}_{\text{Fallo n}} - G_m(s) - \underbrace{\Delta G_m(s)}_{\text{Error del modelo}} - \Delta G_{Fn}(s)]U(s)$$

Figura 30.

Esquema del diagrama de bloques del modelo residual de múltiples fallos

3.7.7 Modelo matemático de la segunda diferencia entre residuales para la detección y diagnóstico de fallos de la planta

Profundización: este diagnóstico también puede realizarse por una matriz causa-efecto apoyada con lógica difusa en $Y_n(s)$.

Profundización: este diagnóstico también puede realizarse por reconocimiento de patrones en la forma de $Y_n(s)$.

Nota explicativa:

Al partir del supuesto de que los fallos en el proceso son aditivos, o sea los mapas invariantes propuestos con fallos A_f , B_f , C_f pueden describirse:

Ecuación 27.

Formulación del mapa invariante de los fallos

$$A_F = A \pm \Delta A$$

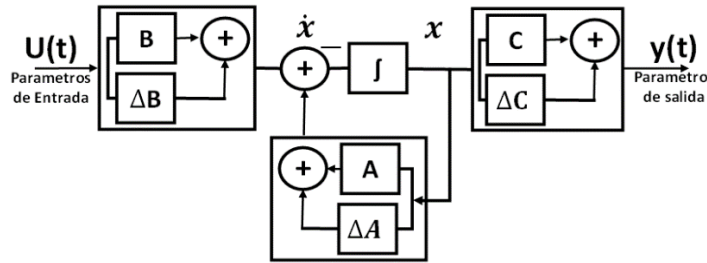
$$B_F = B \pm \Delta B;$$

$$C_F = C \pm \Delta C$$

Donde: ΔA , ΔB y ΔC , es la desviación o fallo; Esquemáticamente se puede representar;

Figura 31.

Esquema con mapas de fallos aditivos



Esquema con mapas de fallos aditivos.

Quedando en el espacio de estados

Ecuación 28.

Representación simplificada de espacios de estados.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)U \\ y &= (C + \Delta C)x\end{aligned}$$

Ecuación 29.

Representación Expandida de los fallos en espacios de estado.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + BU + \Delta Ax + \Delta BU \\ y &= Cx + \Delta Cx\end{aligned}$$

Al suponer solo un fallo en planta

Ecuación 30.

Representación de un fallo en espacios de estado.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + BU + \Delta Ax \\ y &= Cx\end{aligned} \quad (10) \text{ (donde } \Delta A \text{ representa la desviación o fallo en planta)}$$

Es necesario disponer de un observador de estados

Ecuación 31.

Representación del fallo en espacios de estado agregando un observador de estado.

$$\begin{aligned}\dot{x}_m &= Ax_m + BU + D(y - y_m) \\ y_m &= Cx_m\end{aligned} \quad (11)$$

Al plantear la diferencia

Ecuación 32.

Expresión de la diferencia entre espacios de estados.

$$\begin{aligned}\dot{x} - \dot{x}_m &= A(x - x_m) - D(y - y_m) + \Delta Ax \\ y - y_m &= C(x - x_m)\end{aligned}$$

Introduciendo la función estocástica de aparición del fallo.

Ecuación 33.

Expresión de la diferencia en espacios de estado incluido la función estocástica

$$\begin{aligned}\dot{x} - \dot{x}_m &= A(x - x_m) - D(y - y_m) + [\Delta Ax]V(t) \\ y - y_m &= C(x - x_m)\end{aligned}$$

donde: $V(t)$ es la función estocástica de aparición del fallo.

Si el mapa D fue calculado de forma que;

Siendo:

Ecuación 34.

Error de estimación

- Error de estimación: $e = x - x_m$

Ecuación 35.

dinámica del error.

-Su dinámica: $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_m$

Entonces:

$$\begin{cases} \dot{e} = (A - DC)e \\ y = Ce \end{cases}$$

Siendo los valores del mapa $(A-DC)$ Pertenecientes AL semiplano Izquierdo del plano S .

Se plantean: Los Autovalores de

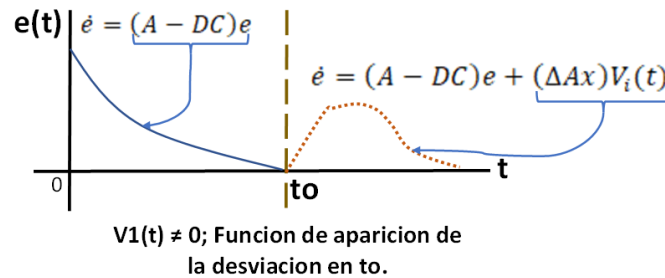
$$[SI - [A - DC]] = \text{Polinomio de ROUHT HOVRWZT}$$

Luego;

Ecuación 36.
 Función del error.

$$\dot{e} = (A - DC)e + (\Delta Ax)V_i(t)$$

Figura 32.
 Diagrama de error.



La desviación representada por:

$-(\Delta Ax)V_i(t) = \text{Fallo}$; Representa la desviación $\forall (\Delta Ax)V_i(t) \neq 0$.

- El análisis del patrón temporal de $(\Delta Ax)V_i(t)$ via análisis estadístico basado en la distribución de frecuencias, media, desviación, también en análisis de patrones temporales vía, redes neuronales artificiales pueden ser técnicas para el diagnóstico del fallo.

- De igual forma las desviaciones provenientes de los elementos finales de control:

$$[\Delta BU(t)]w_i(t) = \text{Fallo}; \quad \forall w_i(t) \neq 0$$

-De igual forma las desviaciones provenientes del sensor-transmisor.

$$[\Delta Cx]\xi_i(t) = \text{Fallo}; \quad \forall \xi_i(t) \neq 0$$

3.7.8 Matemática implícita al fallo dos: lectura anormal del instrumento

Los sensores de temperatura tipo RTD PT 100, Este tipo de instrumento, reaccionan al cambio de temperatura, variando la resistencia del material del elemento de detección; también llamado “coeficiente de temperatura de resistencia” (Ecuación 37) según (Creus Sole, 2010).

3.7.8.1 Fórmula para la lectura normal de la RTD PT100

Ecuación 37.

Coeficiente de temperatura de resistencia (según Creus Sole, 2010).

$$R_t = R_o(1 + \alpha t)$$

Donde:

R_o = Resistencia en ohmios a 0°C.

R_t = Resistencia en ohmios a t °C

α = coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0 °C y 100 °C es de 0,003850 $\Omega/(\Omega/^\circ\text{C})$ en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68)

3.7.8.2 Formulas en condición de lectura anormal del instrumento.

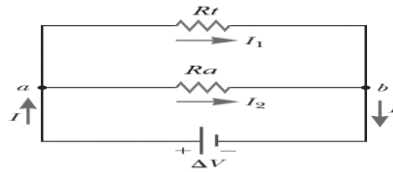
Con el propósito de alterar el funcionamiento de la termorresistencia, se instala físicamente una resistencia en paralelo Figura 33.

Esquema eléctrico de resistencia en paralelo, a la resistencia que señala el “coeficiente de temperatura de resistencia” de la Ecuación 37.

Coeficiente de temperatura de resistencia (según Creus Sole, 2010). **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 33.

Esquema eléctrico de resistencia en paralelo



Donde:

R_t = Resistencia en ohmios a t °C

R_a = Resistencia anormal de funcionamiento.

Basado en la modificación propuesta con anterioridad; el circuito equivalente Figura 33.

Esquema eléctrico de resistencia en paralelo, se instala la resistencia R_a , esta resistencia se debe ubicar de tal manera que solo altere la lectura de salida equivalente del sensor (Ecuación 38).

Ecuación 38.

Resistencia equivalente en paralelo

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_t} + \frac{1}{R_a}$$

3.7.9 Parámetros estadísticos de medidas de tendencias central y medidas de distribución de frecuencia.

Según; (Iserman, 2006), el monitoreo de variables, $Y_i(t)$ son comúnmente variables estocásticas con una cierta función de densidad de densidad de probabilidad $f_{dp}(Y_i)$, el valor medio o promedio (μ), la desviación estándar (σ), la varianza (σ^2) y la función de densidad de probabilidad.

3.8 Medidas estadísticas para el sistema de detección y diagnóstico de fallos de la planta

3.8.1 Media aritmética y valor promedio

La media aritmética o valor promedio es una medida de tendencia central, que implica comprender el valor promedio; según (Martinez Bencardino, 2012) es, “la suma de todos los valores observados, divididos por el número total de observaciones” según Iserman, para un proceso normal, el valor de la media de un proceso sin fallas, se puede calcular con la siguiente ecuación:

Ecuación 39.
Media Muestral

$$\mu_i = E\{Y_i(t)\};$$

3.8.2 Varianza

La varianza es una medida de dispersión de deformación y apuntamiento; según (Martinez Bencardino, 2012) es; “La media aritmética de los cuadrados de las diferencias (desviaciones entre los valores que toma la variable y su media aritmética” según Iserman, para un proceso normal, el valor de la media de un proceso sin fallas, se puede calcular con la siguiente ecuación:

Ecuación 40.
Varianza.

$$\bar{\sigma}_i^2 = E\{[Y_i(t) - \mu_i]^2\};$$

3.8.3 Desviación estándar

La desviación estándar; o también conocida como desviación típica, según (Saldivar, 2008) “Es la media de las desviaciones a partir de un valor central.”

Ecuación 41.
Desviación Estándar

$$\sigma_i = \sqrt{\bar{\sigma}_i^2}$$

3.8.4 Coeficiente de Asimetría

El coeficiente de asimetría, según (Rodríguez Ojeda, 2007) es una medida de distribución, que se utiliza como momentos alrededor de la media; permite comparar distribuciones; la asimetría mide el sesgo de un grupo de elementos descrito en la distribución de frecuencias, para calcular la asimetría es necesario utilizar la siguiente formula:

Ecuación 42.
Coeficiente de Asimetría.

$$C.A. = \frac{\mu_3}{(\mu_2)^{3/2}}$$

El Coeficiente de asimetría, se debe evaluar bajo el siguiente criterio:

Positivo	$C.A. > 0$; la distribución tiene sesgo positivo (se extiende a la derecha)
Cero	$C.A. = 0$; la distribución es simétrica.
Negativo	$C.A. < 0$; la distribución tiene sesgo negativo (se extiende a la izquierda)

3.8.5 Curtosis o Apuntamiento

La curtosis, Según (Rodríguez Ojeda, 2007) también es otra medida comparativa de distribuciones de frecuencia; de esta manera, la curtosis indica cual es la forma de apuntamiento o alargamiento sobre los datos utilizados en la distribución de probabilidad de frecuencia. Se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 43.
Coeficiente de Curtosis.

$$C.C. = \frac{\mu_4}{(\mu_2)^2}$$

El Coeficiente de Curtosis, se debe evaluar bajo el siguiente criterio:

Positivo $C.C. > 0$; la distribución es puntiaguda o "Leptocurtica"
Cero $C.C. = 0$; la distribución es regular.
Negativo $C.C. < 0$; la distribución es plana o "platicurtica"

3.8.6 Función de densidad de probabilidad

La desviación estándar; o también

En caso de presentarse con los cambios con los parámetros, se expresan en las ecuaciones 41. Y 42;

Ecuación 44.
Cambio de la variable

$$\Delta Y_i = E\{Y_i(t) - \mu_i\};$$

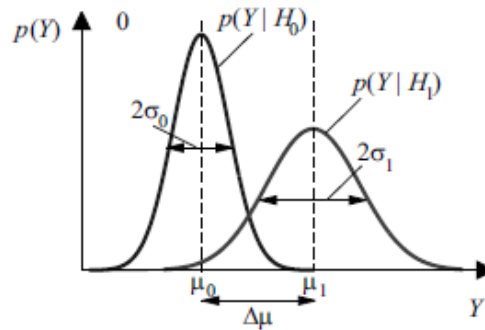
Ecuación 45.
Cambio de la Varianza

$$\Delta \sigma^2 = E\{[\sigma(t) - \bar{\sigma}_i]^2\};$$

Según Iserman; para $t > t_F$, donde t_F es el tiempo de ocurrencia de la falla, que se supone es desconocido. Si la media y la desviación estándar de un proceso se miden por: μ_o y σ_o ; después del cambio causado por la falla están descritos por: μ_1 y σ_1 ; la detección del cambio del problema se representa por la figura 34, si se asume una probabilidad de distribución normal de la variable medida, se puede identificar los siguientes casos:

- 1) Los cambios en la media $\mu_1 = \mu_o + \Delta\mu$; con la desviación estándar permanece constante $\sigma_1 = \sigma_o$.
- 2) La media no cambia $\mu_1 = \mu_o$ y la desviación estándar cambia $\sigma_1 = \sigma_o + \Delta\sigma$.
- 3) Los dos presentan cambios en su medida; $\mu_1 = \mu_o + \Delta\mu$, la media y la desviación estándar $\sigma_1 = \sigma_o + \Delta\sigma$

Figura 34.
 Función de densidad de probabilidad normal de la variable observada (tomado de Iserman 2006)



Iserman resalta que, en caso de presentarse un cambio en el valor de la media, muy pequeño $\Delta\mu = \mu_1 - \mu_0$; en comparación con la desviación estándar, $k \leq 1$, entonces es necesario aplicar pruebas estadísticas.

3.8.7 Diagrama de Cajas y Bigotes

El diagrama de cajas y bigotes es según (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012) “es útil para reflejar propiedades de una muestra...” agrega: “indica el centro de la localización, la variabilidad y el grado de asimetría.”

3.8.8 Estimación de patrones residuales basados en medidas estadísticas

El procedimiento para calcular los patrones de residuales basados en medidas estadísticas; requiere de una secuencia de análisis tal como se muestra a continuación:

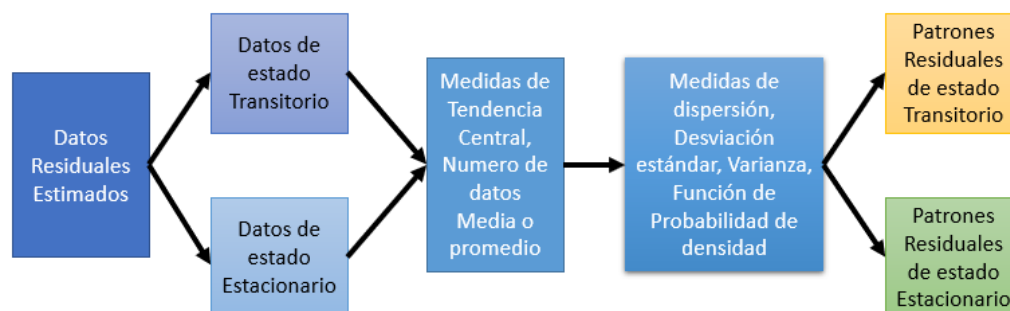


Figura 35.
 Secuencia metodológica para la generación de patrones residuales basados en análisis estadísticos.

3.8.9 Intervalos de confianza para la estimación de cambios permitidos máximos en los patrones residuales

Según; (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012), “La estimación del intervalo de confianza incluye el cálculo de límites dentro de los cuales es “razonable” que resida el parámetro en cuestión”, el nivel de confianza se relaciona con el valor Z que equivale al valor con cierto porcentaje de aceptación dentro del área bajo la línea de la campana de distribución normal; este valor, (para muestras mayores a treinta datos) se calcula con la siguiente formula:

Ecuación 46.
 Z de la distribución normal.

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu_o}{\sigma_o}$$

Con el valor Z, se definen los intervalos de confianza, según (Ojeda, 2007) empleando la siguiente desigualdad;

Ecuación 47.
 Desigualdad para los intervalos de confianza

$$-Z_{\alpha/2} \leq \frac{\bar{X} - \mu_o}{\sigma_o} \leq Z_{\alpha/2}$$

Donde:

$\bar{X}$ = Valor medio de la lectura.

μ_o = Valor medio de la muestra ponderada.

σ_o = Varianza de la muestra ponderada.

α = Valor de significancia.

Z = Coeficiente de asimilación.

Según, (Iserman, 2006) el valor de significancia α para pruebas de detección y diagnóstico de fallos oscila entre 0.05 y 0.01. este valor se utiliza para establecer el nivel de confianza N.C. en el rango de valores aceptados. Ojeda, (Ojeda, 2007), selecciona los valores de Z utilizados típicamente, estos valores se relacionan con sus respectivos valores de niveles de confianza relacionados.

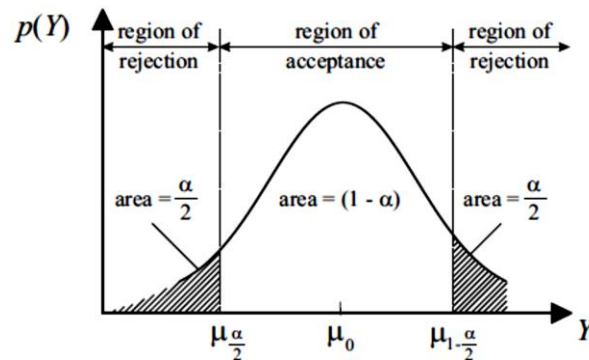
Tabla 5.
Niveles típicos de confianza más utilizados.

No	α Nivel de Significancia	Z Coeficiente de asimilación	N.C. Nivel de confianza
1	0.100	1.280	89.97%
2	0.050	1.645	95.05%
3	0.025	1.960	97.50%
4	0.010	2.330	99.01%
5	0.005	2.575	99.50%

3.8.10 Pruebas de hipótesis para la detección de cambios en las medidas estadísticas, para la detección y el diagnóstico de fallos

Según; (Iserman, 2006), Para la detección de cambios se pueden aplicar pruebas de hipótesis conocidas de la teoría de la estadística. En la prueba de hipótesis, se prueba una hipótesis nula H_0 , contra una o más hipótesis alternativas $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$.

Figura 36.
 Región de aceptación y rechazo de la hipótesis (Iserman, 2006).



La hipótesis H_0 , se denomina hipótesis nula, organizando la estructura del límite de confianza de la hipótesis, se considera, la siguiente área de inferencia, para el pronóstico de detección;

“HIPÓTESIS NULA H_0 ; (hipótesis de funcionamiento normal) el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, pertenece al rango entre el límite inferior permitido, y el límite superior permitido, con un nivel de confianza determinado, establece como VERDADERA la hipótesis nula, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE ACEPTACIÓN y se considera una medición con un estado normal de funcionamiento de la planta, no hay detección. (hipótesis de detección); si el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, no pertenece al rango

entre el límite inferior permitido, y el límite superior permitido, establece como FALSO la hipótesis nula, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE RECHAZO y se considera una medición con un estado anormal de funcionamiento, hay detección”

Ecuación 48.

Esquema de Hipótesis nula.

$$\begin{aligned} \text{VERDADERA (ACEPTADA)} & \Leftrightarrow \left\{ \mu_{\text{PRNDe Inf. } \alpha/2} \leq \mu_x \leq \mu_{\text{PRNDe Sup. } \alpha/2} \right\} \\ H_0 \{ \mu_x / \mu_x \forall \mu_x \in \mu_{\text{PRNDe}} \} \\ \text{FALSO (RECHAZO)} & \Leftrightarrow \left\{ \mu_x \leq \mu_{\text{PRNDe Inf. } \alpha/2} \vee \mu_x \geq \mu_{\text{PRNDe Sup. } \alpha/2} \right\} \end{aligned}$$

Donde:

μ_x = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin falla contra la planta monitoreada.

μ_{PRNDe} = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real sin fallos. (patrón de detección).

$\mu_{\text{PRNDe Inf. } \alpha/2}$ = Límite inferior del valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real sin fallos.

$\mu_{\text{PRNDe Sup. } \alpha/2}$ = Límite superior del valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real sin fallos.

Con el propósito de establecer el mecanismo de diagnóstico para reconocer cual fallo está presentándose, se plantean las hipótesis alternativas, cada hipótesis alternativa tiene como objetivo identificar en que rango de valores, con un cierto límite de confianza, es altamente probable que se encuentre un valor del promedio del residual entre la planta modelada sin falla contra la planta monitoreada, para lo cual, cada diagnóstico requiere su propia hipótesis alternativa, se plantearan tantas hipótesis alternativas como el número de diagnósticos esperados; cada hipótesis alternativa se planteara de la siguiente manera:

Ecuación 49.

Esquema de Hipótesis Alternativa X.

$$\begin{aligned}
 \text{VERDADERA (ACEPTADA)} & \Leftrightarrow \left\{ \mu_{\text{PRFDx Inf.}\alpha/2} \leq \mu_x \leq \mu_{\text{PRFDx Sup.}\alpha/2} \right\} \\
 H_x \{ \mu_x / \mu_x \forall \mu_x \in \mu_{\text{PRFDx}} \} \\
 \text{FALSO (RECHAZO)} & \Leftrightarrow \left\{ \mu_x \leq \mu_{\text{PRFDx Inf.}\alpha/2} \vee \mu_x \geq \mu_{\text{PRFDx Sup.}\alpha/2} \right\}
 \end{aligned}$$

Donde:

μ_x = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin falla contra la planta monitoreada.

μ_{PRFDx} = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real con el fallo X. (patrón de diagnóstico).

$\mu_{\text{PRFDx Inf.}\alpha/2}$ = Límite Inferior del valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real con el fallo X.

$\mu_{\text{PRFDx Sup.}\alpha/2}$ = Límite superior del valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real con el fallo X.

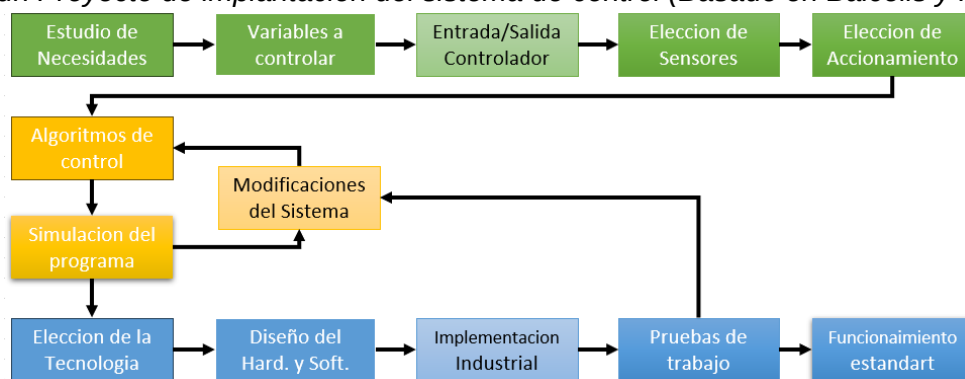
“HIPÓTESIS ALTERNATIVA X H_x ; (hipótesis de funcionamiento en condición anormal o condición de fallo) el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, pertenece al rango entre el límite inferior permitido, y el límite superior permitido, con un nivel de confianza determinado, establece como VERDADERA la hipótesis alternativa X, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE ACEPTACIÓN y se considera una medición con un estado anormal de funcionamiento de la planta; y con una condición que tipifica la falla, hay diagnóstico de la falla. (hipótesis de diagnóstico); si el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, no pertenece al rango entre el límite inferior permitido, y el límite superior permitido, establece como FALSO la hipótesis alternativa X, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE RECHAZO y se considera una medición con un estado de funcionamiento no determinado, no hay diagnóstico de la falla.”

3.9 Esquema general de implantación industrial

El proceso de implantación industrial implica la distribución y ordenación de espacios, para los diferentes fines previstos: desde el proceso productivo, hasta las instalaciones, servicios auxiliares y operaciones del exterior de la planta; según: (Balcells & Romeral, 2005)“...estos nuevos elementos y funciones en el campo del control industrial, obliga a replantearse la configuración y los propios métodos de diseño de autómatas.”

Figura 37.

Fases de un Proyecto de implantación del sistema de control (Basado en Balcells y Romeral)



4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta la ejecución del trabajo de campo, los datos recolectados en la etapa proemio y el desarrollo de las etapas operacional, DDF+ e Implementación de la investigación, dirigida a establecer el diagnóstico de fallos de los equipos críticos estacionarios para el incremento en la ingeniería de confiabilidad operacional industrial, en el laboratorio de mecatrónica en la Universidad de Pamplona.

4.1 Estado del arte de los sistemas de detección y diagnóstico de fallos en intercambiadores de calor

El Intercambiador de calor es un dispositivo usado para transferir energía térmica (entalpia) entre dos o más fluidos, o una superficie sólida y un fluido, o entre partículas sólidas y un fluido a diferentes temperaturas (Ramesh K. Shah, 2003), dada su función principal desempeña un papel vital en las plantas de energía eléctrica, las industrias de fertilizantes (Navaseelan Paul David, 2015), petroquímica (Xufeng Zhu, 2014), reactores atómicos, plantas de energía nuclear, petróleo (Mulan Pang, 2014), química (Tanjin Amin, 2018), (Juan C. Tudón Martinez, 2015), (Qingyang Lei, 2015), (Ze-tao LI, 2016), en los sistemas de control ambiental de aeronaves (Zhu Lei, 2016), en los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (Majid Karami, 2018), (Peng Wang, 2017), (Qianjun Mao, 2018) y en las bombas de calor con intercambiador geotérmico (José LuisCasteleiro-Roca, 2015). Debido al aumento permanente del tamaño y la complejidad (Juan C. Tudón Martinez, 2015), las plantas industriales son susceptibles a fallas (Qingyang Lei, 2015), (Figura 38.

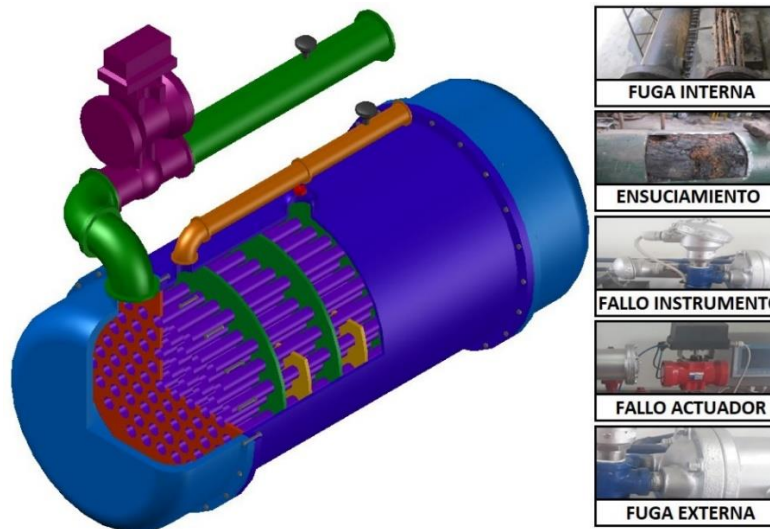
Fallos comunes en intercambiadores de calor.), es típico que los sistemas dinámicos se degraden de forma no lineal (Peng Wang, 2017), lo cual afecta la vida útil (Medina Adam,

2013), una situación anormal se inicia con una falla durante la operación (Venkatasubramanian, Rengaswamy, Yin, & Kavuri, 2002), y esta puede reducir la calidad de la producción y tender a cerrar la operación de toda la planta (Navaseelan Paul David, 2015), cada día son mayores los requisitos de calidad del producto (Tanjin Amin, 2018), la seguridad es una prioridad en el diseño y desarrollo de procesos (Ze-tao LI, 2016). El intercambiador de calor es un elemento con alta probabilidad de falla (José LuisCasteleiro-Roca, 2015), si continua funcionando de esta manera, los beneficios económicos y ambientales pueden reducirse si la falla no se diagnostica de manera temprana (Juan C. Tudón Martinez, 2015), la detección temprana y el diagnóstico de fallas es fundamental para la programación de mantenimiento (Peng Wang, 2017), son de vital importancia para ahorrar energía y mejorar el rendimiento de los componentes del sistema (Majid Karami, 2018), (Yang Zhao, 2013).

Los fallos por definición, son derivaciones no permitidas de por lómenos una propiedad o característica del sistema, de la condición estándar usual (Iserman, 2006), en la bibliografía encontrada, según los componentes, se documentaron los siguientes fallos (ver Figura 38) en los intercambiadores de calor; la degradación de los tubos del intercambiador de calor presentando los siguientes modos de fallo, fugas en la tubería (Navaseelan Paul David, 2015), (Xufeng Zhu, 2014), (Mulan Pang, 2014), (Peng Wang, 2017), (José LuisCasteleiro-Roca, 2015), (Ahn, Kim, & Choi, 2018), ensuciamiento (François Delmotte, 2013), escamas (Xufeng Zhu, 2014), obstrucciones (Xufeng Zhu, 2014), (Mulan Pang, 2014), (José LuisCasteleiro-Roca, 2015), y falla abrupta (Peng Wang, 2017); fallo de los instrumentos de medición (sensores) (Navaseelan Paul David, 2015), (Medina Adam, 2013) , Fallo de polarización del sensor de temperatura (Qianjun Mao, 2018), otro componente que presento fallo son los actuadores, algunos modos de fallos registrados son: fallos de subcomponentes (actuadores) (Mei ZHANG,

2015), fallo de sobrepresión (Juan C. Tudón Martínez, 2015), abrupta e incipientemente de la ganancia del actuador (Ze-tao LI, 2016), mal funcionamiento de las válvulas (Navaseelan Paul David, 2015), la válvula de condensación cerrada (Qingyang Lei, 2015), daño en la válvula de vapor (Tanjin Amin, 2018), otros de los fallos documentados fueron: fallo de paquete de refrigeración Sistema de control Ambiental de aeronaves (Zhu Lei, 2016), mal funcionamiento de los equipos (Majid Karami, 2018), contaminación por gas inerte en el vapor (Qingyang Lei, 2015), fuga del tanque (Tanjin Amin, 2018), finalmente un estudio de fallos en diferentes valores de temperatura (Yang Zhao, 2013).

Figura 38.
Fallos comunes en intercambiadores de calor.



4.1.1 Métodos de detección consultados

Mulan y compañía (Mulan Pang, 2014), realizaron un sistema de detección de fallos en función del chequeo de umbrales, el cual consistía en efectuar una prueba no destructiva, para el caso el monitoreo de la vibración: del tubo del intercambiador de calor debido a la vibración del flujo generada por obstrucciones y fugas, los autores utilizaron el software experimental:

EMT490 para registro de la data y aplicaron los experimentos en la refinería petroquímica Maoming2, a pesar del estudio, los resultados presentados no fueron muy alentadores “. Los resultados deducidos de estos experimentos no son obvios para diagnosticar la falla del tubo. Es difícil analizar la falla del tubo del intercambiador de calor mediante el método de diagnóstico de vibración con las tecnologías actuales”, un estudio parecido desarrollo Xufeng (Xufeng Zhu, 2014), llegando a la siguiente conclusión “...se ve afectado en gran medida por el ruido circundante, que se debe principalmente al hecho de que la tubería del intercambiador de calor está conectada a una bomba centrífuga y el sonido...”. Por otra parte autores como Majid (Majid Karami, 2018), aplicaron un chequeo de umbrales adaptativo; El filtro de Kalman sin cesgo se integra con la técnica de regresión del modelo de mezcla de Gaussian (que modela un sistema no lineal) para ajustar los parámetros del modelo en función de la retroalimentación de los residuos entre la observación y la predicción del modelo, el sistema se aplicó a una planta enfriadora de agua con velocidad variable, ubicada en Berkeley, California; el sistema automáticamente detecta y diagnostica fallas en sistemas no lineales, tales como; presencia de la contaminación del condensador, el ensuciamiento del evaporador y la degradación del motor del compresor son factores importantes que reducen la COP de la enfriadora. Navaseelan y Bhuvaneswari (Navaseelan Paul David, 2015), utilizan el filtro de Kalman para estimar todas las variables de proceso en tanto a la entrada, la salida y el interior, generan el residual como la diferencia entre los valores medidos y estimados de estas variables. si el residual generado sobrepasa el valor umbral indica falla en la caldera; el estudio se aplica a una caldera de tubo de agua de 130 toneladas por hora en la industria petroquímica. De modo similar, Adam y compañía (Medina Adam, 2013), proponen un sistema de detección de fallos en sensores temperatura de salida, basado en múltiples señales y modelos al plantear observadores por

modos deslizantes de segundo orden, el diseño es aplicado en una planta piloto RCT10 intercambiador de calor de tubos concéntricos con flujos a contracorriente.

Byunghyun y acompañantes (Ahn, Kim, & Choi, 2018), diseñan un sistema, que detecta fugas en la tubería de forma temprana de un laboratorio de prueba, el sistema es "...basado en algoritmo genético para la selección de características y el análisis de componentes principales para el pre procesamiento y mejorar la precisión de clasificación de fallas se estiman mediante aprendizaje automático basado en inteligencia artificial utilizando la máquina de soporte vectorial." por otro lado; Qianjun (Qianjun Mao, 2018), sobre un enfriador HVAC, diseña y aplica un método para la detección de fallo del sensor de temperatura, este diseño se desarrolla de la siguiente manera; En primer lugar, modo empírico de descomposición se utilizó para mejorar la calidad de los datos en bruto mediante la eliminación del ruido. se empleó una manera umbral de eliminación, pero mantiene la información útil.

En segundo lugar, aplican el método de componentes principales para construir el modelo; este método muestra una mayor eficiencia de detección de fallas que los métodos tradicionales. así mismo, Ze-tao y compañía (Ze-tao LI, 2016), aplicaron un método que utiliza el chequeo de umbrales y el diseño de un banco de observadores, en un intercambiador de calor / reactor intensificado continuo, detectando el fallo abrupto e incipientemente de la ganancia del actuador, los autores discuten "en detalle una situación general en la que el sistema está sujeto a la incertidumbre del modelo o a la perturbación externa, y se propone una modificación del algoritmo de diagnóstico adaptativo para mejorar su robustez", los anteriores métodos de detección están consolidados en la Tabla 6.

Métodos de detección de fallos aplicados.

Tabla 6.
Métodos de detección de fallos aplicados.

MÉTODOS DE DETECCIÓN CONSULTADOS			
AUTOR	DISPOSITIVO	METODOLOGÍA	FALLO
Mulan y compañía (Mulan Pang, 2014)	refinería petroquímica Maoming2	función del chequeo de umbrales	vibración del flujo generada por obstrucciones y fugas
Xufeng (Xufeng Zhu, 2014)	intercambiador de calor de agua circulante	función del chequeo de umbrales	ruido y vibración
Majid (Majid Karami, 2018),	planta enfriadora de agua con velocidad variable	chequeo de umbrales adaptativo El filtro de Kalman sin cesgo y modelo de mezcla de Gaussian	contaminación del condensador, el ensuciamiento del evaporador y la degradación del motor
Navaseelan y Bhuvaneswari (Navaseelan Paul David, 2015)	calderas de tubo de agua de 130 tonelada	Residual filtro de Kalman (los valores medidos y estimados de estas variables)	mal funcionamiento de las válvulas, fugas en tuberías y fallas en los sensores
Adam y compañía	planta piloto intercambiador de calor de tubos concéntricos a contracorriente flujo	basado en múltiples señales y modelos al plantear observadores por modos deslizantes de segundo orden	fallas en los sensores
Byunghyun y acompañantes (Ahn, Kim, & Choi, 2018),	laboratorio de prueba	basado en algoritmo genético para la selección de características y el análisis de componentes principales	detecta fugas en la tubería
Qianjun (Qianjun Mao, 2018),	enfriador HVAC	modo empírico de descomposición, umbral de eliminación, método de componentes principales	fallo del sensor de temperatura
Ze-tao y compañía (Ze-tao LI, 2016)	intercambiador de calor / reactor intensificado continuo	chequeo de umbrales y el diseño de un banco de observadores	fallo abrupto e incipientemente de la ganancia del actuador

4.1.2 Métodos de diagnóstico consultados.

Con respecto a los métodos de diagnóstico clasificados por Iserman (Iserman, 2006), Yang, Fu y Shengwei (Yang Zhao, 2013), plantean una red de creencia bayesiana, aplicada en una planta enfriador centrífuga, de diagnóstico de fallos en la sensórica, tales como: diferente temperatura de saturación, recalentamiento en la temperatura de succión del refrigerante, recalentamiento de la temperatura de descarga del refrigerante, temperatura de condensado,

temperatura de subenfriamiento, diferente temperatura del agua de condensado y diferente temperatura del agua del evaporador.

Tabla 7.
Métodos de diagnóstico de fallos.

MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO CONSULTADOS			
AUTOR	DISPOSITIVO	METODOLOGÍA	FALLO
Yang, Fu y Shengwei (Yang Zhao, 2013)	planta real enfriador-centrífuga	Red de creencia bayesiana	Fallos en la sensoría
Juan y Rubén (Juan C. Tudón Martinez, 2015)	Intercambiador de calor de carcasa y tubo industrial	Redes neuronales artificiales, Naive Bayes y el clasificador k-Nearest Neighbor, el sistema Fuzzy Logic y el árbol de decisión de falla	Sobrepresión en el actuador

La red bayesiana de tres capas; fue organizada de la siguiente manera, la primera capa de información inicial; la segunda es la capa de fallos y la tercera es la capa de síntomas de fallo, "...las tablas de probabilidad condicional entre los nodos en el capa de información adicional y nodos en la capa de falla están configurados basado en el conocimiento y las experiencias de los autores..." (Yang Zhao, 2013), ellos concluyen sobre la red de creencia bayesiana que "...simula el pensamiento diagnóstico y el diagnóstico proceso de enfriador experto". por su parte; Juan y Rubén (Juan C. Tudón Martinez, 2015), comparan cinco enfoques diferentes: las redes neuronales artificiales, Naive Bayes y el clasificador k-Nearest Neighbor, el sistema Fuzzy Logic y el árbol de decisión de falla, utilizando el mismo sistema experimental: un intercambiador de calor de carcasa y tubo industrial, para diagnostica falla de sobrepresión en el actuador; los autores concluyen: que bajo las condiciones estudiadas ". El clasificador k-NN logró el mejor rendimiento en la clasificación de fallas (de error 12,4%) con un buen rendimiento en la detección de fallas..." más adelante agregan "...el Árbol de decisión de fallo tuvo varias clasificaciones (46.2% de error) con el menor rendimiento. Estos métodos de diagnóstico se organizaron en la Tabla 7.

4.1.3 Métodos híbridos consultados.

Mei y compañía (Mei ZHANG, 2015), sobre un reactor HEX intensificado desarrollado por el Laboratoire de Génie Chimique (LGC - Toulouse, Francia), proponen una estructura de sistema no lineal en cascada invertida a la izquierda con leyes de reconstrucción de entrada basadas en inversión dinámica, en la etapa de detección, utiliza un método de generación de residual, al comparar la entrada del actuado con la señal de entrada reconstruida a través de un observador de Lunberger de alta ganancia, así mismo, en la etapa de diagnóstico, aplica el análisis causa raíz para hacer el diagnóstico del fallo y determinar si hay falla del diafragma de la válvula de control debido a fugas o poros en la periferia, lo que resulta en un cambio total del flujo másico, aumento de la fricción en el vástago de la válvula debido a la desalineación del vástago, o fuga de sello de fuelle. En esa misma línea; Tanjin y demás (Tanjin Amin, 2018), en su artículo, proponen una metodología híbrida capaz de detectar y diagnosticar fuga del tanque, daño en la válvula de vapor, esta metodología se validó con un simulador de un calentador de tanque agitado continuo, utilizan un método de detección con múltiples señales y modelos basado en análisis de componentes principales y el chequeo de umbrales; la etapa de diagnóstico se basó en métodos de clasificación basados en redes bayesianas, los autores concluyen . se ha logrado una mayor precisión diagnóstica (sobre el análisis de componentes principales convencionales con enfoques basados en pruebas sólidas) mediante la aplicación de una técnica de actualización basada en la evidencia de múltiples probabilidades que reduce la posibilidad de un diagnóstico falso. Por otra parte; François Delmotte (François Delmotte, 2013), aplica en la detección, un observador borroso polinomial que en combinación con la metodología de diagnóstico redes neuronales, lograron estimar el ensuciamiento en un tubo de un intercambiador de calor de contraflujo. Mientras

tanto Zhu y Geng (Zhu Lei, 2016), centran su atención en los paquetes de refrigeración del sistema de control ambiental de aeronaves, utilizan métodos de análisis de componentes principales, las fallas se pueden detectar oportunamente al monitorear las estadísticas Q y T2, que tiene una buena sensibilidad para la alerta temprana de fallas. Los métodos híbridos están organizados en la Tabla 8

Tabla 8.
Métodos Híbridos de detección y diagnóstico de fallos

MÉTODOS HÍBRIDOS CONSULTADOS						
AUTOR	DISPOSITIVO	METODOLOGÍA. DETECCIÓN	METODOLOGÍA. DIAGNÓSTICO	FALLO		
Mei (Mei ZHANG, 2015)	Reactor intensificado	HEX	Generación de residual, observador de Lunberger	Análisis causa raíz	Falla del diafragma de la válvula de control debido a fugas o poros en la periferia	
Tanjin (Tanjin Amin, 2018),	Simulador de un calentador de tanque agitado continuo	Detección con múltiples señales y modelos basado en análisis de componentes principales y el chequeo de umbrales	Clasificación basados en redes bayesianas	Fuga del tanque		
François Delmotte (François Delmotte, 2013)	Tubo de un intercambiador de calor de contraflujo	Observador borroso de polinomial	Redes neuronales	Ensuciamiento		
Zhu y Geng (Zhu Lei, 2016)	Paquetes de refrigeración del sistema de control ambiental de aeronaves	Análisis de componentes principales	Estadísticas Q y T2	Fuga.		

4.2 Caracterización de los equipos críticos estacionarios del laboratorio de mecatrónica.

Los equipos industriales sufren de cambios en sus parámetros de funcionamiento, “Estos cambios son debido a efectos de la temperatura, desgastes ocasionados por la fricción,

el envejecimiento de los componentes, etc.” (Walter, Rocco, & Sandra, 2007,) para dar inicio a un proceso de implantación es fundamental el conocimiento del equipo, caracterizar su estructura física, la sinergia entre sus componentes y analizar el estado inicial de dichos equipos.

4.2.1 Descripción general del banco de control de temperatura.

El banco de control de temperatura (Anexo A, B, C, D, E) fue instalado en el año 2014, es un equipo de laboratorio diseñado para el desarrollo de las prácticas de Control Automático de temperatura y de Control Manual de temperatura, el banco tiene unas dimensiones aproximadas de 1500x900x600 mm (Ancho x Alto x Profundo) y un peso estimado de 2390 N.

El banco de control de temperatura, está conformado por cinco sistemas, los cuales son, el Sistema de Agua de Proceso, el Sistema de Agua de Recirculación, el Sistema de Bancada o Marco, el Sistema de Control e Instrumentación y el Sistema Eléctrico.

El funcionamiento del banco de control de temperatura, consiste en un tanque de almacenamiento RTA1 el cual contiene hasta 48 litros de agua de recirculación, al interior un calentador eléctrico le aumenta la temperatura al agua de recirculación, esta es extraída del tanque de almacenamiento RTA1 por una motobomba RMB1 de 2 HP de potencia y 130 l/min de caudal máximo, a través de la Línea de Succión RLS1 de agua, y empujada hasta el intercambiador de calor RIC1, a través de la Línea de Alta Presión de Agua, una válvula electro-neumática RFV1 regula la cantidad o el caudal de agua que llega al intercambiador de calor RIC1, una vez en el intercambiador de calor RIC1, el agua transfiere parte de su energía al agua de proceso y por la acción de empuje de la motobomba RMB1, el agua de recirculación sale de intercambiador de calor RIC1 por la Línea de Retorno RLR1 hacia al tanque RTA1. Por

la Línea de Agua de Entrada de proceso PLE1, se recibe agua corriente, la cual llega al intercambiador de calor RIC1 donde recibe la energía del agua de recirculación y sale con la misma velocidad de entrada del intercambiador RIC1 continuando su recorrido por el sistema de agua de proceso en Línea de Agua de Proceso PLP1; el banco de control de temperatura cuenta con un sistema de control, posee cuatro sensores de temperatura tipo termoresistencias RTD PT100 CTT1/4, ubicados de la siguiente manera, un sensor de temperatura, en la base del tanque de almacenamiento CTT1, otro en la línea de retorno CTT2, después de la salida del intercambiador de calor, los otros dos están sobre los accesos del intercambiador de calor RIC1 y sobre el sistema de agua de proceso; en la Línea de Agua de Entrada CTT3 y en la Línea de Agua de Proceso CTT3, adicionalmente el tanque de almacenamiento RTA1 tiene dos sensores de nivel tipo LVL 100, uno en la base CLT1 y otro en el límite superior del tanque de almacenamiento CLT2, finalmente la línea de alta presión cuenta con un sensor de presión CPT1, adicionalmente el equipo cuenta con un PLC S7 1200 marca SIEMENS y una pantalla HMI que reciben toda la información de los sensores y realizan el control de la motobomba RMB1, la válvula electro-neumática RFV1 y el calentador eléctrico. El sistema eléctrico se encarga de conectar todas las partes, la comunicación entre dispositivos y direccionar la información, todo el equipo reposa sobre el sistema de bancada o marco.

4.2.1.1 Codificación de los principales sistemas, equipos, instrumentos, componentes o accesorios del banco.

La codificación; "... es uno de los aspectos mas importantes al momento de desarrollar e implantar un sistema de mantenimiento porque permite efectuar un seguimiento al comportamiento de los equipos, manejo de la información y la ubicación..." (Clemenza & Brau , 2010, pág. 30), según el autor, existen diversas estructuras para construir la codificación, los

mas comunes son; NUMERICO, ALFANUMERICO, FUNCIONAL, NEMOTECNICO (ver Anexo A. Sistema de codificación alfanumérico). La codificación completa de todos los sistemas, equipos, instrumentos, componentes o accesorios del banco de control de temperatura se encuentra en el Anexo A. Sistema de codificación alfanumérico.

4.2.1.2 Hoja de registro del banco de control de temperatura.

La hoja de registro contiene la información principal del banco de control de temperatura, (Ver Anexo C. Hoja de registro de la máquina.) con el propósito de recopilar:

- Los datos técnicos principales del banco,
- La descripción técnica del mismo,
- Los valores de los insumos o elementos de entrada,
- Los componentes principales del banco,
- Los componentes eléctricos y electrónicos del banco,
- Desagregación de los componentes principales del banco,
- Datos del fabricante,
- y Zona de aprobación del formato.

4.2.1.3 Planos técnicos.

Los planos técnicos "... muestran toda la información necesaria para definir la forma, el tamaño, el material y el terminado de una parte." (Giesecke, y otros, 2006) el Anexo D. Planos del Banco de Control de Temperatura., contiene los siguientes planos como fuente de información:

- Plano de conjunto isométrico del banco o laboratorio.
- Plano de ensamble del intercambiador de calor.
- Plano de ensamble del tanque de almacenamiento.
- Diagrama P&ID del banco de control.
- Diagrama de comunicación y conexión del banco.

4.2.1.4 Estándar de funcionamiento del Laboratorio de control de temperatura.

El banco de control de temperatura tiene como estándar primario de funcionamiento;

“Calentar el agua de proceso, con un caudal máximo de 6 litros por minuto; desde una temperatura ambiente a una temperatura definida $T_{deseada}$ menor a los sesenta (60 °C) grados Celsius”.

4.2.1.5 Diagrama E-P-S (Entrada – Proceso – Salida)

El diagrama entrada-Proceso-Salida, es un método gráfico que relaciona esencialmente, los recursos necesarios para alimentar el banco; la descripción del proceso interno que realiza el banco y los productos obtenidos al poner en funcionamiento el banco de control de temperatura. (Ver Tabla 9.

Diagrama de Entrada-Proceso-Salida del banco de control de temperatura.)

El banco de control de temperatura tiene implementado los siguientes instrumentos para su funcionamiento, la sensórica (Tabla 10.

Características principales de los sensores.) para medir la temperatura de las cuatro líneas que llegan al intercambiador de calor utilizando Termo-resistencias RTD PT100, CTT1; CTT2; CTT3; CTT4, (Ver; 1, 2, 4, 6; Figura 39.

Ubicación de los instrumentos de medición en el banco de control de temperatura.) al igual cuenta con un sensor de presión tipo SISTRANS P200; CPT1, (Figura 39.

Ubicación de los instrumentos de medición en el banco de control de temperatura.) Ubicado en la línea de alta presión después de la motobomba y cuenta con dos sensores de nivel SISTRANS LVL100; CLT1; CLT2, (Figura 39) instalados en el tanque de almacenamiento.



Tabla 9.
Diagrama de Entrada-Proceso-Salida del banco de control de temperatura.

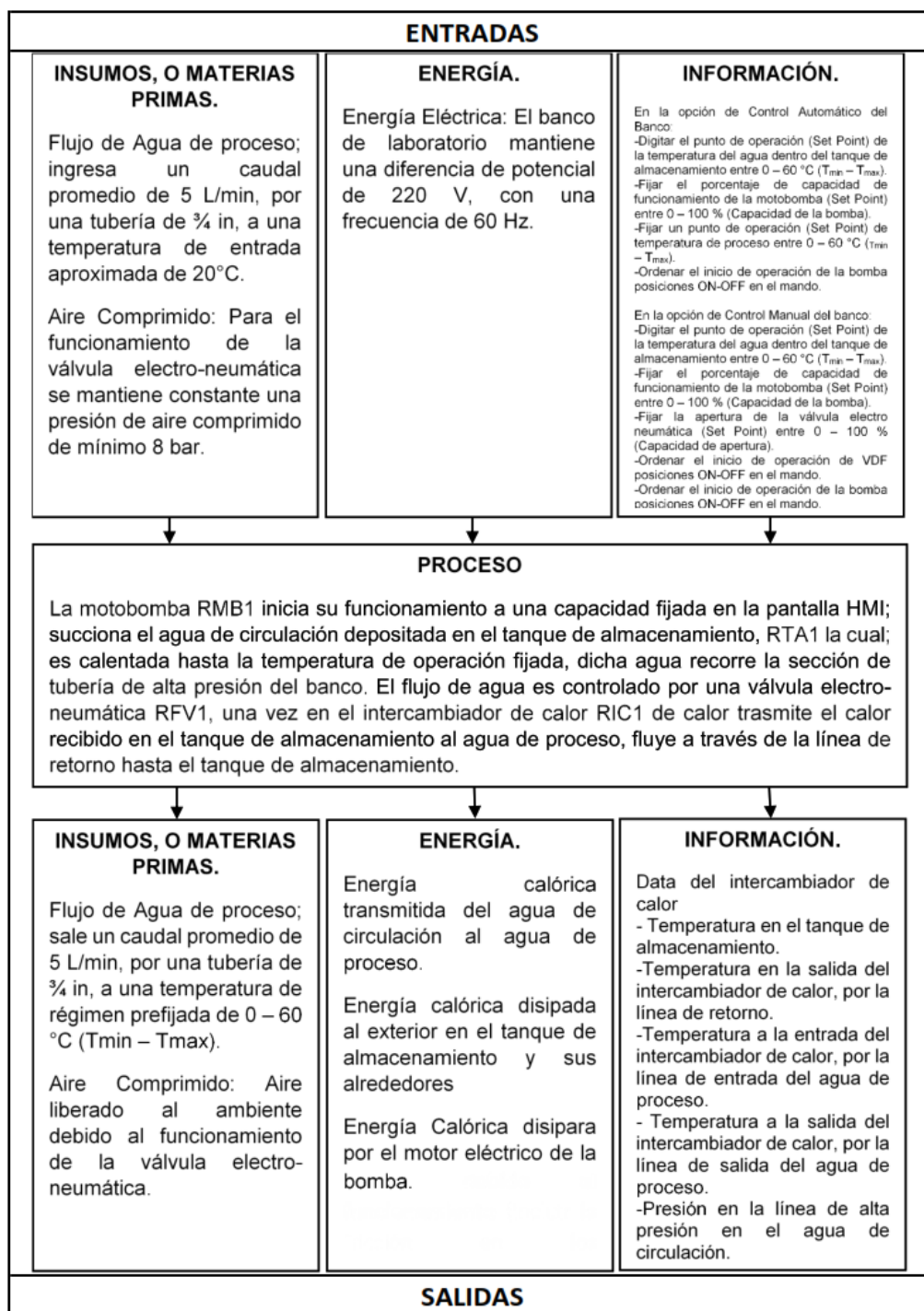
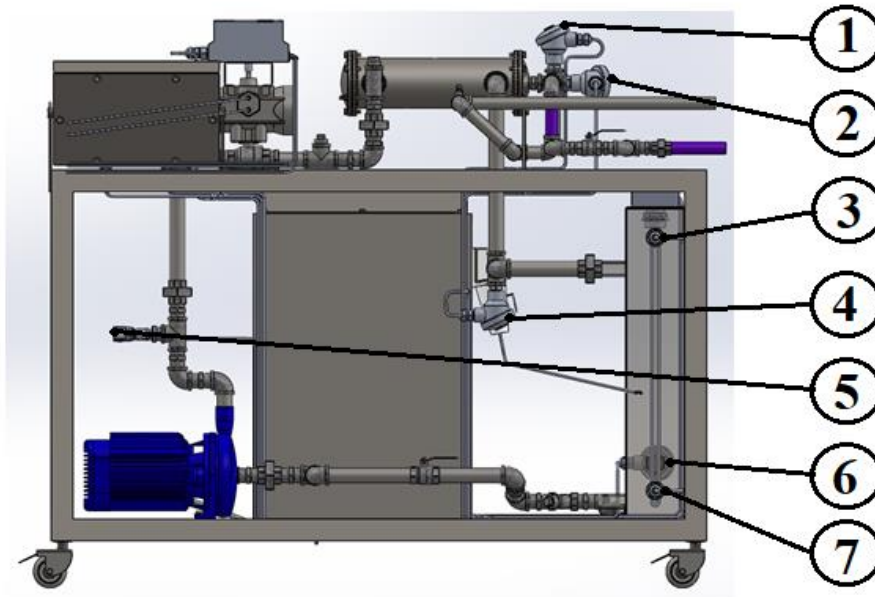


Figura 39.
Ubicación de los instrumentos de medición en el banco de control de temperatura.



4.2.1.6 Instrumentación del laboratorio de control de temperatura

SENSOR DE NIVEL (SITRANS LVL100- SIEMENS) (Anexo C) Uso o Aplicaciones:

SITRANS LVL100 es un interruptor de nivel compacto diseñado para uso industrial en todas las áreas de la tecnología de procesos y se puede usar para la detección de materiales con líquidos y lodos. Con una longitud de inserción de solo 40 mm (1.57 pulgadas), SITRANS LVL100 se puede montar en tuberías pequeñas y en aplicaciones de espacio reducido. Es virtualmente no afectado por las propiedades químicas y físicas del líquido. El LVL100 se puede utilizar en condiciones difíciles, como turbulencia, burbujas de aire, generación de espuma, acumulación o vibración externa. El diapasón está energizado piezoeléctricamente y vibra a una frecuencia de resonancia mecánica de aproximadamente 1200 Hz. La frecuencia de vibración cambia cuando el diapasón cubre la horquilla de sintonización. Este cambio es detectado por el oscilador integrado y se convierte en un comando de conmutación. La

electrónica integrada evalúa la señal de nivel y envía una señal de conmutación a los dispositivos conectados.

Tabla 10.
 Características principales de los sensores.

ÍTEM	SENSOR DE TEMPERATURA	SENSOR DE PRESIÓN	SENSOR DE NIVEL
Código	COTT-01/04	COPT-01	COLT-01/02
Modelo o Tipo	SITRANS TH100 Slim (PT100)	SITRANS P200	SITRANS LVL100
Marca	SIEMENS	SIEMENS	SIEMENS
Referencia	7NG3211 - ONN00	7MF1565-3CA00-16A1	7ML5745-1AA22-1AA0
Variable	Valor de la temperatura en diferentes líneas del banco.	Valor de la presión en la línea de alta presión.	Testigo de nivel de llenado del tanque.
Modo de Operación	Termoresistencia	Celda de medición piezo-resistiva	Interruptor de nivel de punto de vibración
Entradas	-60 ... +160 °C (-76 ... +320 °F)	Presión man.; 1... 60 bar (15... 870 psi) Presión abs.; 0.6... 16 bar a (10... 232 psia psia)	Alta, Baja y demanda
Salidas	4 ... 20 mA, dos hilos	4 ... 20 mA 0 ... 10 V DC	Salida de transistor PNP (max -250mA)
Precisión (Hysteresis)	< 0,25 °C (0.45 °F)	Típico: 0.25% del rango de medición	Aprox. 2mm (0.08 in) con instalación vert.
Retardo	Tiempo de atenuación; 0 ... 30 s	Tiempo Respuesta T99; <5 ms	Aprox. 500 ms (on/off)
Campo de medida (Rango)	-60 ... +160 °C (-76 ... +320 °F)	1 bar a 60 bar relativos	40 mm (1,5") profundidad de penetración
Alcance (SPAN)	25 ... 220 °C (45 ... 396 °F)	-----	-----
Modo de conexión	Máx. 2,5 mm ² (AWG 13)	Conector según EN 175301-803-A cable M16x1.5 o ½-14 NPT Cable de 2 o 3 hilos (0,5 mm ²) (Ø ± 5.4 mm)	316L (1.4404 o 1.4435)
Fuente de Alimentación	8,5 ... 36 V DC	Energía auxiliar UB 5 V DC ±10%	20 ... 253 V CA, 50/60 Hz 20 ... 253 V DC
Consumo de energía	Carga máx.; (Uaux – 8,5 V)/0,023 A	Consumo de energía <7 mA a 10 kΩ	Max. 0.5 W
Condiciones de servicio	Temperatura ambiente; -40...+85°C (-40...+185°F) Humedad relativa del aire; < 98 %, con condensación	Temperatura ambiente; -25 ... +85 °C (-13 ... +185 °F) Presión (recipiente) -1 ... 64 bar g (-14.5 ... 928 psi g)	Temperatura de proceso -40 ... 150 °C (-40 ... 302°F) Presión de proceso -1 ... 64 bar g (-14,5 ... 928 psi g)

SENSOR DE PRESIÓN (SITRANS P200- SIEMENS) (Anexo C) Función; El transmisor de presión mide el manómetro y la presión absoluta de líquidos y gases, así como el nivel de líquidos. La celda de medición de cerámica tiene un puente de resistencia de película delgada al cual la presión de operación p se transmite a través de un diafragma de cerámica. La salida de voltaje de la celda de medición es convertida por un amplificador en una corriente de salida

de 4 a 20 mA o un voltaje de salida de 0 a 10 V DC. La corriente de salida y el voltaje son linealmente proporcionales a la entrada presión. Estructura del dispositivo sin protección contra explosiones; El transmisor de presión consiste en una celda de medición piezorresistiva con un diafragma instalado en una caja de acero inoxidable. Se puede usar con un conector según EN 175301-803-A (IP65), un enchufe de dispositivo M12 (IP67), un cable (IP67) o una conexión rápida de tornillo Quickon (IP67) de cable Quickon (IP67) conectada eléctricamente. La señal de salida está entre 4 y 20 mA o 0 y 10 V.

SENSOR DE TEMPERATURA (SITRANS TH100 Slim - SIEMENS) (Anexo C) El termopar recto con vaina de protección metálica es idóneo para temperaturas de 0 a 1250 °C (32 a 2282 °F) y está disponible con convertidor de temperatura integrado. El transmisor SITRANS TH200 puede utilizarse en todos los sectores industriales. Su tamaño compacto permite instalarlo en un cabezal tipo B (DIN 43729) o mayor. La señal de salida es una corriente continua de 4 a 20 mA, equivalente a la característica del sensor e independiente de la carga. Los transmisores en versión con modo de protección "Seguridad intrínseca" pueden instalarse dentro de las áreas con peligro de explosión. Los aparatos cumplen la directiva 2014/34/UE (ATEX) y las normas FM y CSA.

4.2.1.7 Dinámica de los lazos de control del banco de temperatura.

El banco de control de temperatura cuenta con un autómata programable tipo PLC S7 1200 marca SIEMENS, el cual esta enlazado a una pantalla HMI desde la cual se nutren los datos para el desarrollo de la prueba; en el PLC se tiene dos lazos de control, los cuales serán explicados a continuación:

El lazo de control principal, (temperatura del agua de proceso T4) Figura 40.

Esquema del Lazo de control principal.. Muestra el lazo de control de temperatura del banco, la temperatura del agua de proceso a la salida del intercambiador de calor se mide con una Termorresistencia RTD PT100, esta, presenta un funcionamiento del tipo sensor/transmisor, la física del proceso hace que la temperatura del agua de proceso genere una diferencia de potencial dentro de la Termorresistencia quien a través del controlador realiza el escalamiento al protocolo de comunicación de 4 – 20 mA.

Figura 40.
 Esquema del Lazo de control principal.

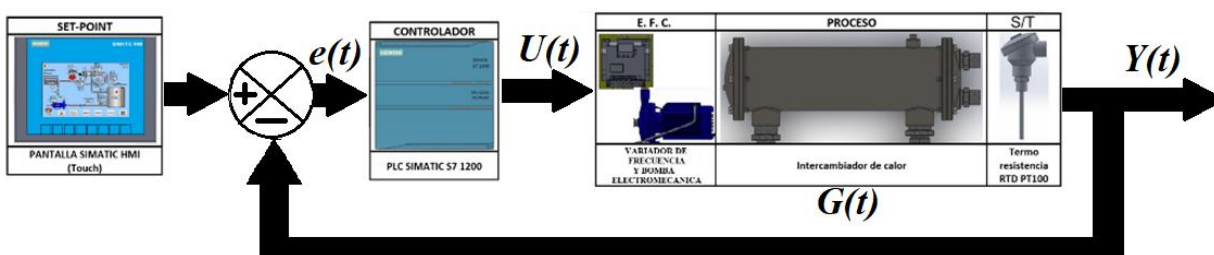
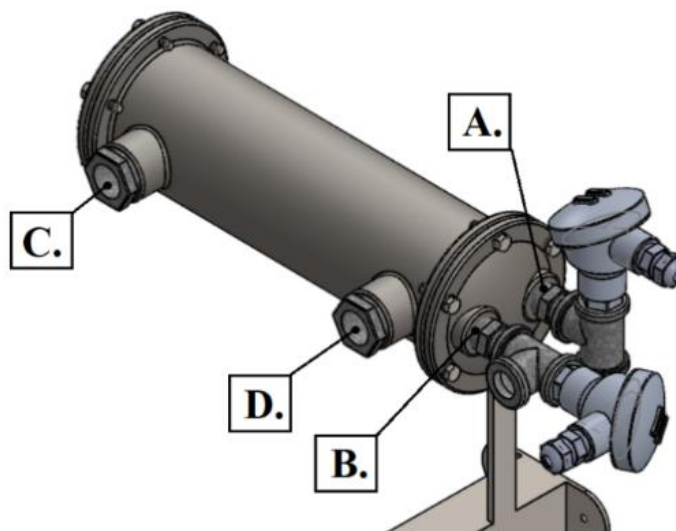


Figura 41.
 Puntos de acceso del intercambiador de calor



El valor equivalente de temperatura digital, ingresa al PLC S7-1200 que funciona como elemento de adquisición y control, la temperatura digital se compara con la señal escalonada prevista en el SET-POINT dentro de la pantalla SIEMES HMI (Touch), si existe una discrepancia, el controlador envía una señal al Elemento Final de Control, para que este actúe sobre el flujo de agua de recirculación (la variable manipulada) aumentando o reduciendo la cantidad de flujo al interior del intercambiador de calor, para hacer que la temperatura de agua de proceso (la variable de proceso) cambie al valor deseado.

4.2.2 El Intercambiador de Calor

El banco de control de temperatura cuenta como uno de sus equipos esenciales un intercambiador de calor tipo U (Ver Anexo C), este equipo tiene un punto de acceso de agua de proceso (A.) (ver Figura 41) de $\frac{3}{4}$ de in, en la tapa de entrada, el cual dirige el agua por los 10 tubos internos del intercambiador hasta la tapa cerrada en el otro extremo, el agua recorre nuevamente por los 10 tubos internos de retorno hasta el punto B, terminando el doble recorrido por el intercambiador. El intercambiador de calor tiene la entrada de agua de circulación por el punto C. de 1 in, esta agua se desplaza por las tres cámaras internas del intercambiador y sale por el punto D.

4.2.2.1 Listado general de modos de fallos en intercambiadores de calor.

Basado en la información publicada por la Organización Internacional de Estandarización, en la norma ISO-14224 (Industrias del Petróleo y del gas natural – Recolección e intercambio de información de confiabilidad y mantenimiento para equipo.) en la Tabla 11.

Modos de Fallas en Intercambiadores de calor (Basado en la Tabla A.33-Modos de Falla-
Cambiadores de Calor de ISO-14224). organizado por definición en orden alfabético.

Tabla 11.

Modos de Fallas en Intercambiadores de calor (Basado en la Tabla A.33-Modos de Falla-
Cambiadores de Calor de ISO-14224).

Unidad de Equipo: INTERCAMBIADORES DE CALOR		
Cod.	Definición	Descripción
UNK	Desconocido	Información inadecuada, Faltante.
STD	Deficiencia Estructural	Potencia reducida debido a impactos, corrosión extrema, Fracturas o agrietamientos.
PDE	Desviación de los parámetros.	Los parámetros monitoreados exceden los niveles de tolerancia.
PLU	Enchufado/ Atascado.	Impedimento total o parcial para el flujo debido a la presencia de agua, sustancias aceitosas, sarro.
ELP	Fuga Externa de medios de procesos.	Escape al ambiente de sustancias a medio procesar.
ELU	Fuga Externa de Utilidades medias.	Escape al ambiente de refrigerante.
INL	Fuga Interior.	Comunicación en la parte Caliente/ Fría.
IHT	Intercambio de calor insuficiente	Proceso de Calor/ Enfriamiento insuficiente.
AIR	Lectura Anormal del Instrumento(s).	Por. Ej. Falsas alarmas, lecturas fallidas.
OTH	Otros	Especificarlos en el campo comentarios.
SER	Problemas menores en servicio.	Componentes perdidos, decolorados, sucios.

4.2.3 Tanque De Almacenamiento

Otro de los equipos esenciales es el tanque de almacenamiento (ver Anexo C), el tanque de almacenamiento cuenta con una tapa de acceso A. (Figura 42.

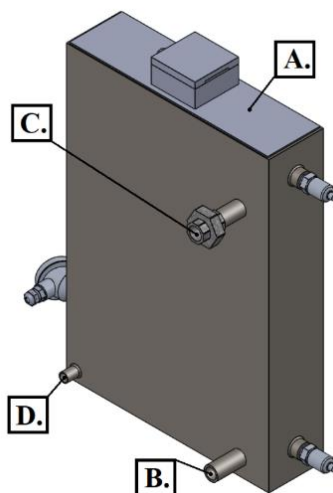
Puntos de acceso al Tanque de Almacenamiento) la cual debe ser removida para depositar el agua de circulación (entre 45 -48 Litros) una vez lleno, internamente dispone de un calentador tipo resistencia, que al ser activado es capaz de calentar el agua a la temperatura de funcionamiento deseada; el tanque cuenta con una salida B. de 1 in, la cual se une con la tubería de succión que se dirige a la bomba, el punto de acceso C. es el final de la línea de retorno del agua de circulación, una vez el agua realiza su función, regresa al tanque a través

de este orificio; el acceso D. (tiene un diámetro de ½ in) es el desagüe del tanque y permanece cerrado por una válvula manual.

Basado en la información publicada por la Organización Internacional de Estandarización, en la norma ISO-14224 (Industrias del Petróleo y del gas natural – Recolección e intercambio de información de confiabilidad y mantenimiento para equipo.) en la Tabla 12.

Modos de fallas en recipientes (Basado en Tabla A.53 – Modos de Falla – Recipientes de ISO 14224). organizado por definición en orden alfabético.

*Figura 42.
 Puntos de acceso al Tanque de Almacenamiento*



4.2.3.1 Listado general de modos de fallos en contenedores.

*Tabla 12.
 Modos de fallas en recipientes (Basado en Tabla A.53 – Modos de Falla – Recipientes de ISO 14224).*

Unidad de Equipo: RECIPIENTES		
Cod.	Definición	Descripción
PLU	Atascado / Atorado.	Restricción total o parcial del flujo.
UNK	Desconocido	Información inadecuada/ Extraviada.

STD	Deficiencia Estructural	Rendimiento reducido a causa de impactos, corrosión inaceptable, fracturas, etc.
PDE	Desviación de los parámetros.	Los parámetros monitoreados exceden los niveles de tolerancia.
ELP	Fuga Externa de medios de procesos.	Escape al ambiente de fluidos primarios.
ELU	Fuga Externa de medios de utilidad.	Escape al ambiente de fluidos secundarios.
AIR	Lectura Anormal del Instrumento(s).	Por. Ej. Falsas alarmas, lecturas fallidas.
OTH	Otros	Especificarlos en el campo comentarios.
SER	Problemas menores en servicio.	Componentes perdidos, decolorados, sucios.

4.3 Selección de los fallos a detectar

Los equipos estacionarios críticos del banco de control de temperatura tienen un comportamiento único y desempeñan una función propia dentro de las sinergias de su ensamble; de igual manera cada equipo tiene unos modos únicos de falla; tal como se presentan para el intercambiador de calor se registraron 12 modos de falla como se aprecia en la Tabla 11.

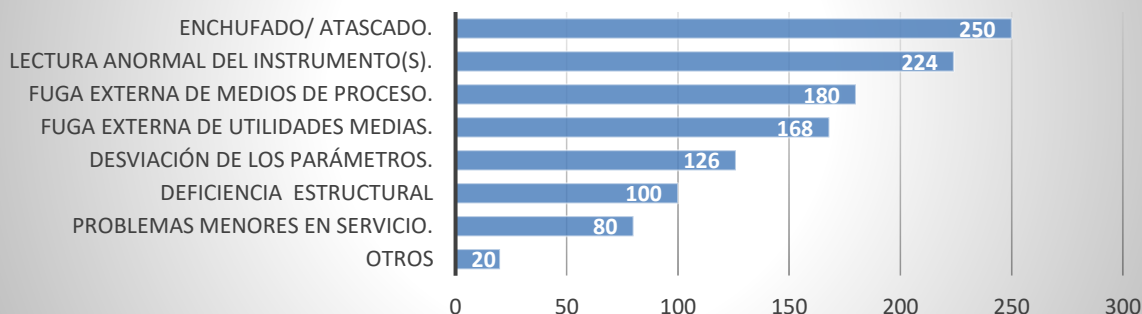
Modos de Fallas en Intercambiadores de calor (Basado en la Tabla A.33-Modos de Falla- Cambiadores de Calor de ISO-14224).**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Para el tanque de almacenamiento son 9 modos de falla, ver Tabla 12.

Modos de fallas en recipientes (Basado en Tabla A.53 – Modos de Falla – Recipientes de ISO 14224).

Figura 43.
Número de Riesgo Prioritario de los fallos en el INTERCAMBIADOR DE CALOR.

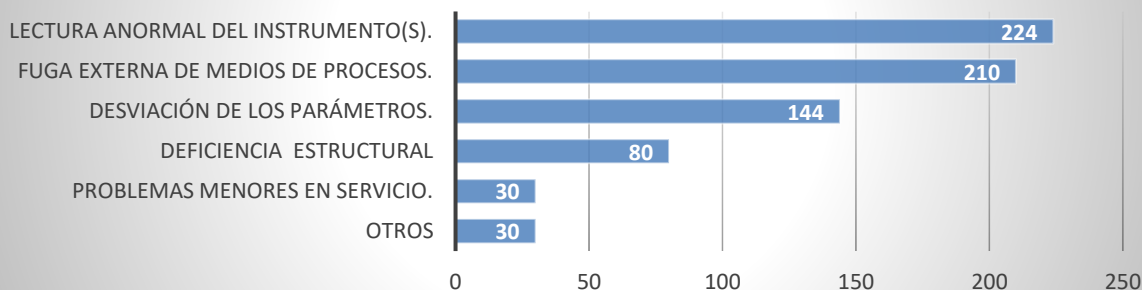
NRP de los Modos de Fallos Incipientes en el INTERCAMBIADOR DE CALOR



La publicación elaborada por la OREDA (SINTEF Industrial Management;, 2002) clasifica las fallas recopiladas dentro de su estudio en cuatro categorías de severidad; CRITICAS, DEGRADADAS, INCIPIENTES Y DESCONOCIDAS, ver; Anexo F. Modos de Fallos en intercambiadores de calor de coraza y tubos (OREDA-2002).Y en Anexo G. Modos de Fallos en Recipientes (OREDA-2002).

Figura 44.
 Número de Riesgo Prioritario de los fallos en el TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

NRP de los Modos de Fallos Incipientes en el TANQUE DE ALMACENAMIENTO



El presente estudio de detección y diagnóstico de fallos se fundamentó en atender el comportamiento de los fallos, por tal razón, el procedimiento de Análisis de Modo y efecto de fallo, AMEF se aplicó a los fallos. Ver Anexo I. Análisis de Modos y Efectos de Fallos en el Intercambiador de calor. Y Basado en las tablas anteriormente presentadas, se organizaron los modos de fallos de acuerdo al Número de Riesgo Prioritario; ver; Figura 43.

Número de Riesgo Prioritario de los fallos en el INTERCAMBIADOR DE CALOR. Y La publicación elaborada por la OREDA clasifica las fallas recopiladas dentro de su estudio en cuatro categorías de severidad; CRITICAS, DEGRADADAS, INCIPIENTES Y DESCONOCIDAS, ver; Anexo F. Modos de Fallos en intercambiadores de calor de coraza y tubos (OREDA-2002). Y en Anexo G. Modos de Fallos en Recipientes (OREDA-2002).

Figura 44.

Número de Riesgo Prioritario de los fallos en el TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

Según McDermott, Mikulak, & Beauregard, Esos modos de falla con los Números de Riesgo Prioritarios más altos deben ser atendidos primero, aunque se debe prestar especial atención cuando la clasificación de gravedad es alta (9 o 10) independientemente del NRP. Según lo evidenciado en el AMEF, (Anexo I. Análisis de Modos y Efectos de Fallos en el Intercambiador de calor.) no hay modos de fallo con severidad de 9 o 10, los valores más altos de severidad son 5 y 7, para la selección de la falla a estudiar en el intercambiador de calor, se tomó el valor mayor del NRP según la Figura 43.

Número de Riesgo Prioritario de los fallos en el INTERCAMBIADOR DE CALOR.:

- Enchufado/ Atascado.
- Lectura Anormal del Instrumento(s).
- Fuga externa de medios de proceso.

Por otra parte, para el TANQUE DE ALMACENAMIENTO en el (Anexo J. Análisis de Modo y Efecto de Fallo en el Tanque de Almacenamiento.) Muestran un valor de severidad de 6 el siguiente modo de fallo, para la selección de la falla a estudiar en el intercambiador de calor, se tomó el valor mayor del NRP según la:

- Lectura Anormal del Instrumento.
- Fuga externa de medios de proceso.

4.4 Análisis detallado de los efectos de los fallos sobre el sistema

En la sección anterior, se determinaron los cuatro fallos objetivos de estudio, dichos fallos para analizar son tres en el intercambiador de calor, (organizados de acuerdo al número de riesgo prioritario NRP) 1) Fuga Externa de medios de procesos 2) Fuga Externa de Utilidades medias, 3) Enchufado/ Atascado, el fallo 4) Fuga Externa de medios de procesos se estableció sobre el tanque de almacenamiento del equipo de control de temperatura, para estos fallos seleccionados se les realizara el análisis detallado de los efectos de los fallos sobre el sistema.

4.5 Diseño de los experimentos

Según; Gutiérrez y De La Vara, el diseño de experimentos es "...la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente." (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008),

El proceso o planta de funcionamiento analizado, consta de tres componentes importantes que intervienen dentro de su composición; en primer lugar; el Elemento Final de

Control, que para este caso, se utilizara el conjunto variador de frecuencia, motobomba, el será el encargado de cambiar o variar el flujo de agua en la línea de agua caliente o de recirculación; el segundo componente es el Proceso físico o Equipo, se hace referencia al intercambiador de calor, es donde se realiza físicamente el intercambio de energía entre los fluidos, y finalmente el tercer elemento que complementa al proceso controlado, el sensor de temperatura T4 tipo RTD PT100 es quien captura la variable monitoreada de temperatura T4 en la salida de la línea de agua fría o agua de proceso.

Con el propósito de alcanzar una profundidad de análisis suficiente, en el desarrollo del proyecto de investigación, se seleccionaron dos de los anteriores elementos que componen el proceso de controlado, para estimular la falla; esto debido a las siguientes razones:

- Facilidad física para inducir una falla controlada gracias al acceso a los puntos internos del componente,
- Reversibilidad de la condición de fallo a funcionamiento normal, y
- Riesgo de afectación permanente en el componente.

Los elementos seleccionados del proceso controlado son; El proceso físico o equipo Intercambiador de calor; y el segundo el sensor de temperatura T4.

El presente proyecto, contiene un conjunto variado de aspectos a analizar tanto en el funcionamiento operacional del intercambiador de calor, como en su mal funcionamiento, que exige la planeación de diferentes experimentos (Figura 45.

Etapas del diseño de los experimentos), los cuales se muestran a continuación:

*Figura 45.
Etapas del diseño de los experimentos*



4.5.1 Planeación de los experimentos

4.5.1.1 Experimento 1: Identificar parámetros normales de régimen de funcionamiento, en el banco de control de temperatura.

- Definición del experimento 1: Identificación de Parámetros de Funcionamiento del Intercambiador de calor

El banco de control de temperatura está gobernado por la acción de variador de frecuencia, el cual controla el flujo de agua de recirculación impulsado por la bomba, Anexo C. Hoja de registro de la máquina., que se dirige al interior del intercambiador de calor, las características de funcionamientos del caudal se estiman no lineales a la frecuencia de funcionamiento de la bomba, de igual manera, el desplazamiento interno del flujo es altamente turbulento y tiene un comportamiento no lineal, adicionalmente, dadas las características experimentales del banco de control de temperatura, es posible programarlo en toda una gama de valores de entrada, bajo estas condiciones, resulta indispensable fijar un punto operativo estable para desarrollar la identificación del lazo de control. Fundamentado en lo mencionado anteriormente, el objetivo del experimento uno es: Estimar los valores operativos funcionales del lazo de control del banco de control de temperatura (Tabla 13.

Condiciones operativas de nivel bajo y nivel alto), con el propósito de identificar el sistema de control. La secuencia para la identificación del proceso inicia con

Tabla 13.
Condiciones operativas de nivel bajo y nivel alto

Parámetros de control	Valor estimado
Temperatura a la salida del Intercambiador de calor del agua de proceso.	32.5°C – 35.5 °C
Temperatura en el Tanque de almacenamiento	43°C
Porcentaje de funcionamiento de la bomba	Nivel bajo 15% 19L/min 0.32175 Kg/s Nivel alto 90% 117 L/min 1.9305 Kg/s
Apertura de la electroválvula	100%

Basado en el desarrollo de la simulación del intercambiador de calor se establecieron los siguientes puntos operativos funcionales; Tabla 14

Tabla 14.
Puntos operativos funcionales del Intercambiador de calor (Simuladas)

	Temperatura		Caudal
	Entrada	Salida	
Agua de Proceso	27.00 °C	34.25 °C	6.72 L/min
Agua de Recirculación	43.00 °C	42.70 °C	117 L/min

- Unidad experimental para la obstrucción y taponamiento del I.C.

Conjunto de ensayos o pruebas experimentales que se realizaran en el intercambiador de calor para medir el efecto en el cambio de los parámetros de salida del intercambiador de calor.

4.5.1.2 Experimento 2: Atascamiento u Obstrucción del Intercambiador de calor.

- Definición del experimento 2: Atascamiento, obstrucción y taponamiento del I.C.

Figura 46.
Esquema simulado de obstrucción y atascamiento del Intercambiador de calor



(a) (b) (c)
 Esquema comparativo del extremo de la tapa móvil, de: (a) extremo con todos los tubos libres, (b) esquema con taponamiento de un tubo, y (c) esquema con múltiples taponamientos

El experimento de obstrucción y taponamiento hace referencia al atascamiento de los tubos internos del intercambiador de calor, de esta forma en el experimento 2 (Figura 46) se realizará la obstrucción controlada y proporcional de algunos de los tubos en el intercambiador de calor, con el objetivo de alterar el flujo de calor al interior de las cavidades del intercambiador y alterar de forma directa o indirecta los parámetros de funcionamiento en la física del intercambiador (Anexo N. Análisis fallo del Intercambiador de Calor Enchufado/Atascado.).

4.5.1.3 Experimento 3: Lectura anormal del instrumento.

- Definición del experimento 3: Lectura anormal del sensor/transmisor RTD PT 100 código TT202.

Dadas las características físicas de conexión del sensor de temperatura tipo RTD PT 100, según la descripción de manual (Industries, 2021) “Con las termorresistencias, la temperatura se mide como un cambio en la resistencia. Las termorresistencias o RTD disponen de elementos sensoriales, como los sensores Pt100 (Industries, 2021) conformes a IEC 60751”

este planteamiento propone que es posible cambiar la resistencia de salida del sensor con la intención de variar la intensidad de la corriente de salida. Coincidiendo con el modo de fallo número 3, del Anexo M. Análisis fallo del Intercambiador de Calor lectura anormal del instrumento.

Figura 47.
Esquema eléctrico simulado del estado de funcionamiento de la RTD.

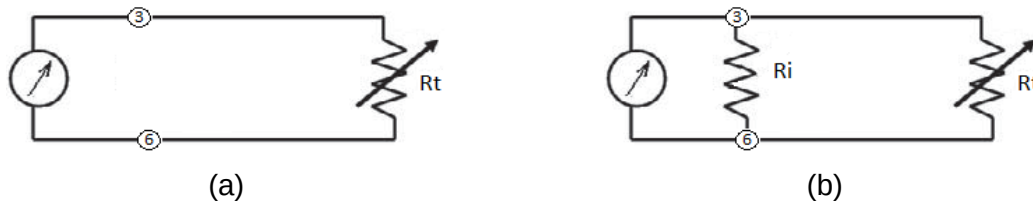


Diagrama eléctrico esquemático del transmisor: (a) Esquema normal de funcionamiento. (b) esquema con la Resistencia insertada R_i en paralelo.

Con base en Anexo R. Especificaciones físicas de instalación del SENSOR SITRANS TH100 SLIM. se plantea el diagrama eléctrico esquemático Figura 47. Esquema eléctrico simulado del estado de funcionamiento de la RTD. En el esquema resalta la ubicación de la resistencia R_i , con el propósito de generar una variación en la resistencia equivalente en la lectura del instrumento.

4.6 Realización de los experimentos

El proceso de realización del experimento (Figura 48. Diagrama de proceso para el desarrollo del experimento) describe una serie de pasos y actividades a desarrollar por parte del autor del proyecto, que inicia; con las acciones de adecuación específica del estado funcional del intercambiador de calor, para este proyecto se evalúan tres macro estados;

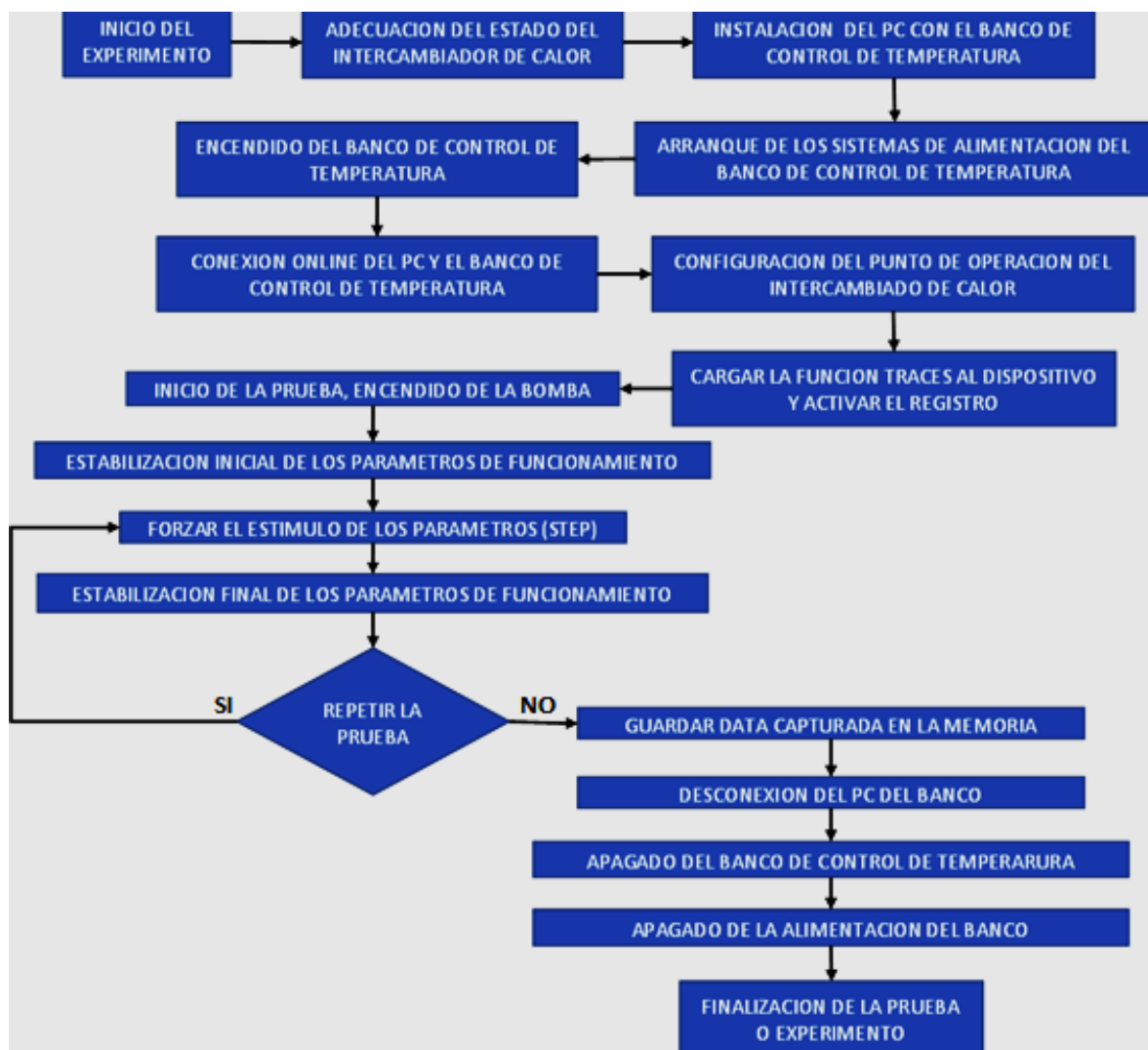
ESTADO INICIAL: es el estado de funcionamiento normal del equipo;

ESTADO DE FALLO 1: el estado de funcionamiento con los tubos internos obstruidos o atascados,

ESTADO DE FALLO 2: el estado de funcionamiento con la lectura anormal del instrumento;

Para cada estado, es necesario, instalar el computador y hacer la conexión física con el banco de control de temperatura, a su vez, se da arranque a los recursos de agua, energía, y aire comprimido requerido por el banco, se enciende el banco de control de temperatura, se enlaza online el banco y el PC y se activa la captura de la información, se configura el punto de operación en la pantalla HMI, y se da inicio con la prueba encendiendo la motobomba, durante el desarrollo de la prueba los parámetros monitoreados de temperatura, actúan dinámicamente hasta alcanzar el punto operativo de estabilización, entonces se procede a estimular el banco con la acción de un step en las condiciones de funcionamiento, el software registra el cambio de los parámetros hasta alcanzar el punto final de estabilización, si es posible y se cuenta con el tiempo necesario, se puede repetir el proceso de estímulo, finalmente se procede a guardar en la configuración TRACE del software, los datos recogidos.

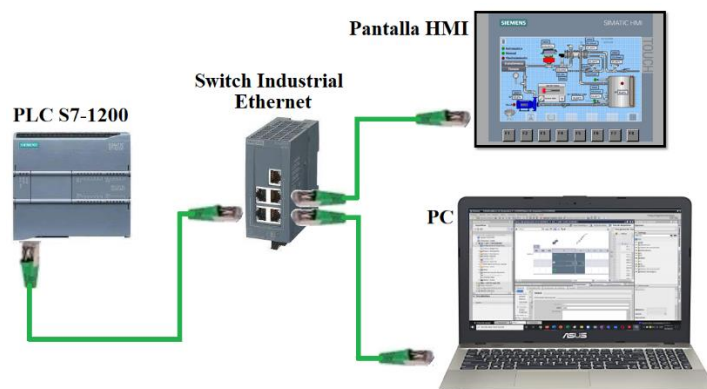
Figura 48.
Diagrama de proceso para el desarrollo del experimento



Ya en este punto, se debe tomar una decisión, si se repite la prueba, bajo las condiciones de funcionamiento fijadas, o si se da por terminada la prueba.

Basado en la descripción anterior del desarrollo del proyecto se realizó la instalación física que se observa en la Figura 49

Figura 49.
 Esquema de conexión entre el PC, el PLC y la pantalla HMI



Se dispuso de un periodo de tiempo de tiempo de 11 meses para la evaluación del estado inicial (Anexo S. Histórico del proceso de adecuación y captura de información.), instalación de fuentes de alimentación, revisión y puesta en marcha, realización de pruebas de calibración, realización de pruebas de identificación, realización de pruebas de fallo obstrucción y atascamiento y realización de pruebas lectura anormal del instrumento.

Cada una de las pruebas válidas dentro del proceso de captura de la data, describen los valores de temperatura inicial y final, en las líneas de agua de proceso y agua de recirculación, adicionalmente, los valores iniciales y cambios de apertura de la electroválvula, y el porcentaje de funcionamiento de la bomba electromecánica, y la presión en la línea de proceso.

4.6.1.1 Realización y registro del experimento 1: Identificación de Parámetros Normales

Con base al diagrama de proceso del desarrollo del experimento, se realizaron los ajustes iniciales de preparación y conexiones físicas de los puntos de alimentación de energía eléctrica, de aire comprimido y agua fría de proceso; adicionalmente se completó el esquema de conexión entre dispositivos y se estableció la conectividad. ver Figura 50.

Adecuación del banco de control de temperatura para el desarrollo del experimento

Cumpliendo con las condiciones iniciales de conexión y alimentación del banco, se procedió a configurar el punto de operación definidos en la Tabla 13.

Condiciones operativas de nivel bajo y nivel alto, se fijan las condiciones de nivel alto, con la justificación de calentar lo más rápido posible el agua dentro del tanque de almacenamiento del banco de intercambiador de calor y llevar los diferentes tubos y accesorios del banco a temperaturas operativas de régimen.

Figura 50.
Adecuación del banco de control de temperatura para el desarrollo del experimento



Una vez programados los diferentes puntos operativos en el banco, se activa el Variador de Frecuencia y se enciende la motobomba (Figura 51).

Figura 51.
Configuración inicial del banco de control de temperatura en la pantalla HMI.

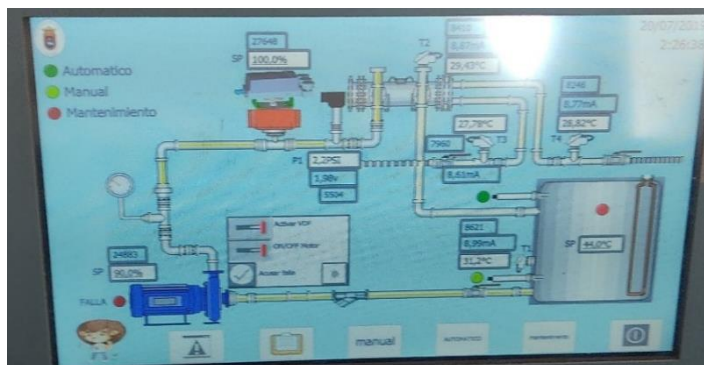


Figura 52.
 Gráfica de la dinámica de estabilización del banco de control de temperatura.

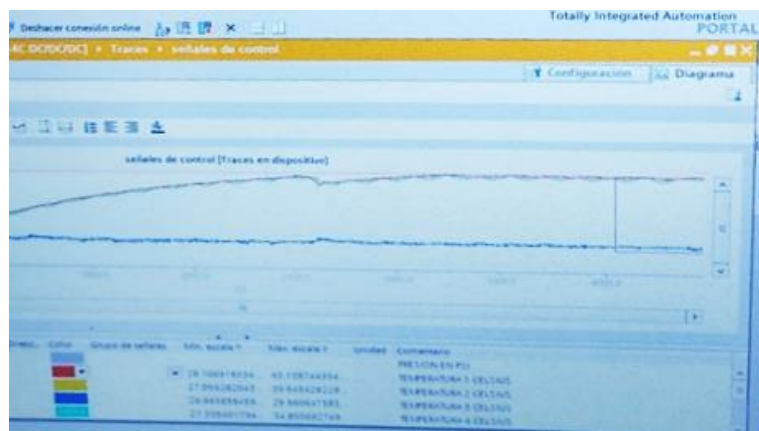
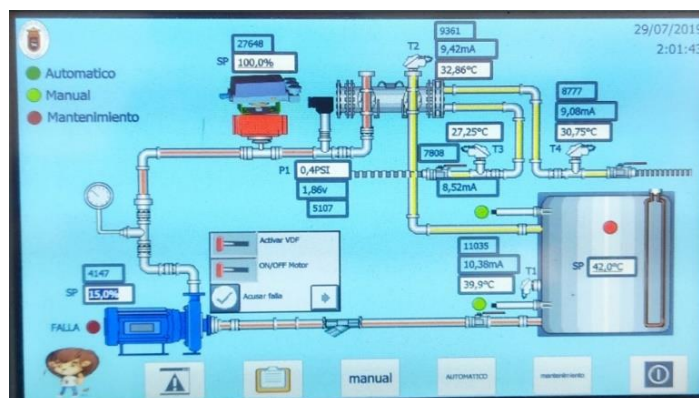


Figura 53.
 Condiciones finales de operación

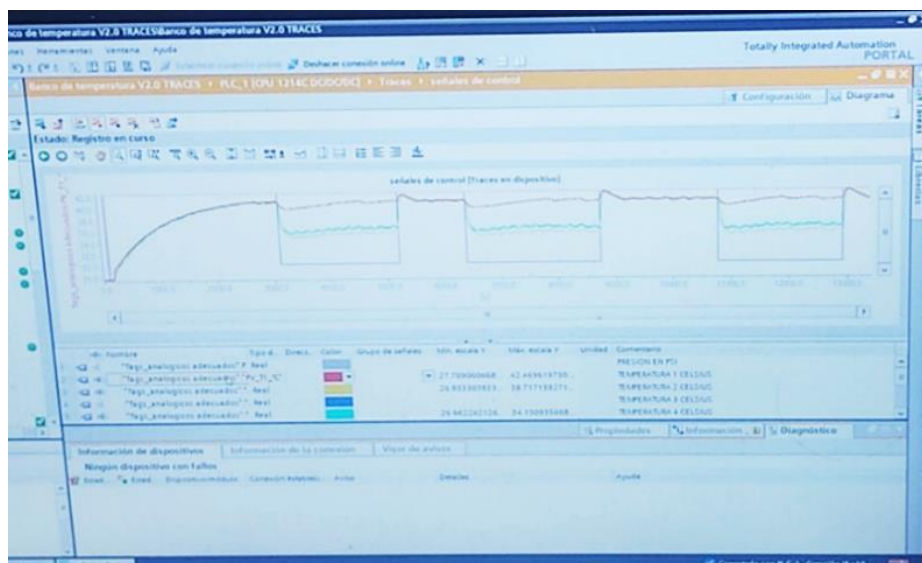


El tiempo de desarrollo de la dinámica inicial de estabilización, depende de las condiciones medio ambientales, y el flujo de agua en la línea de agua fría (este flujo se presume constante); en bajo condiciones normales, la temperatura en los alrededores del laboratorio oscila entre 27 – 29.5 °C, la humedad relativa esta entre 55 – 65 % y el flujo de agua en la línea de proceso 6.1 – 6.9 L/min (línea suministrada por el sistema de agua del laboratorio); (ver Anexo T. Capturas de condiciones ambientales del laboratorio y flujo de agua de agua de proceso a diferentes horas y en diferentes pruebas.), bajo estas condiciones el periodo de estabilización a condiciones operativas iniciales este alrededor de 40 – 45 min (Figura 52).

Con la estabilización se procede a insertar un estímulo tipo STEP en el porcentaje de funcionamiento en el variador de frecuencia de la bomba electromecánica, ver Figura 53.

Condiciones finales de operación

*Figura 54.
 Esquema de repetición de la dinámica de estabilización del proceso.*



El procedimiento se repitió alternando entre los diferentes puntos de operación de la bomba electromecánica, cambiando los valores del variador de frecuencia al máximo y mínimo operativos; (90% y 15%) respectivamente (Figura 54), del desarrollo del experimento uno se obtuvo la data Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16).

4.6.1.2 Realización y registro del experimento 2. obstrucción y taponamiento de cinco tubos del Intercambiador de calor

Para el desarrollo del experimento 2.1 obstrucción y taponamiento de cinco tubos del intercambiador de calor; definido en la sección 163, con el equipo apagado y en estado de temperatura ambiente; (Figura 55)

Figura 55.
Procedimiento de retiro de la tapa cerrada o de retorno



(a)



(b)



(c)

Se procede a la ubicación de un recipiente para recoger el agua al interior de los tubos del intercambiador (a), se procede a retirar el tornillo de purga, para sacar el exceso de agua del interior del intercambiador de calor (b), finalmente se retira los seis pernos que sujetan la tapa al cuerpo del intercambiador (c) y se vacían completamente los tubos del intercambiador de calor.

Figura 56.
Limpieza y secado de los tubos en el extremo visibles del intercambiador de calor.



Con la tapa expuesta, se realiza la limpieza de los orificios visibles del del extremo expuesto del intercambiador Figura 56, el propósito es identificar los mejores elementos para instalar el taponamiento, garantizando el sellado completo del tubo.

Utilizando tiras de caucho resistente a altas temperaturas y silicona gris (de alta temperatura) se efectuó la instalación de los 5 tapones en diferentes tubos para modificar físicamente el comportamiento del intercambiador y forzar condiciones de taponamiento y obstrucción en los tubos.

Figura 57.
Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) un tubo, (b) dos tubos.



(a)



(b)

Basados en el estudio de análisis del Anexo N. Análisis fallo del Intercambiador de Calor Enchufado/ Atascado. Del primer recorrido o paso por el intercambiador de calor, se taponó la salida del tubo número 4; Figura 57 Agujero 4s (a); del segundo trayecto o paso del intercambiador de calor, se seleccionó la entrada del tubo número 7; Agujero 7e (b).

Figura 58.

Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) tres tubos, (b) cuatro tubos



(a)



(b)

Aprovechando que el extremo de retorno está expuesto, se continuó con la instalación de los tapones en los tubos del intercambiador de calor; de igual manera, que con los dos primeros agujeros y basados en el estudio de análisis del Anexo N. Análisis fallo del Intercambiador de Calor Enchufado/ Atascado.. Del tercer recorrido o paso por el intercambiador de calor, se taponó la salida del tubo número 14; Figura 58, Agujero 14s (a); del cuarto trayecto o paso del intercambiador de calor, se seleccionó la entrada del tubo número 19; Agujero 19e (b), una vez instalado este último tapón en el intercambiador de calor, se alcanza a eliminar todo un trayecto de los cuatro pasos del intercambiador de calor, alcanzando un nivel de obstrucción del 20%.

De manera experimental se tomó la decisión de aumentar, el nivel de obstrucción y atascamiento, mayor al 20% alcanzado, y para esto, basados en el estudio de análisis del Anexo N. Análisis fallo del Intercambiador de Calor Enchufado/ Atascado. Del tercer recorrido o

paso por el intercambiador de calor, se taponó la salida del tubo número 6; Figura 59, Agujero 6e.

Figura 59.
Fallo de obstrucción y atascamiento de cinco tubos.



Con la instalación de este último tapón, se completaron las condiciones de fallo y la incorporación física del máximo nivel de taponamiento del experimento, alcanzando cinco tubos obstruidos o atascados al interior del intercambiador de calor, se instala nuevamente la tapa cerrada o del extremo de retorno.

Del desarrollo del experimento dos, se obtuvieron las siguientes datas del Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16).; en la Columna 1: PRUEBA 17 08 04 2022 Identificación; Columna 2: PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO PLANTA 5Tubos; Columna 3: PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO PLANTA 4Tubos; Columna 4: PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO PLANTA 3TUBO; Columna 5: PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO PLANTA 2TUBOS; Columna 6: PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO PLANTA 1TUBO y la Columna 7: PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK.

4.6.1.3 Realización del experimento 3 Lectura anormal del instrumento, sensor TT202 tipo Termorresistencia RTD PT100

Basados en Anexo C. Hoja de registro de la máquina., el banco de control de temperatura cuenta con tres tipos de sensores; sensor de temperatura, sensores de presión y sensor de presencia de nivel, de estos instrumentos los sensores de temperatura son los principales sensores que monitorean los flujos de proceso y flujos de recirculación, (agua caliente y agua fría), para estos sensores se utilizaron los sensores de temperatura tipo TERMORRESISTENCIA RTD PT 100.

El modo descriptivo cuatro, del Anexo M. Análisis fallo del Intercambiado de Calor lectura anormal del instrumento., señala que el sensor TT104, es el único que presenta una variación sensible sobre los sistemas de control.

Selección de la resistencia anormal a instalar El valor operacional de la resistencia de salida está medido en el rango de funcionamiento; $27.15^{\circ}\text{C} < T_4 < 35.5^{\circ}\text{C}$, hallados en los niveles operacionales alcanzados durante la prueba de identificación; Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). (columna 1) Debido a limitaciones importantes en la capacidad de calentamiento en el tanque de almacenamiento, la temperatura del sensor no puede subir más de este nivel de funcionamiento, por la capacidad de la resistencia eléctrica.

Según los valores del Anexo V. Tabla de valores de temperatura para las termorresistencias RTD PT100 (fragmento de la TABLA 6-5 del Libro de Creus Sole 2010), los valores de resistencia en ohmios para los extremos máximos y mínimos medidos en la prueba

de identificación se expresan en la Tabla 15.

Valores máximos y mínimos medidos en la prueba de modelado por identificación.

Tabla 15.

Valores máximos y mínimos medidos en la prueba de modelado por identificación.

Valor	Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)
Mínimo	27	110,509
Máximo	35	113,607

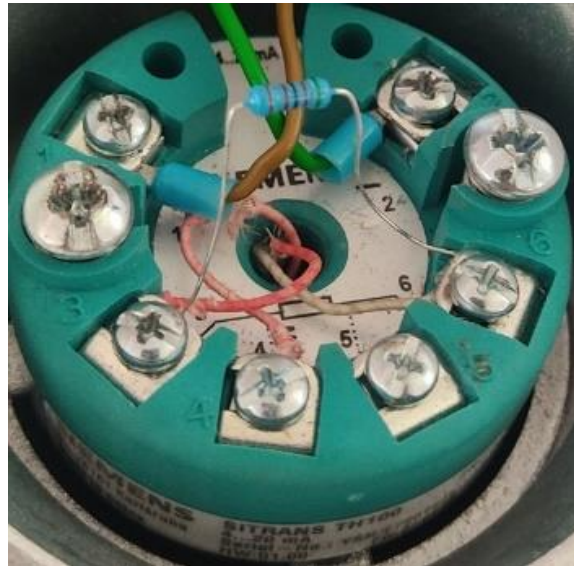
De forma aleatoria, se escoge una resistencia eléctrica para instalarse como resistencia para alterar el comportamiento de sensor y provocar un funcionamiento anormal del instrumento; la resistencia que se tomo tiene las siguientes características, de acuerdo con el código de colores IEC, es una resistencia de cinco bandas (VERDE, ROJA, NEGRO, ROJO ROJO) 52000 $\Omega \pm 2\%$ Tipo E48. Basados en el análisis expresado en

El experimento de obstrucción y taponamiento hace referencia al atascamiento de los tubos internos del intercambiador de calor, de esta forma en el experimento 2 (Figura 46) se realizará la obstrucción controlada y proporcional de algunos de los tubos en el intercambiador de calor, con el objetivo de alterar el flujo de calor al interior de las cavidades del intercambiador y alterar de forma directa o indirecta los parámetros de funcionamiento en la física del intercambiador (Anexo N. Análisis fallo del Intercambiado de Calor Enchufado/ Atascado.).

Experimento 3: Lectura anormal del instrumento. Se instala en los terminales 3 y 6.

Figura 60.

Alteración de la física del sensor para provocar la lectura anormal del instrumento.



Tomando la Ecuación 38.

Resistencia equivalente en paralelo, y calculando la Resistencia R_{eq} (Resistencia equivalente del circuito)

$$R_{eq} = \frac{R_t R_a}{R_t + R_a} = \frac{110,509 * 52000}{110,509 + 52000} = 110.2746\Omega$$

Con la instalación de la resistencia de $52000 \Omega \pm 2\%$, se realizó el experimento 3, de lectura anormal del instrumento; el cual genero la data presente en el Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16).; Columna 7: PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK.

4.7 Modelo funcional del intercambiador de calor (PMSF)

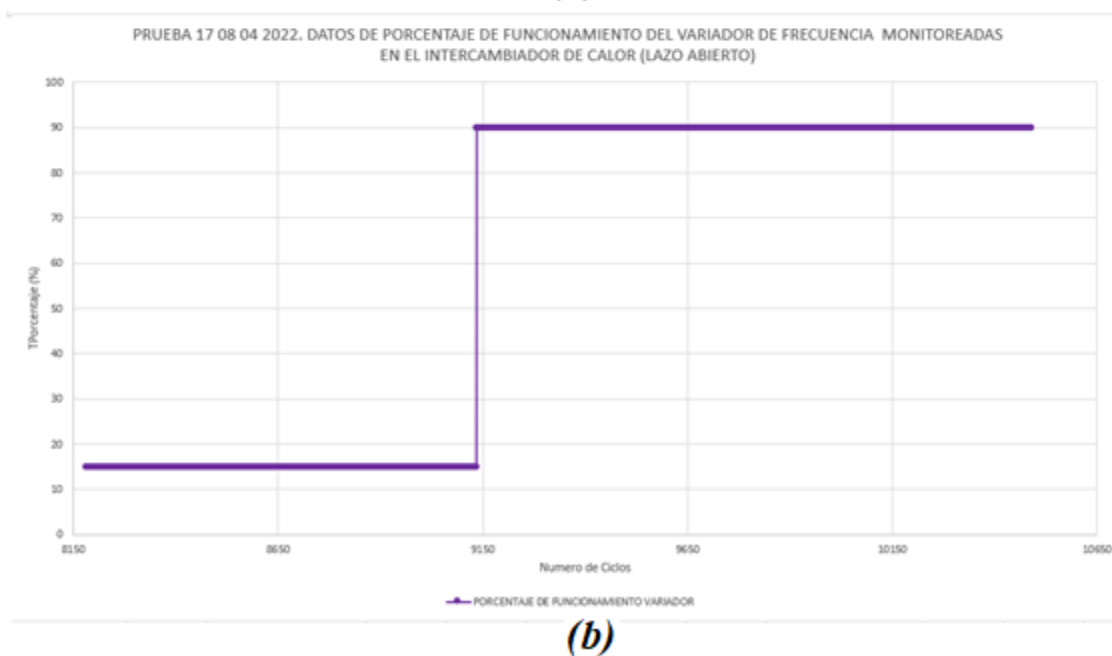
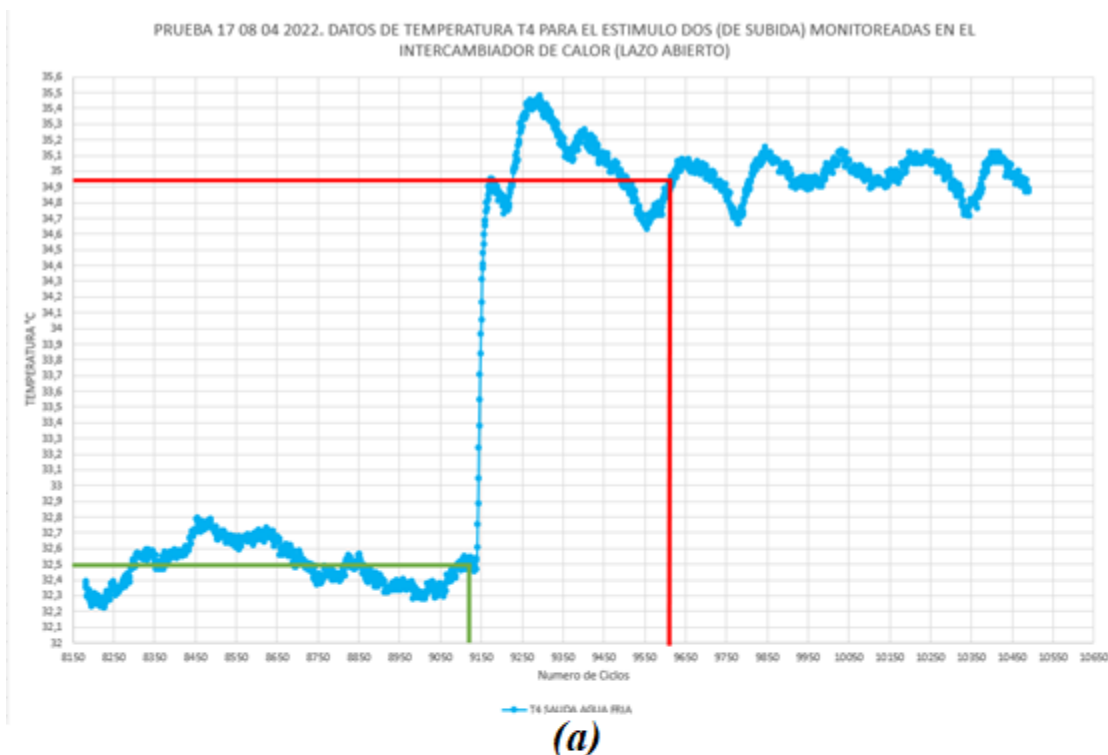
Tomando los datos registrados en el Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16)., en la Columna 1: La PRUEBA 17 08 04 2022 Identificación, en el desarrollo completo de este experimento, se realizaron 14561 ciclos de

captura de datos, con un intervalo de 1.5 segundos / ciclo, es decir, aproximadamente 6 horas, de duración del experimento. Se realizó un paso de estabilización inicial, a 90% de la capacidad de la bomba, a partir de este, se realizaron los siguientes estímulos, STEP 1 de bajada (a 15%), STEP 2 de subida (a 90%), STEP 3 de bajada (a 15%), STEP 4 de subida (a 90%) y STEP 5 de bajada (a 15%). Para el análisis se utilizó la data capturada en el Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). Columna 1 PRUEBA 17 08 04 2022 Identificación en la sección correspondiente al estímulo dos STEP 2 en subida del experimento. La data presenta la siguiente Gráfica de respuesta; Figura 61.

Gráficas de respuesta de temperatura T4 (a) y Porcentaje de la bomba (b) de la PRUEBA 17 08 04 2022 Estado Normal de la planta,

Figura 61.

Gráficas de respuesta de temperatura T4 (a) y Porcentaje de la bomba (b) de la PRUEBA 17 08 04 2022 Estado Normal de la planta



Basados en el procedimiento señalado en la Modelo matemático para la identificación de la planta (método de los dos puntos). Se especifican de la Figura 61 Los valores iniciales para la construcción del modelo matemático y la identificación de la planta:

Tabla 16.

Valores Iniciales para la construcción del modelo matemático del funcionamiento normal de la planta.

Puntos	Temperatura (C°)	Ciclos	Tiempo (s) 1.5(S)	STEP
Inicio	32.494	9134	1428	15
Final	34.968	9616	2151	90

Se aplica la Ecuación 2.

Cambio de temperatura.

Ecuación 50.

Cambio de temperatura modelo de planta funcionamiento normal.

$$\Delta Temperatura = T^{\circ}_{Final} - T^{\circ}_{Inicial} = 34.968 - 32.494 = 2.474$$

Se calculan los parámetros iniciales de temperatura; $T^{\circ}_{63.2\%}$ y $T^{\circ}_{28.3\%}$ aplicando la Ecuación 3.

Parámetros del 63.2% y el 28.3%,

$$T^{\circ}_{63.2\%} = T^{\circ}_{Inicial} + 0.632 * \Delta Tem = 32.494 + 0.632 * 2.474 = 34.057568$$

$$T^{\circ}_{28.3\%} = T^{\circ}_{Inicial} + 0.283 * \Delta Tem = 32.494 + 0.283 * 2.474 = 33.194142$$

Con los datos de temperatura anteriormente calculados, se lee de la parte dinámica, de la gráfica de respuesta del eje de las ordenadas, (ver Figura 62; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) las temperaturas; $T^{\circ}_{63.2\%}$ y $T^{\circ}_{28.3\%}$ y se proyectan sobre la gráfica de respuesta identificando los valores de eje de las abscisas, los datos leídos están en Números de ciclos, relacionando la tasa de captura programada en la función TRACE del PLC, se identifica el tiempo en segundos; (Tabla 17.

Tiempo para alcanzar el 63.2% y 28.2% de la curva dinámica del modelo de la planta en estado normal)

Figura 62.
Sección dinámica Ampliada de la Prueba 17 08 04 2022

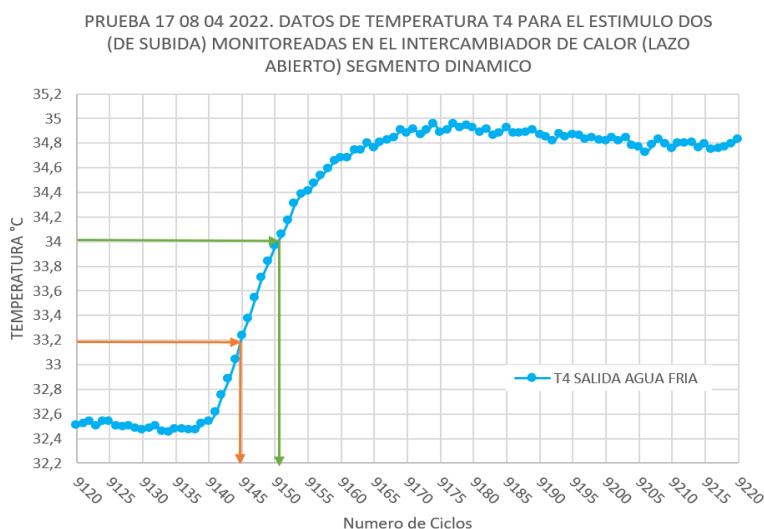


Tabla 17.
Tiempo para alcanzar el 63.2% y 28.2% de la curva dinámica del modelo de la planta en estado normal

	Temperatura (°C)	Ciclos	Tiempo (s) 1.5 /ciclo	STEP
Inicio	32.494	9134	0 s	15
T° _{28.3%}	33.194142	9144.8	16.2 s	
T° _{63.2%}	34.057568	9151	25.5 s	
Final	34.968	9616	723 s	90

Basados en las Ecuación 4.

Tiempo de estabilización. Ecuación 5.

Tiempo Muerto. Ecuación 6.

Ganancia del sistema. De la sección 3.7.2 Modelo matemático para la identificación de la planta (método de los dos puntos).

Se calculan los parámetros característicos del modelo matemático de identificación de la planta en estado normal. (Tabla 18)

Tabla 18.

Parámetros característicos del modelo de la planta en estado normal.

Parámetro	Formula	Ecuación	Valor
T (Tiempo de estabilización)	$\tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.2\%})$	$\tau = 1.5(25.5 - 16.2)$	13.95 s
Θ (Tiempo Muerto)	$\theta = t_{63.2\%} - \tau$	$\theta = 25.5 - 13.95$	11.55 s
K (Ganancia)	$K = (\Delta_{Salida})/(\Delta_{Entrada})$	$K = (34.968 - 32.494)/(90 - 20)$	0.0353428

4.7.1 Ley de control PID de la planta, en estado normal de funcionamiento.

Basados en el desarrollo presentado en la sección 3.7.3 Modelo matemático para la ley de control del proceso identificado Y utilizando las Ecuación 8.

Parámetro K_c , Ecuación 9.

Parámetro τ_i , Ecuación 10.

Parámetro τ_d . (ver Tabla 19)

Tabla 19.

Valores característicos K_c , T_i y T_d , Método de Ziegler – Nichols.

Parámetro	Formula	Ecuación	Valor
K_c	$K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{-1}$	$K_c = \frac{1.2}{0.0353428} \left(\frac{11.55}{13.95} \right)^{-1}$	41.00837
τ_i	$\tau_i = 2.0\tau \left(\frac{\theta}{\tau} \right)$	$\tau_i = 2.0 * 13.95 \left(\frac{11.55}{13.95} \right)$	23
τ_d	$\tau_d = 2.0\tau \left(\frac{\theta}{\tau} \right)$	$\tau_i = 0.5 * 13.95 \left(\frac{11.55}{13.95} \right)$	5.775

Con los valores, K_c , T_i y T_d , se aplican en Ecuación 11.

Parámetro K_p . Ecuación 12.

Parámetro K_i , Ecuación 13.

Parámetro K_d . Necesarios para calcular los valores de la ley de control PID. (ver Tabla 20)

Tabla 20.

Parámetros principales de la ley de control del PID

Parámetro	Formula	Ecuación	Valor
-----------	---------	----------	-------

Kp	$K_p = K_c$	$K_p = 41.00837$	41.00837
Ki	$K_i = K_c / \tau_i$	$K_i = 41.00837 / 23$	1.782972
Kd	$K_d = K_c * \tau_d$	$K_p = 41.00837 * 5.775$	7.101016

4.7.2 Simulación de la planta y la ley de control en estado normal de funcionamiento.

Basado en los valores de la Tabla 18.

Parámetros característicos del modelo de la planta en estado normal. El Tiempo de estabilización, el tiempo muerto y la ganancia, se representa el comportamiento del modelo de la planta identificado en el experimento prueba 17 08 04 2022, de la tabla 16 y utilizando funciones de transferencia se plantea la Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia.

Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \left(\frac{0.0353428}{13.95s + 1} \right) e^{-11.55s}$$

La simulación del proceso y la ley de control se realizaron en el software SIMULINK una herramienta que proporciona un entorno de diagramas de bloques orientado al diseño basado en modelos, soportado por el programa MATLAB.

Para la caracterización del comportamiento de la gráfica de estímulo de la planta, se fijan dos puntos de referencia; el Valor Abs, esta referencia indica los valores alcanzados por los puntos de interés, desde la coordenada cero o absoluta del sistema de referencia de la gráfica de respuesta, y la referencia NETO, la cual indica los valores ajustados solo al rango de

la gráfica que pertenece al estímulo STEP. Por tanto, estos valores se calculan como la diferencia entre los valores absolutos menos los puntos de STEP. (NOTA, estos sistemas de referencia permanecerán constantes en el desarrollo de todas las pruebas).

Los puntos iniciales para la medición de las características de la gráfica de la dinámica del proceso, en función del estímulo después de la estabilización inicial, son: TIEMPO PROGRAMADO DEL ESTIMULO, Temperatura inicial, la temperatura final, la ganancia del sistema, la temperatura de retardo, la temperatura de la constante de tiempo y la temperatura de asentamiento. (ver Tabla 21.

Puntos característicos de referencia para la evaluación del comportamiento dinámico de la gráfica en el estímulo.)

Tabla 21.
Puntos característicos de referencia para la evaluación del comportamiento dinámico de la gráfica en el estímulo.

Característica	Símbolo	Valor
Tiempo de estímulo (s)	test	270 s
Temperatura inicial (°C)	ti	31.00 °C
Temperatura final (°C)	tf	34.10 °C
Ganancia (°C)	K	3.10 °C
Temperatura de retardo (°C)	Tr	32.55 °C
Temperatura en Constante de tiempo	T _{63.28%}	32.96 °C
Temperatura de asentamiento (s)	Ts	33.94 °C

El modelo matemático simulado incluye como modelo de la planta simulada la función de transferencia representada en la Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia., las constantes de configuración del PID calculadas en la Tabla 20.

Parámetros principales de la ley de control del PID, la configuración del time delay del bloque transport delay 11.55 y las Características del estímulo en el bloque STEP son: Step time: 270, Initial Value: 31, Final Value: 34.1, Sample time: 1.

Basado en las Características típicas de una curva de respuesta a un sistema de segundo orden, de la sección 3.7.1 Aspectos básicos para la identificación de la planta Los valores medidos de la planta simulada (Figura 63.

Diagrama de bloques del modelo matemático del banco y el sistema de control PID calculado) (color negro) sobre la Figura 64.

Gráfica de respuesta del modelo matemático del banco en condiciones normales con el sistema de PID calculado., están representados en Tabla 22.

Características de la curva de respuesta del modelo de la planta simulado.

Figura 63.

Diagrama de bloques del modelo matemático del banco y el sistema de control PID calculado

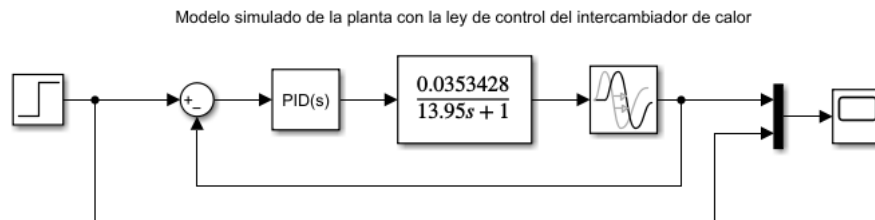


Figura 64.

Gráfica de respuesta del modelo matemático del banco en condiciones normales con el sistema de PID calculado.

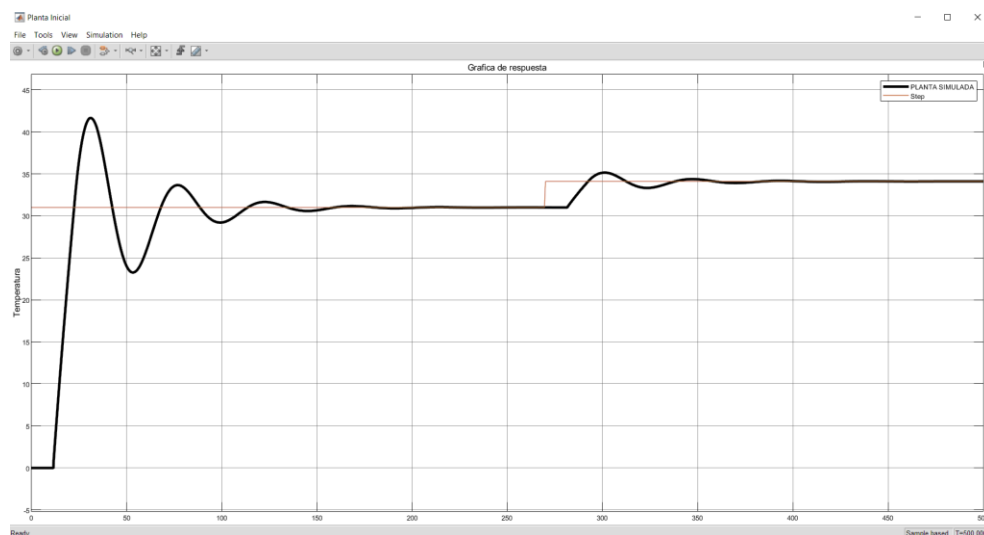


Tabla 22.

Características de la curva de respuesta del modelo de la planta simulado.

Ley de Control		P=41.00837	I=1.782972	D=7.101016
Característica	Símbolo	Evaluación	Valor Abs	Neto
Tiempo muerto	θ	Inicio de la Dinámica	281.500	11.50 s
Tiempo de retardo (s)	td	32.55 °C (0.5 K)	286.600	5.10 s
Constante de tiempo	$t_{63.28\%}$	32.96 (0.63% K)	288.075	6.57 s
Tiempo de subida (s)	tr	34.1°C (1 K)	292.430	11.43 s
Tiempo Pico (s)	tp	35.15 °C	301.000	19.50 s
Sobre elongación (°C)	Mp	Punto máximo	35.15	1.05 °C
Tiempo de asentamiento (s)	ts	33.94 (34.1+/- 0.05)	313.675	32.17 s

4.7.3 Ajuste de la ley de control utilizando métodos heurísticos (tabla ensayo error)

El ajuste de la presente ley de control se realizó en acompañamiento de un experto, el ingeniero ROCCO TARANTINO ALVARADO. El proceso de afinado describe cambios controlados a la ley de control y evaluar los resultados con respecto a la medición anterior, cualificando si esta tiene un mejor comportamiento o no, esta cualificación se basa en dos criterios fundamentales, basados en la recomendación del experto:

Criterio 1: El valor del sobre elongación (Mp) debe ser menor al 10% del valor del estímulo.

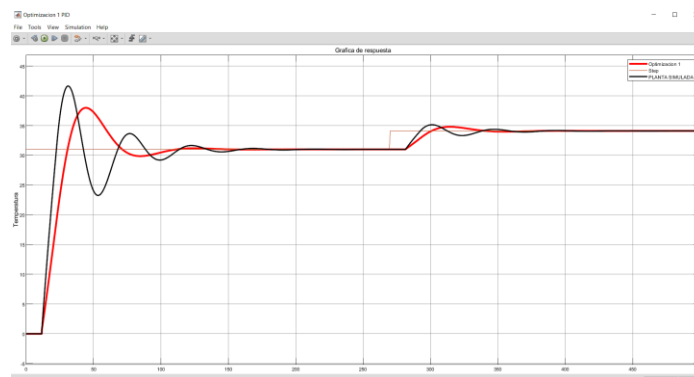
Criterio 2: El valor del tiempo de estabilización (t_s) debe ser menor a cuatro veces la constante de tiempo (Tao), o al tiempo tomado por el proceso para alcanzar el 63.28% del estímulo.

Según el estímulo tipo STEP es de $+3.1^\circ$, pasando de (31°C valor inicial, al $34,1^\circ\text{C}$ valor final) equivale a una variación del 10% de la condición inicial en el punto de operación; con base en la Tabla 22.

Características de la curva de respuesta del modelo de la planta simulado. Evaluando el criterio uno; La ley de control presenta un problema importante con el valor de la sobre elongación M_p , este valor es de 1.05°C , esta alrededor del 33.87% del valor del estímulo, por otra parte; según el criterio número dos, el tiempo de estabilización o asentamiento presente en la gráfica es de 32.17 s, siendo 4.9 veces más que la constante de tiempo, excediendo el criterio dos; por tanto, resulta una ley de control inadecuada, por tal razón debe ser mejorada, buscando mejorar estos parámetros.

4.7.3.1 MEJORA 1 reducción del valor proporcional al 50%

Figura 65.
 Gráfica comparativa de la Planta inicia (negro) Vs Mejora 1 (Rojo)



Según la Figura 65.

Gráfica comparativa de la Planta inicia (negro) Vs Mejora 1 (Rojo), se miden los valores de la gráfica de la planta aplicada la mejora 1 en color rojo y de obtienen los valores de la Tabla 23. Resultados de la Mejora 1 de la ley de control PID (reducción del valor proporcional al 50%).

Basados en la Tabla 23, la gráfica del comportamiento de la planta con las condiciones de ajuste 1 (Gráfica en color rojo), Evaluando el criterio uno; La ley de control presenta una sobre elongación M_p , de 0.7°C , esta alrededor del 22.58% del valor del estímulo, en comparación de la planta original (color negro) se observa una reducción en el valor de M_p , pero no cumpliendo el criterio uno; por otra parte; según el criterio número dos, el tiempo de estabilización o asentamiento presente en la gráfica es de 73.50 s, siendo 6.5 veces más que la constante de tiempo del mismo, excediendo el criterio dos; por tanto, resulta una ley de control con ventajas en la sobre elongación o sobre estímulo, por tal razón el cambio del valor PROPORCIONAL se mantiene, y se continua la sintonización, buscando mejorar los demás estos parámetros.

Tabla 23.

Resultados de la Mejora 1 de la ley de control PID (reducción del valor proporcional al 50%).

Cambios de la Ley de Control		P=20.50418	I=1.782972	D=7.101016
Característica	Símbolo	Evaluación	Valor Glob	Valor STEP
Tiempo muerto	θ	Inicio de la Dinámica	281.500	11.50 s
Tiempo de retardo (s)	td	32.55°C (0.5 K)	290.500	9.00 s
Constante de tiempo	$t_{63.28\%}$	32.96 (0.63% K)	292.800	11.30 s
Tiempo de subida (s)	tr	34.1°C (1 K)	300.725	19.22 s
Tiempo Pico (s)	tp	35.15°C	314.000	32.50 s
Sobre elongación ($^\circ\text{C}$)	M_p	Punto máximo	34.8	0.7°C
Tiempo de asentamiento (s)	ts	33.94 (34.1 ± 0.05)	355.000	73.50 s

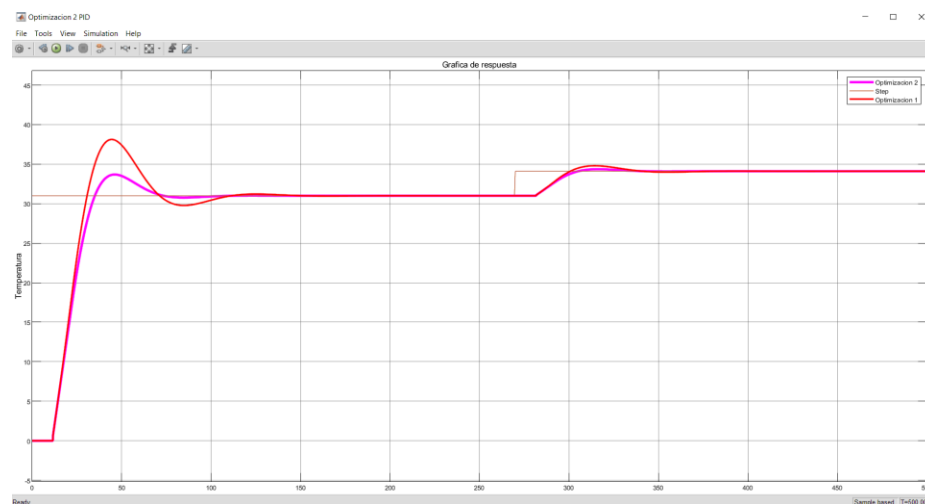
4.7.3.2 MEJORA 2 Reducir el valor Integral al 80% y mantener la reducción del valor proporcional al 50%

Según la Figura 66.

Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 1 (Rojo) Vs Mejora 2 (Magenta)., se miden los valores de la gráfica de la planta aplicada la mejora 2 en color magenta y de obtienen los valores de la Tabla 24.

Resultados de la mejora 2 de la ley de control PID (Reducir el valor Integral al 80% y mantener la reducción del valor proporcional al 50%)

Figura 66.
 Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 1 (Rojo) Vs Mejora 2 (Magenta).



Basados en la Tabla 24, la gráfica del comportamiento de la planta con las condiciones de ajuste 2 (Gráfica en color magenta), Evaluando el criterio uno; La ley de control presenta una sobre elongación M_p , de $0.256\text{ }^{\circ}\text{C}$, esta alrededor del 8.26% del valor del estímulo, en comparación de la Mejora 1 (color rojo) se observa una reducción en el valor de M_p , y se cumple el criterio uno, con un M_p menor al 10%; por otra parte; según el criterio número dos, el

tiempo de estabilización o asentamiento presente en la gráfica es de 73.00 s, siendo 5.96 veces más que la constante de tiempo del mismo, excediendo el criterio dos; por tanto, por tanto, resulta una ley de control con ventajas en la sobre elongación o sobre estímulo, pero son cumplir el criterio 2, por tal razón, se mantienen los valores PROPORCIONAL E INTEGRAL de la MEJORA 2, y se continua la sintonización, buscando mejorar los demás estos parámetros.

Tabla 24.

Resultados de la mejora 2 de la ley de control PID (Reducir el valor Integral al 80% y mantener la reducción del valor proporcional al 50%)

Cambios de la Ley de Control		P=20.50418	I=1.426377	D=7.101016
Característica	Símbolo	Evaluación	Valor Glob	Valor STEP
Tiempo muerto	θ	Inicio de la Dinámica	281.500	11.50 s
Tiempo de retardo (s)	td	32.55 °C (0.5 K)	291.075	9.57 s
Constante de tiempo	$t_{63.28\%}$	32.96 (0.63% K)	293.740	12.24 s
Tiempo de subida (s)	tr	34.1°C (1 K)	305.187	23.69 s
Tiempo Pico (s)	tp	35.15 °C	316.000	34.50 s
Sobre elongación (°C)	Mp	Punto máximo	34.356	0.256 °C
Tiempo de asentamiento (s)	ts	34.077 (-----)	354.500	73.00 s

4.7.3.3 MEJORA 3 Cambiar el valor Proporcional al 70% y mantener el valor Integral al 80%

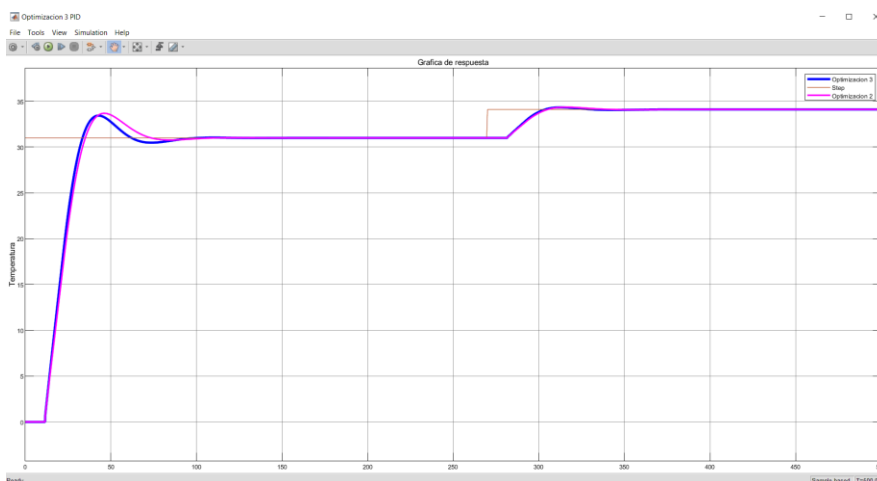
Según la Figura 67.

Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 2 (Magenta) Vs Mejora 3 (Azul), se miden los valores de la gráfica de la planta aplicada la mejora 3 en color azul y de obtienen los valores de la Tabla 25.

Resultados de la Mejora 3 Cambiar el valor Proporcional al 70% y mantener el valor Integral al 80%

Figura 67.

Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 2 (Magenta) Vs Mejora 3 (Azul)



Basados en la Tabla 25, la gráfica del comportamiento de la planta con las condiciones de ajuste 3 (Gráfica en color azul), Evaluando el criterio uno; La ley de control presenta una sobre elongación M_p , de 0.29°C , esta alrededor del 9.35% del valor del estímulo, en comparación de la Mejora 2 (color Magenta) se observa una reducción en el valor de M_p , y se continua cumpliendo el criterio uno, con un M_p menor al 10%; por otra parte; según el criterio número dos, el tiempo de estabilización o asentamiento presente en la gráfica es de 40.5 s, siendo 4.3 veces más que la constante de tiempo del mismo, excediendo el criterio dos; por tanto, por tanto, resulta una ley de control con ventajas en la sobre elongación o sobre estímulo, pero son cumplir el criterio 2, por tal razón, se mantienen los valores PROPORCIONAL E INTEGRAL de la MEJORA 3, y se continua la sintonización, buscando mejorar los demás estos parámetros.

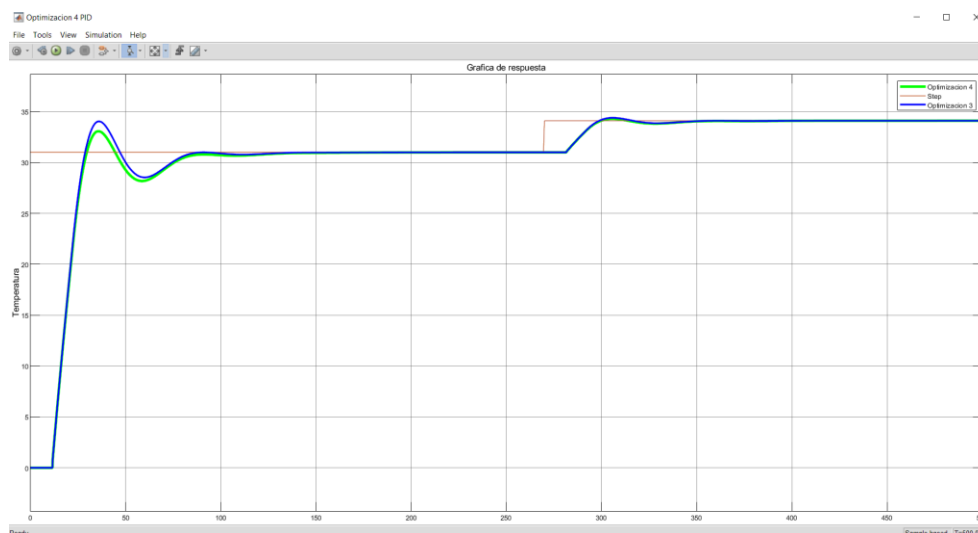
Tabla 25.
 Resultados de la Mejora 3 Cambiar el valor Proporcional al 70% y mantener el valor Integral al 80%

Cambios de la Ley de Control		P=28.705859	I=1.426377	D=7.101016
Característica	Símbolo	Evaluación	Valor Glob	Valor STEP
Tiempo muerto	θ	Inicio de la Dinámica	281.500	11.50 s
Tiempo de retardo (s)	t_d	32.55 $^\circ\text{C}$ (0.5 K)	287.875	6.87 s

Constante de tiempo	$t_{63.28\%}$	32.96 (0.63% K)	290.915	9.41 s
Tiempo de subida (s)	t_r	34.1°C (1 K)	298.667	17.16 s
Tiempo Pico (s)	t_p	35.15 °C	306.000	24.5 s
Sobre elongación (°C)	M_p	Punto máximo	34.39	0.29 °C
Tiempo de asentamiento (s)	t_s	33.94 (34.1+/- 0.05)	322.000	40.50 s

4.7.3.4 Mejora 4 Cambiar valor Integral al 75% y mantener la Proporcional al 70%.

Figura 68.
 Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 3 (Azul) Vs Mejora 4 (Verde)



Según la Figura 68.

Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 3 (Azul) Vs Mejora 4 (Verde), se miden los valores de la gráfica de la planta aplicada la mejora 4 en color verde y de obtienen los valores de la Tabla 26.

Resultados de la Mejora 4 Cambiar el valor Integral al 75% y mantener el valor Proporcional al 70%

Tabla 26.
 Resultados de la Mejora 4 Cambiar el valor Integral al 75% y mantener el valor Proporcional al 70%

Cambios de la Ley de Control	P=28.705859	I=1.24808	D=7.101016
Característica	Símbolo	Evaluación	Valor Glob
			Valor STEP

Tiempo muerto	θ	Inicio de la Dinámica	281.500	11.50 s
Tiempo de retardo (s)	t_d	32.55 °C (0.5 K)	288.850	7.35 s
Constante de tiempo	$t_{63.28\%}$	32.96 (0.63% K)	291.050	9.55 s
Tiempo de subida (s)	t_r	34.1 °C (1 K)	299.690	18.19 s
Tiempo Pico (s)	t_p	35.15 °C	305.500	24.00 s
Sobre elongación (°C)	M_p	Punto máximo	34.293	0.19 °C
Tiempo de asentamiento (s)	t_s	33.94 (34.1 +/- 0.05)	319.150	37.65 s

Basados en la Tabla 26, la gráfica del comportamiento de la planta con las condiciones de ajuste 4 (Gráfica en color verde), Evaluando el criterio uno; La ley de control presenta una sobre elongación M_p , de 0.19 °C, esta alrededor del 6.13% del valor del estímulo, en comparación de la Mejora 3 (color Azul) se observa una reducción en el valor de M_p , y se continua cumpliendo el criterio uno, con un M_p menor al 10%; por otra parte; según el criterio número dos, el tiempo de estabilización o asentamiento presente en la gráfica es de 37.65 s, siendo 3.94 veces más que la constante de tiempo del mismo, cumpliendo el criterio dos; por tanto, se mantienen los valores PROPORCIONAL E INTEGRAL de la MEJORA 5, y se continua la sintonización, variando los valores derivativos, buscando mejorar los demás estos parámetros.

4.7.3.5 Mejora 5 aumento del valor derivativo en 250% y mantener el valor Integral al 75% y el Proporcional al 70%.

Según la Figura 69.

Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 4 (Verde) Vs Mejora 5 (Verde Oscuro), se miden los valores de la gráfica de la planta aplicada la mejora 5 en color verde Oscuro y de obtienen los valores de la Tabla 27.

Resultados de la Mejora 5 aumento del valor derivativo en 50% y mantener el valor Integral al 75% y el Proporcional al 70%.

Figura 69.
Gráfica de respuesta comparativa de la Mejora 4 (Verde) Vs Mejora 5 (Verde Oscuro)

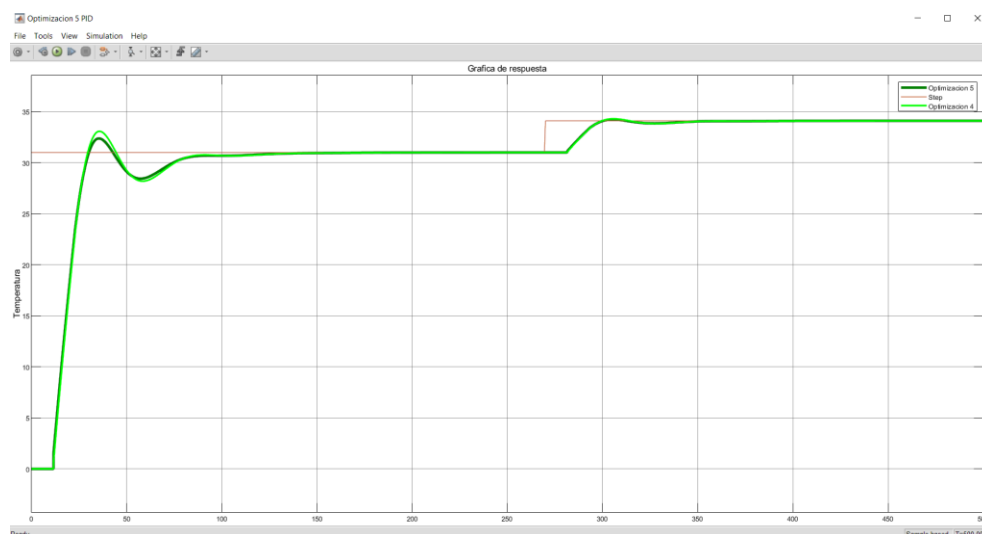


Tabla 27.
Resultados de la Mejora 5 aumento del valor derivativo en 50% y mantener el valor Integral al 75% y el Proporcional al 70%.

Cambios de la Ley de Control		P=28.705859	I=1.24808	D=17.75254
Característica	Símbolo	Evaluación	Valor Glob	Valor STEP
Tiempo muerto	θ	Inicio de la Dinámica	281.500	11.50 s
Tiempo de retardo (s)	td	32.55 °C (0.5 K)	288.585	7.08 s
Constante de tiempo	$t_{63.28\%}$	32.96 (0.63% K)	290.800	9.30 s
Tiempo de subida (s)	tr	34.1 °C (1 K)	300.360	18.86 s
Tiempo Pico (s)	tp	35.15 °C	305.4	23.90 s
Sobre elongación (°C)	Mp	Punto máximo	34.226	0.126 °C
Tiempo de asentamiento (s)	ts	33.94 (34.1+/- 0.05)	318.45	36.95 s

Basados en la Tabla 27, la gráfica del comportamiento de la planta con las condiciones de mejora 5 (Gráfica en color verde oscuro), Evaluando el criterio uno; La ley de control presenta una sobre elongación Mp, de 0.126 °C, esta alrededor del 4.06% del valor del estímulo, en comparación de la Mejora 4 (color Verde) se observa una reducción en el valor de Mp, y se cumple el criterio uno, con un Mp menor al 10%; por otra parte; según el criterio número dos, el tiempo de estabilización o asentamiento presente en la gráfica es de 36.95 s, siendo 3.97 veces más que la constante de tiempo del mismo, cumpliendo el criterio dos; por

tanto, se mantienen los valores PROPORCIONAL E INTEGRAL Y DERIVATIVOS de la MEJORA 5, y se define como un PID la afinado y correctamente sintonizado.

4.7.4 Secuencia de mejora del sintonizador PID

En la Tabla 28.

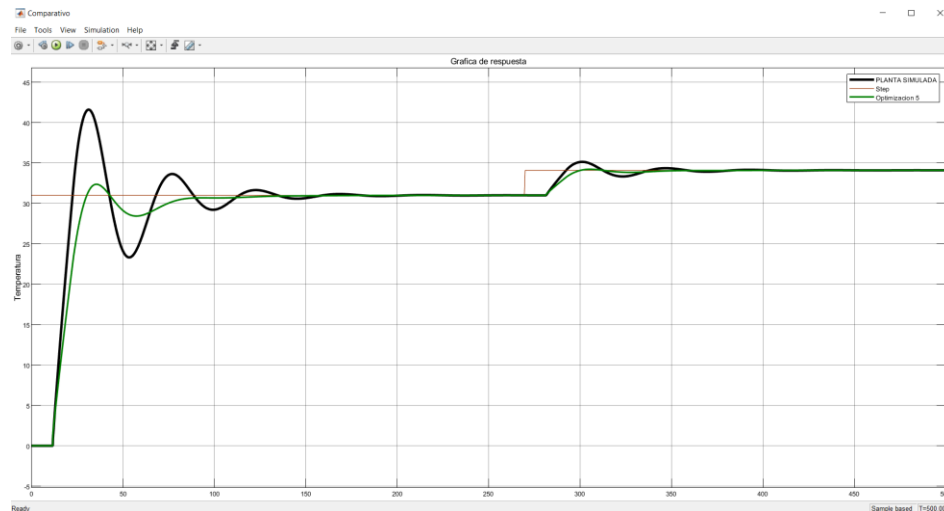
Secuencia de sintonización de la Ley de control PID, Criterios de evaluación y evaluación del proceso de Mejora. Se establecieron tres valoraciones; asignadas bajo supervisión del evaluador experto; basado en los criterios de la sección 4.7.3 Ajuste de la ley de control utilizando métodos heurísticos (tabla ensayo error); valoración inferior (inadecuado), “no obedece a ningún criterio”; Valoración media; (adecuado), “obedece a los dos criterios” y valoración alta (Mejorado) “es un criterio adecuado con mejores característica descriptivas”

Tabla 28.

Secuencia de sintonización de la Ley de control PID, Criterios de evaluación y evaluación del proceso de Mejora.

Método de ajuste y sintonización del PID por tabla ensayo error TEE.							
IT	Cambio	P	I	D	% Mp	ts/t _{63.28%}	Evaluación
In	Planta calculada	41.00837	1.782972	7.101016	33.87%	4.9	Inadecuado
1	Reducción 50% P	20.50418	1.782972	7.101016	22.58%	6.5	Inadecuado
2	Reducir al 80% I, Mantener Reducción 50% P	20.50418	1.426377	7.101016	8.26%	5.96	Inadecuado
3	Cambiar al 70% P, Mantener Reducción al 80% I,.	28.70585	1.426377	7.101016	9.35%	4.3	Inadecuado
4	Cambiar al 75% I, Mantener Reducción 50% P	28.70585	1.24808	7.101016	6.13%	3.94	Adecuado
5	Aumentar 250% D, Mantener reducción 75% I, Mantener Cambio al 70% P.	28.70585	1.24808	17.75254	4.06%	3.97	Mejorado

Figura 70.
Gráfica de respuesta comparativa de la Planta inicial (Negro) Vs Mejora 5 (Verde Oscuro)



4.7.5 Evaluación de la planta y la ley de control mejorada contra ruidos, perturbaciones y fallos

Los controladores PID; "...se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas." (SMITH & CORRIPIO, 2012); Como en procesos de temperatura; todos los procesos "...están sujetos a algunos tipos de señales exógenas..." (Kuo, 1996) a presentar distorsiones en su configuración, basados en la aparición de perturbaciones, ruidos y fallos; "...son otro tipo de entradas que afectan de una manera no deseada, o no prevista al funcionamiento del sistema..." (Ortiz Moctezuma, 2015).

4.7.5.1 Evaluación de la planta contra ruidos.

El ruido es considerado como un agente externo, que afecta la entrada del PID, tal como se observa en la Figura 71.

Diagrama de evaluación del sistema de control contra ruidos. Según se recomienda (SMITH & CORRIPIO, 2012) el margen de ruido esta, desde $0.05 < \text{Señal de ruido} < 0.1$ del set point; por

tal razón se programa en el bloque de SIMULINK Band-Limited White Noise; un valor de Noise power: 0.31; que corresponde al 10% del setpoint.

Figura 71.
 Diagrama de evaluación del sistema de control contra ruidos.

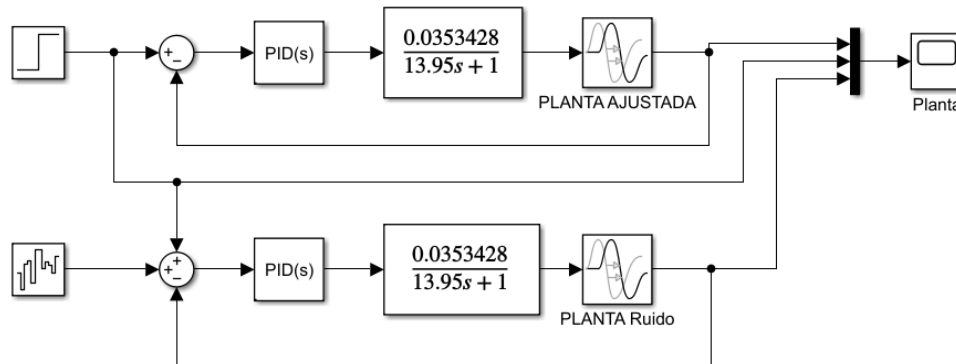
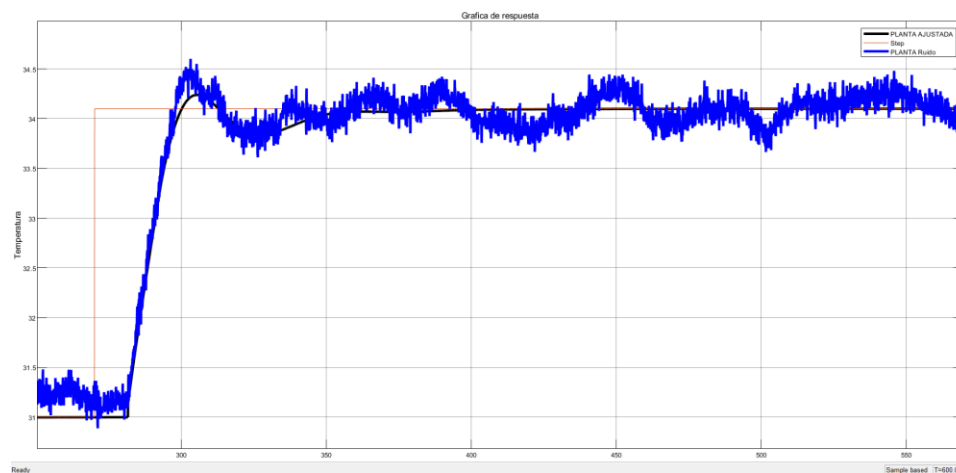


Figura 72.
 Gráfica de respuesta de la simulación con la evaluación contra ruidos.



Del esquema de simulación, se obtiene la Figura 72.

Gráfica de respuesta de la simulación con la evaluación contra ruidos. Donde se puede observar la afectación del ruido en el sistema de control, sin embargo, el controlador tiene la capacidad de estabilizar el sistema después de la aplicación del STEP, bajo condiciones presentes de ruido.

4.7.5.2 Evaluación de la planta contra Perturbaciones.

Las perturbaciones son otros de los efectos a los que está expuesto los procesos con control retroalimentado; en la presente evaluación, se plantea una perturbación tal como se observa en la Figura 73.

Diagrama de evaluación del sistema contra perturbaciones. Esta perturbación tiene un valor máximo de 0.31 equivalente al 10% del SetPoint; adicionalmente; se aplica a un valor de cinco veces el tiempo de estabilización de la planta; en la programación de los STEP el de subida se ejecuta a los 400 ciclos del inicio de la simulación; y el segundo STEP el de bajada, se activa a los cuatro veces el tiempo de estabilización, del primer STEP o 455.6; tal como se observa en la Figura 74.

Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra Perturbaciones. El controlador ajustado y sintonizado, presenta un manejo de la perturbación, excelente, siendo robusto a este tipo de alteraciones.

Figura 73.
 Diagrama de evaluación del sistema contra perturbaciones

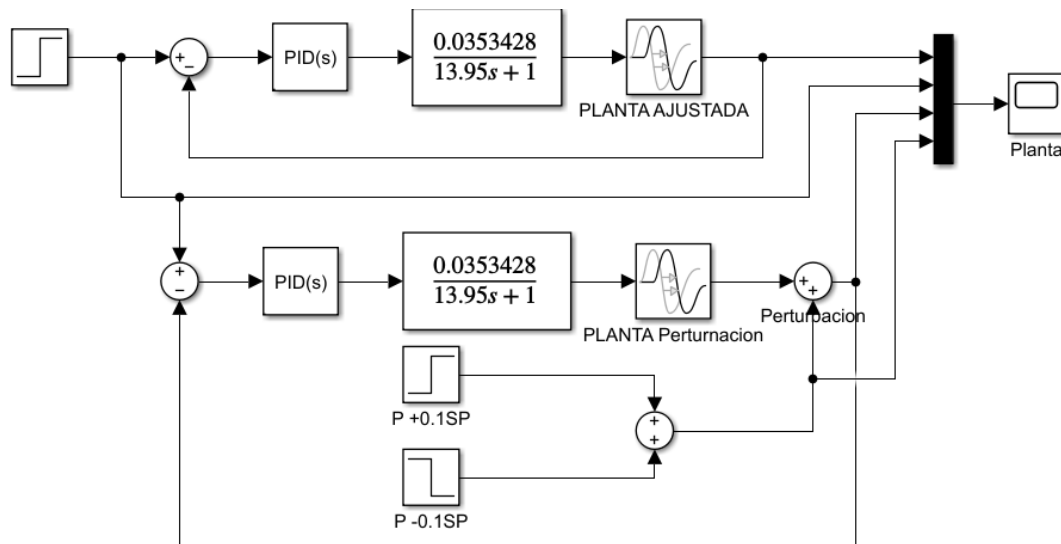
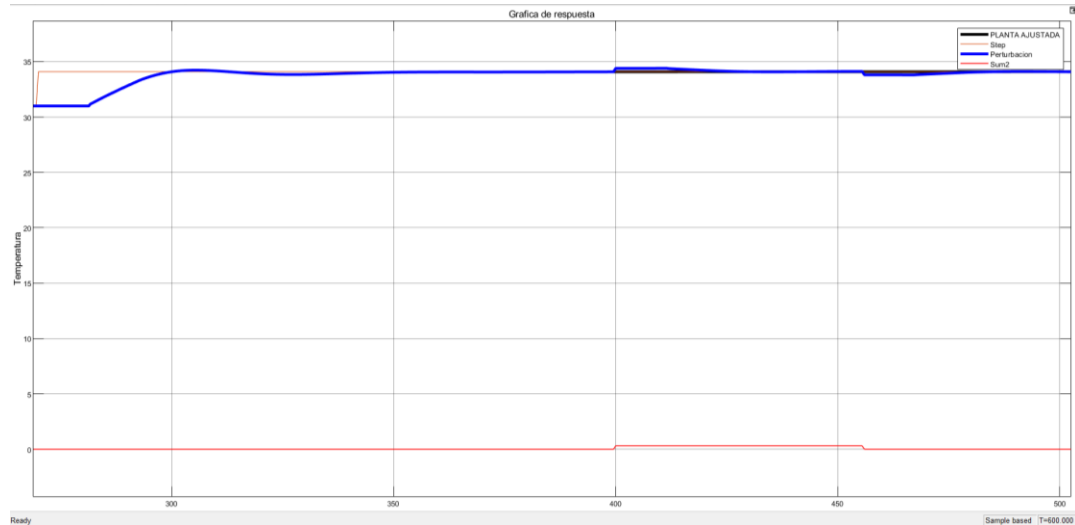


Figura 74.
 Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra Perturbaciones.



4.7.5.3 Evaluación de la planta contra Fallos.

Los fallos, son cambios no deseados de la planta identificada, estos cambios también deben ser atendidos parcialmente por el controlador, dejando un margen de deterioro para que el proceso trabaje de forma satisfactoria. Los fallos de la planta se presentan de tres formas; fallo en la ganancia K ; fallo en el tiempo de estabilización τ_0 ; y el tiempo muerto θ , cada uno de estos fallos debe ser asumido por la acción del controlador hasta presentar un 10% de diferencia con su funcionamiento normal.

En la Figura 75.

Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en la Ganancia K ., se observa los dos fallos simulados de la ganancia; uno con un 10% mayor a la ganancia y el segundo con un 10% mejor en la ganancia normal;

Basados en los esquemas de las Figura 75, se obtienen las Gráficas de respuesta

Figura 76.

Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en la ganancia de la planta; en color azul se observa el diagrama del fallo con un valor 1.1 veces la ganancia; en color rojo se observa el diagrama del fallo con un valor 0.9 la ganancia, el controlador, asume claramente el fallo de la ganancia entre el margen de $0.9 < K < 1.1$, estabilizando el proceso.

Figura 75.

Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en la Ganancia K .

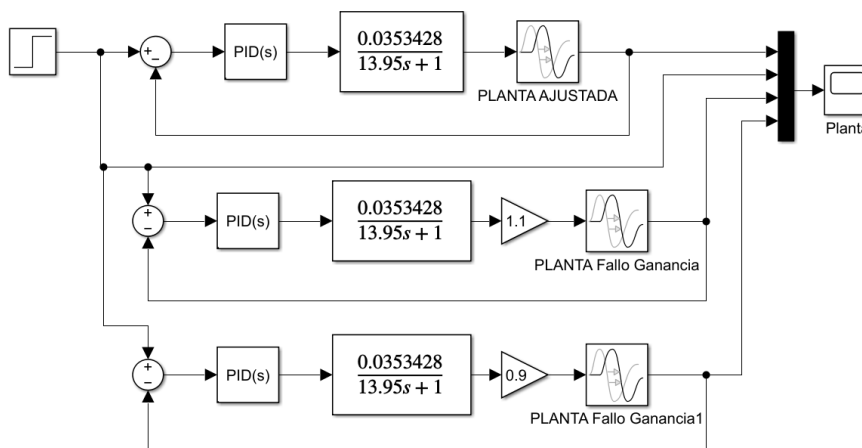
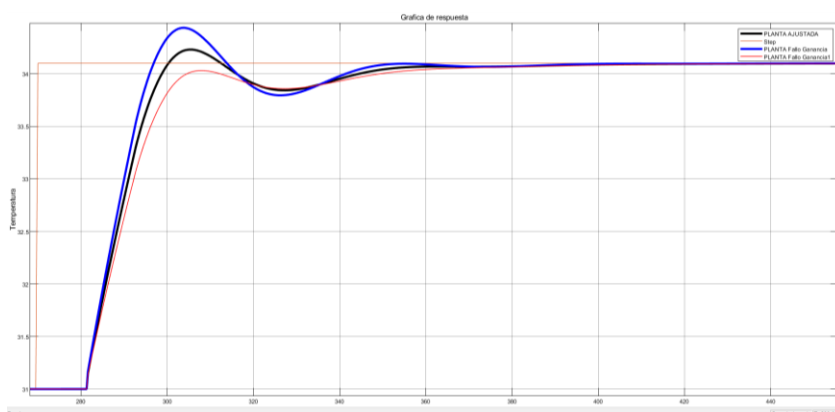


Figura 76.

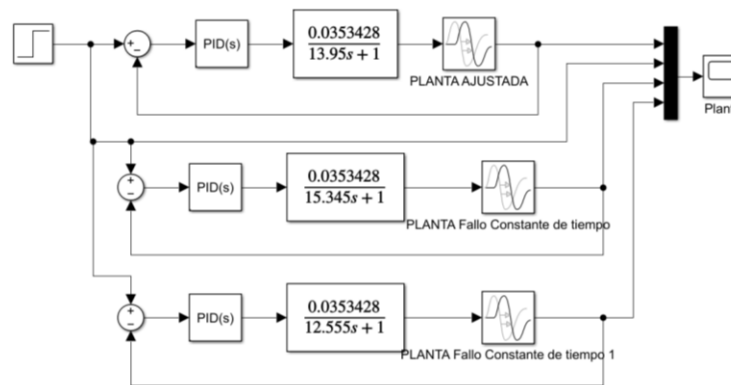
Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en la ganancia de la planta



El segundo fallo a evaluar el sistema de control es la variación en la constante de tiempo; de acuerdo con la Figura 77.

Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en la constante de tiempo. En el diagrama se observa que se tienen dos variaciones; una alterando 1.1 veces la constante de tiempo; y otra con el 0.9 veces la constante de tiempo.

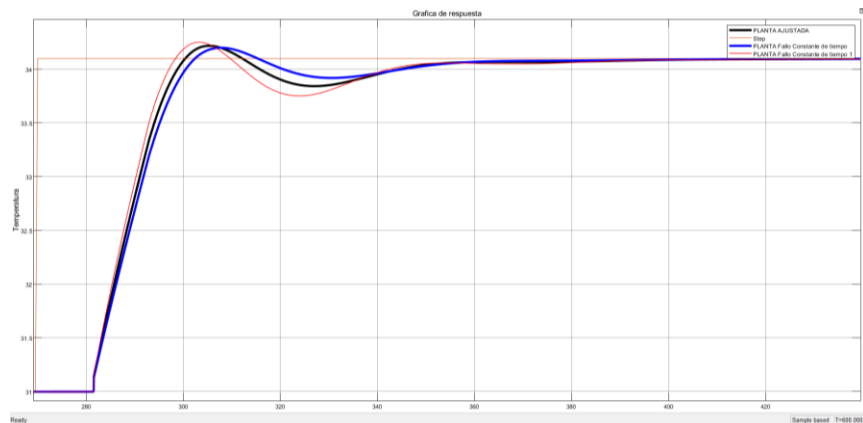
Figura 77.
 Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en la constante de tiempo.



Según la simulación de la falla de variación en la constante de tiempo; se obtienen la siguiente Gráfica Figura 78.

Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en la constante de tiempo. En la gráfica se observa que el controlador logra la estabilización del sistema incluyendo los fallos en la constante de tiempo.

Figura 78.
 Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en la constante de tiempo.



La tercera forma de fallo describe el cambio no previsto del tiempo muerto, este cambio también se alteró con un 10% del valor del tiempo muerto, tanto superior o inferior al valor normal; tal como se observa en la Figura 79.

Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en el tiempo muerto; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Según la Figura 80.

Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en el tiempo muerto, el comportamiento de la planta por acción del controlador en los dos casos de presentarse la falla por variación del tiempo muerto es la estabilización; dando como resultado un diseño robusto del controlador PID.

Figura 79.
Diagrama de evaluación del sistema contra fallos en el tiempo muerto

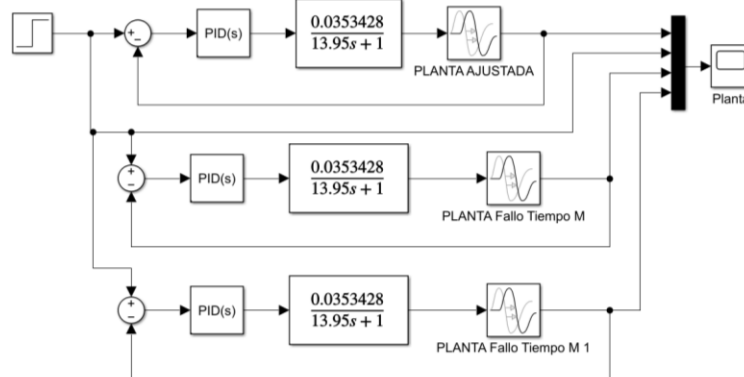
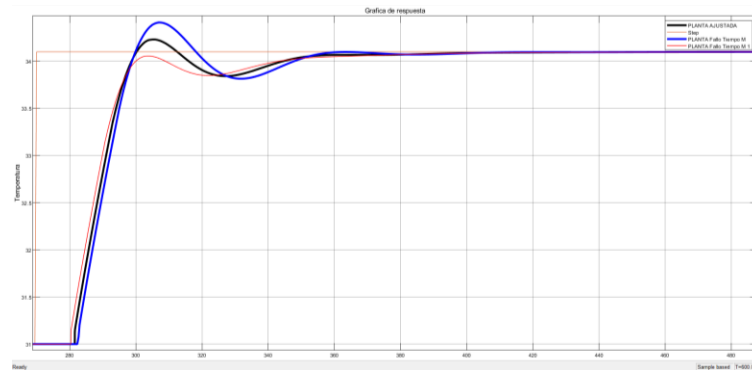


Figura 80.
 Gráfica de respuesta de la evaluación del sistema de la planta contra fallos en el tiempo muerto



4.8 Análisis comparativo de detección entre modelos calculados de la planta

4.8.1 Detección de fallo 1, obstrucción o atascamiento; fallo de un tubo en el intercambiador de calor

4.8.1.1 Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de un tubo en el intercambiador de calor. (PM1F)

Basado en el desarrollo expuesto en la sección Realización y registro del experimento 2. obstrucción y taponamiento de cinco tubos del Intercambiador de calor; y al realizar la modificación presente en la parte “a” de la Figura 57.

Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) un tubo, (b) dos tubos. Se obtuvo la data recolectada en la Prueba 24 09 06 2022; consignada en el Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). Columna 6 Prueba 24 09 06 2022 Fallo Planta 1 Tubo; Obstrucción y Atascamiento de un tubo (rango utilizado para el modelo); se construye la Figura 81.

Gráficas de respuesta de temperatura T4 y Porcentaje de la bomba de la PRUEBA 23 09 06 2022 Estado de fallo con un tubo obstruido.. La Gráfica muestra en color azul, los datos recolectados de temperatura T4, en el eje vertical a la izquierda, se observan los valores de temperatura y en el eje vertical a la derecha, se observan los valores de porcentaje de funcionamiento del variador; la gráfica de funcionamiento del variador se ve en color morado; en la línea horizontal se observan los valores de ciclos capturados durante el experimento.

Basados en los datos de la Figura 81, se establecen los valores de los puntos inicial y final del ciclo consignados en la Tabla 29

Figura 81.

Gráficas de respuesta de temperatura T4 y Porcentaje de la bomba de la PRUEBA 23 09 06 2022 Estado de fallo con un tubo obstruido.

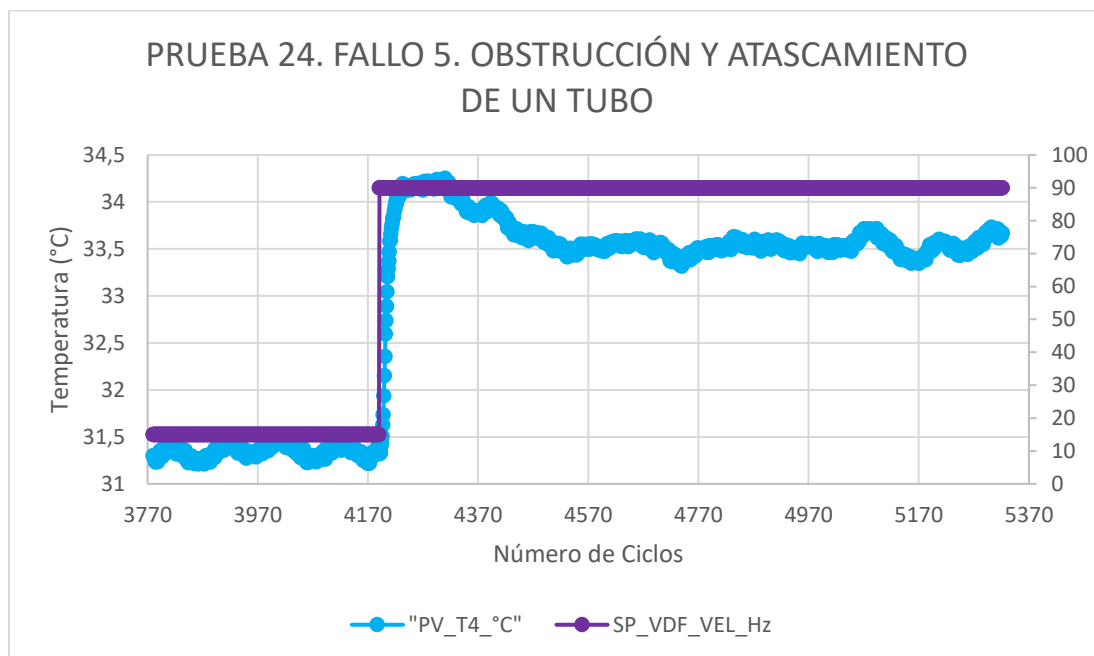


Tabla 29.

Valores Iniciales para la construcción del modelo matemático del funcionamiento de la planta con un tubo tapado

	Temperatura (C°)	Ciclos	Tiempo (s) 1.5(S)	STEP
Inicio	31.346	4190	6285	15
Final	33.532	4740	7110	90

Se aplica la Ecuación 2.

Cambio de temperatura.

Ecuación 52.

Cambio de temperatura modelo de planta funcionamiento con un tubo obstruido

$$\Delta \text{Temperatura} = T^{\circ}_{\text{Final}} - T^{\circ}_{\text{Inicial}} = 33.532 - 31.346 = 2.187$$

Se calculan los parámetros iniciales de temperatura; $T^{\circ}_{63.2\%}$ y $T^{\circ}_{28.3\%}$ aplicando la

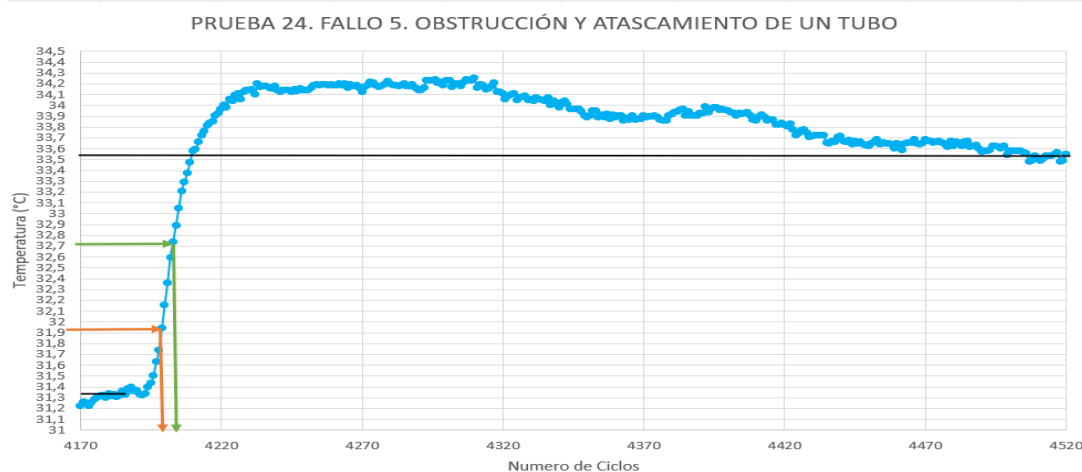
Ecuación 3.

Parámetros del 63.2% y el 28.3%,

$$T^{\circ}_{63.2\%} = T^{\circ}_{\text{Inicial}} + 0.632 * \Delta T_{em} = 31.346 + 0.632 * 2.187 = 32.728$$

$$T^{\circ}_{28.3\%} = T^{\circ}_{Inicial} + 0.283 * \Delta Tem = 31.346 + 0.283 * 2.187 = 31.965$$

Figura 82.
 Sección dinámica Ampliada de la Prueba 24 09 06 2022



Continuando con el desarrollo se calculan las temperaturas; $T^{\circ}_{63.2\%}$ y $T^{\circ}_{28.3\%}$ y se proyectan sobre la Gráfica de respuesta identificando los valores de eje de las abscisas, los datos leídos están en Números de ciclos presentes en la Tabla 29.

Valores Iniciales para la construcción del modelo matemático del funcionamiento de la planta con un tubo tapado.

Tabla 30.
 Tiempo para alcanzar el 63.2% y 28.2% de la curva dinámica del modelo de la planta en estado de fallo con un tubo obstruido

	Temperatura (C°)	Ciclos	Tiempo (s) 1.5 /ciclo	STEP
Inicio	31.346	190	0 s	15
$T^{\circ}_{28.3\%}$	31.965	199	13.5 s	-----
$T^{\circ}_{63.2\%}$	32.728	202.9	19.35 s	-----
Final	33.532	740	825 s	90

Basados en las Ecuación 4.

Tiempo de estabilización. Ecuación 5.

Tiempo Muerto. Ecuación 6.

Ganancia del sistema. De la sección 3.7.2 Modelo matemático para la identificación de la planta (método de los dos puntos).

Se calculan los parámetros característicos del modelo matemático de identificación de la planta en estado normal.

Tabla 31.
Parámetros característicos del modelo de la planta en estado de fallo con un tubo obstruido

Parámetro	Formula	Ecuación	Valor
T (Tiempo de estabilización)	$\tau = 1.5(t_{63.2\%} - t_{28.2\%})$	$\tau = 1.5(19.35 - 13.5)$	8.775 s
Θ (Tiempo Muerto)	$\theta = t_{63.2\%} - \tau$	$\theta = 19.35 - 8.775$	10.575 s
K (Ganancia)	$K = (\Delta_{Salida})/(\Delta_{Entrada})$	$K = (33.378 - 30.905)/(90 - 15)$	0.02915442

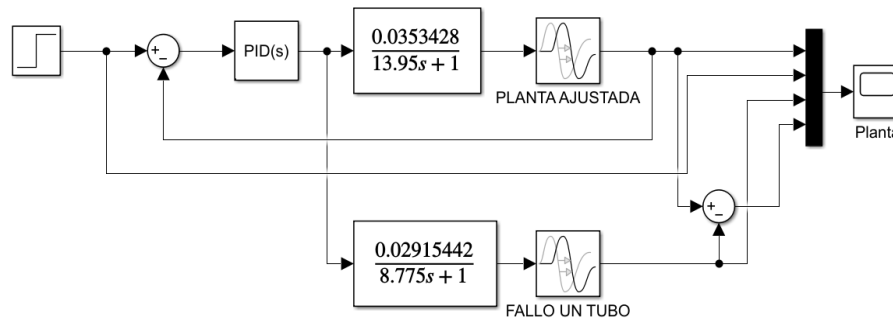
Basado en los valores de la Tabla 31, El Tiempo de estabilización, el tiempo muerto y la ganancia, se representa el comportamiento del modelo de la planta identificado en el experimento PRUEBA 24 09 06 2022, y utilizando funciones de transferencia se plantea la Ecuación 53

Ecuación 53.
Modelo matemático de la planta en estado de fallo con un tubo obstruido, expresado en funciones de transferencia

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \left(\frac{0.02915442}{8.7755s + 1} \right) e^{-10.575s}$$

4.8.1.2 Esquema de detección de fallo por obstrucción o atascamiento de un tubo en el intercambiador de calor.

Figura 83.
Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de un tubo del intercambiador de calor



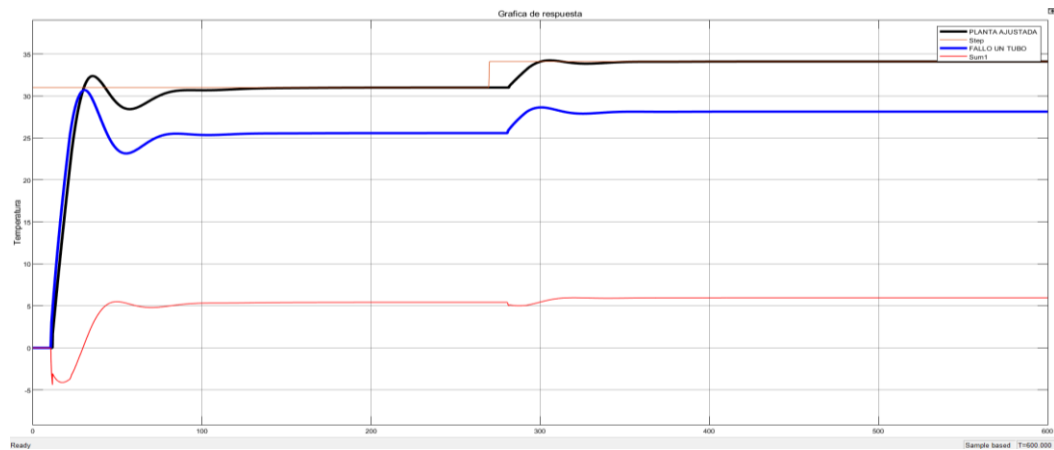
En la Figura 83, se observa en la parte superior, el diagrama de bloques de la planta ajustada, y en la parte inferior el modelo identificado de la planta con la obstrucción de un tubo; en el multiplexor, se incorporan cuatro entradas; en el siguiente orden de la superior a la inferior; entrada 1. Comportamiento de la planta con el controlador ajustado; Entrada 2. Registro del STEP, Entrada 3. Comportamiento de la planta con la falla de obstrucción de un tubo del intercambiador de calor, Entrada 4. Residual comparativo entre las dos plantas.

La Figura 84.

Gráfica de respuesta del proceso de detección de fallo de una obstrucción de un tubo en el intercambiador de calor., presenta en color negro la gráfica de respuesta de la planta con el funcionamiento normal; la línea color café, muestra el comportamiento del STEP para excitar la dinámica del funcionamiento de la planta; la gráfica en color azul, muestra el comportamiento de la planta con el fallo de obstrucción de un tubo en el intercambiador de calor y finalmente la gráfica en color rojo, muestra el comportamiento del residual de detección.

Figura 84.

Gráfica de respuesta del proceso de detección de fallo de una obstrucción de un tubo en el intercambiador de calor.



4.8.2 Detección de fallo 1, obstrucción o atascamiento; fallo de dos tubos en el intercambiador de calor, entre modelos

4.8.2.1 Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de dos tubos en el intercambiador de calor. (PM2F)

El procedimiento explicado en la sección 4.8.1.1, en el cual se presentó la secuencia para determinar el modelo de la planta con fallo de obstrucción de un tubo dentro del intercambiador de calor; de manera análoga, el procedimiento se aplica, con el desarrollo expuesto en la sección 4.6.1.2, y con las modificaciones hechas a la planta en las Figura 57. Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) un tubo, (b) dos tubos., PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO PLANTA 2TUBOS; consignados en los anexos; Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). Columna 5 PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO PLANTA 2TUBOS. Se presentan los valores de los parámetros característicos del modelo de la planta en estado de fallo con; DOS tubos obstruidos.

Tabla 32.

Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de dos tubos

	Fallo 4.
Número de tubos fallados	2
Tao (Constante de tiempo)	20.475 s
Θ (Tiempo Muerto)	5.775 s
K (Ganancia)	0.0300011

Basado en los valores de la Tabla 32, El Tiempo de estabilización, el tiempo muerto y la ganancia, se representa el comportamiento del modelo de la planta identificado en el experimento; PRUEBA 23 09 06 2022, y utilizando funciones de transferencia se plantea;

Ecuación 54.

Modelo matemático de la planta en estado de fallo con dos tubos obstruidos

$$\frac{Y_{2T}(s)}{X(s)} = \left(\frac{0.0300011}{20.475 s + 1} \right) e^{-5.775 s}$$

4.8.2.2 Esquema de detección de fallos por obstrucción o atascamiento de dos, tubos en el intercambiador de calor.

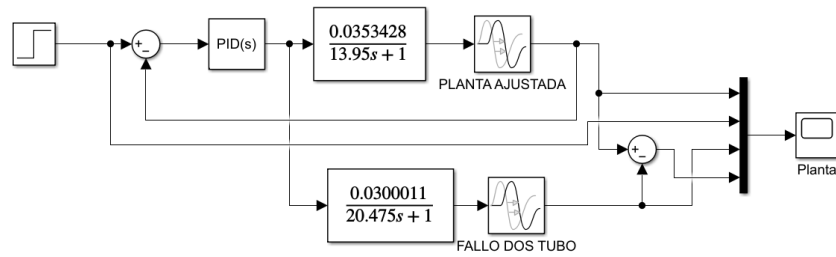
Basados en la sección Modelo matemático para la detección de la planta basado en ecuaciones de paridad con función de transferencia. Se plantea el esquema de la Figura 28. Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos., donde se compara el modelo original de la planta (Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) con los modelos de la planta con dos, fallos obstruidos (Ecuación 54.

Modelo matemático de la planta en estado de fallo con dos tubos obstruidos) el esquema organizado en el software de SIMULINK, se muestra a continuación:

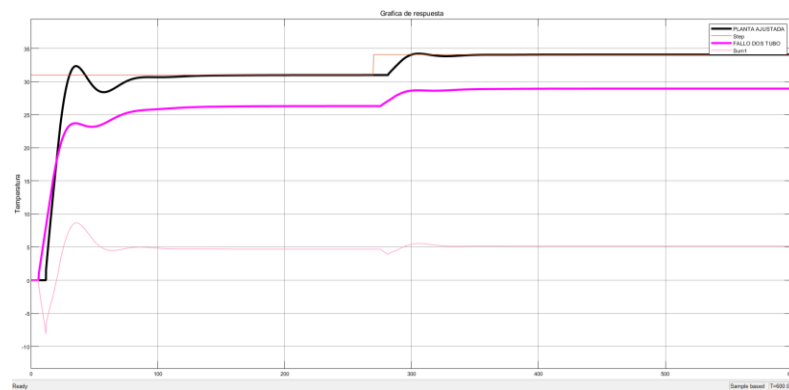
Figura 85.

Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de dos, tubos del intercambiador de calor



En la Figura 85, se observa en la parte superior, el diagrama de bloques de la planta ajustada, y en la parte inferior el modelo identificado de la planta con la obstrucción de dos tubos; en el multiplexor, se incorporan cuatro entradas; en el siguiente orden de la superior a la inferior; entrada 1. Comportamiento de la planta con el controlador ajustado; Entrada 2. Registro del STEP, Entrada 3. Comportamiento de la planta con la falla de obstrucción de dos tubos del intercambiador de calor, Entrada 4. Residual comparativo entre las dos plantas, (Figura 86).

Figura 86.
 Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de dos, tubos obstruidos en el Intercambiador de calor.



4.8.3 Detección de fallo 1, obstrucción o atascamiento; fallo de tres tubos en el intercambiador de calor, entre modelos

4.8.3.1 Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de tres tubos en el intercambiador de calor. (PM3F)

El procedimiento explicado en la sección 4.8.1.1, en el cual se presentó la secuencia para determinar el modelo de la planta con fallo de obstrucción de un tubo dentro del intercambiador de calor; de manera análoga, el procedimiento se aplica, con el desarrollo expuesto en la sección 4.6.1.2, y con las modificaciones hechas a la planta en las Figura 58. Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) tres tubos, (b) cuatro tubos, se obtuvieron las datas recolectadas en las pruebas; PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO PLANTA 3TUBO; consignados en los anexos; Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). Columna 4 PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO PLANTA 3TUBO (rango utilizado para el modelo); Se presentan los valores de los parámetros característicos del modelo de la planta en estado de fallo con; TRES tubos obstruidos.

Tabla 33.
Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de tres tubos

	Fallo 3.
Número de tubos fallados	3
T_{ao} (Constante de tiempo)	11.70 s
Θ (Tiempo Muerto)	7.350 s
K (Ganancia)	0.0329706

Basado en los valores de la Tabla 33.

Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de tres tubos, El Tiempo de estabilización, el tiempo muerto y la ganancia, se representa el comportamiento del modelo de la planta identificado en el experimento; PRUEBA 22 08 06 2022, y utilizando funciones de transferencia se plantea;

Ecuación 55.

Modelo matemático de la planta en estado de fallo con tres tubos obstruidos.

$$\frac{Y_{3T}(s)}{X(s)} = \left(\frac{0.0329706}{11.70s + 1} \right) e^{-7.350s}$$

4.8.3.2 Esquema de detección de fallos por obstrucción o atascamiento de tres, tubos en el intercambiador de calor.

Basados en la sección Modelo matemático para la detección de la planta basado en ecuaciones de paridad con función de transferencia. Se plantea el esquema de la Figura 28.

Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos., donde se compara el modelo original de la planta (Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia.) con los modelos de la planta con uno, dos, tres, cuatro y cinco fallos obstruidos (Ecuación 55.

Modelo matemático de la planta en estado de fallo con tres tubos obstruidos.) el esquema organizado en el software de SIMULINK, se muestra a continuación:

Figura 87.

Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de tres, tubos del intercambiador de calor

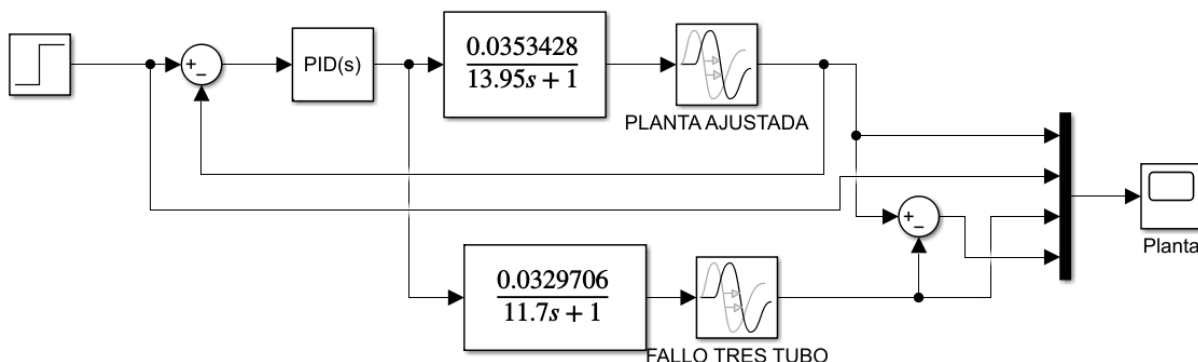
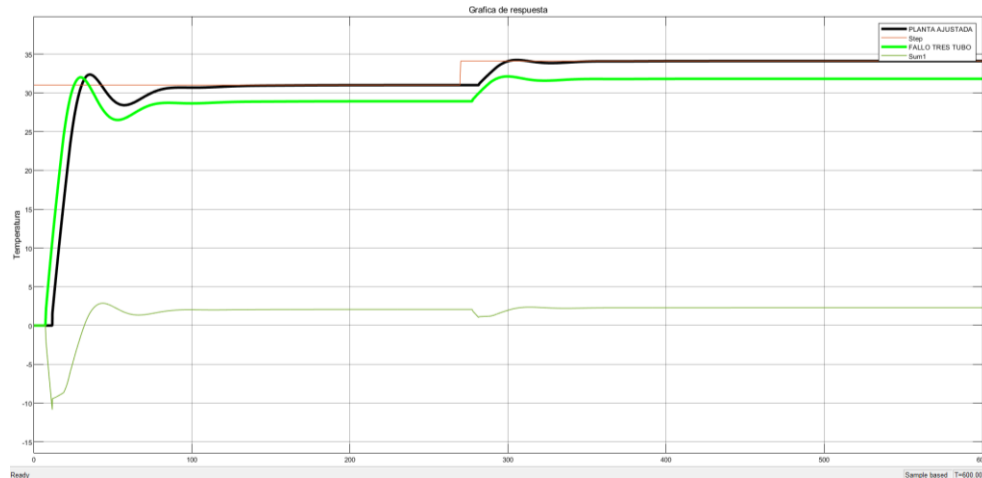


Figura 88.
 Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de tres tubos obstruidos en el Intercambiador de calor



En la Figura 87, se observa en la parte superior, el diagrama de bloques de la planta ajustada, y en la parte inferior el modelo identificado de la planta con la obstrucción de dos tubos; en el multiplexor, se incorporan cuatro entradas; en el siguiente orden de la superior a la inferior; entrada 1. Comportamiento de la planta con el controlador ajustado; Entrada 2. Registro del STEP, Entrada 3. Comportamiento de la planta con la falla de obstrucción de tres tubos del intercambiador de calor, Entrada 4. Residual comparativo entre las dos plantas, (Figura 88).

4.8.4 Detección de fallo 1, obstrucción o atascamiento; fallo de cuatro tubos en el intercambiador de calor.

4.8.4.1 Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de cuatro tubos en el intercambiador de calor. (PM4F)

El procedimiento explicado en la sección 4.8.1.1, en el cual se presentó la secuencia para determinar el modelo de la planta con fallo de obstrucción de un tubo dentro del

intercambiador de calor; de manera análoga, el procedimiento se aplica, con el desarrollo expuesto en la sección 4.6.1.2, y con las modificaciones hechas a la planta en las, Figura 58. Fallo de obstrucción y atascamiento de (a) tres tubos, (b) cuatro tubos, se obtuvieron las datas recolectadas en las pruebas; PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO PLANTA 4Tubos; consignados en los Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). Columna 3 PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO PLANTA 4Tubos (rango utilizado para el modelo); Se presentan los valores de los parámetros característicos del modelo de la planta en estado de fallo con; CUATRO, tubos obstruidos.

Basado en los valores de la Tabla 34.

Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de cuatro tubos, El Tiempo de estabilización, el tiempo muerto y la ganancia, se representa el comportamiento del modelo de la planta identificado en el experimento; PRUEBA 21 02 06 2022, y utilizando funciones de transferencia se plantea la Ecuación 56

Tabla 34.

Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de cuatro tubos

	Fallo 1.
Número de tubos fallados	4
T_{ao} (Constante de tiempo)	8.325 s
Θ (Tiempo Muerto)	10.725 s
K (Ganancia)	0.0296197

Ecuación 56.

Modelo matemático de la planta en estado de fallo con cuatro tubos obstruidos.

$$\frac{Y_{4T}(s)}{X(s)} = \left(\frac{0.0296197}{8.325 s + 1} \right) e^{-10.725 s}$$

4.8.4.2 Esquema de detección de fallos por obstrucción o atascamiento de cuatro tubos en el intercambiador de calor.

Basados en la sección Modelo matemático para la detección de la planta basado en ecuaciones de paridad con función de transferencia. Se plantea el esquema de la Figura 28.

Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos., donde se compara el modelo original de la planta (Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia.) con los modelos de la planta con uno, dos, tres, cuatro y cinco fallos obstruidos (Ecuación 56.

Modelo matemático de la planta en estado de fallo con cuatro tubos obstruidos.) el esquema organizado en el software de SIMULINK, se muestra Figura 89.

Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de cuatro tubos del intercambiador de calor:

En la Figura 89, se observa en la parte superior, el diagrama de bloques de la planta ajustada, y en la parte inferior el modelo identificado de la planta con la obstrucción de dos tubos; en el multiplexor, se incorporan cuatro entradas; en el siguiente orden de la superior a la inferior; entrada 1. Comportamiento de la planta con el controlador ajustado; Entrada 2. Registro del STEP, Entrada 3. Comportamiento de la planta con la falla de obstrucción de cuatro tubos del intercambiador de calor, Entrada 4. Residual comparativo entre las dos plantas, (Figura 90).

Figura 89.

Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de cuatro tubos del intercambiador de calor

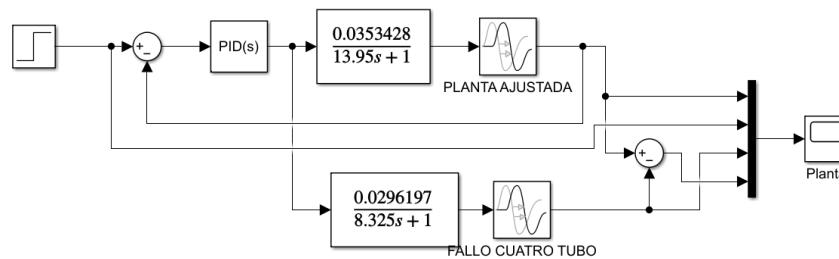
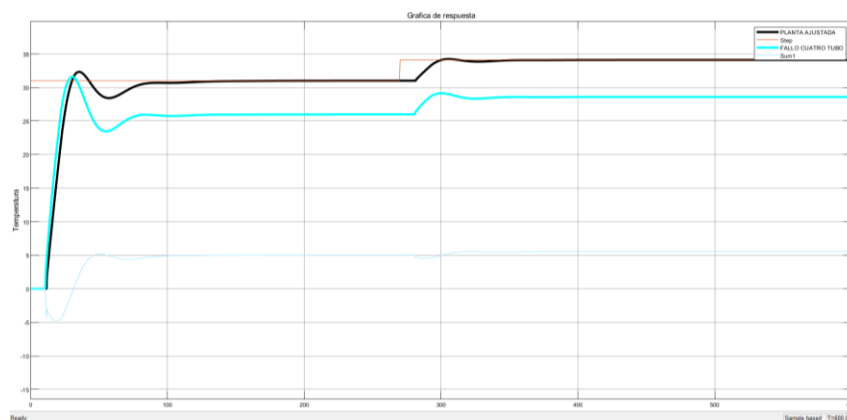


Figura 90.
 Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de cuatro tubos obstruidos en el Intercambiador de calor



4.8.5 detección de fallo 1, obstrucción o atascamiento; fallo de cinco tubos en el intercambiador de calor.

4.8.5.1 Modelo del fallo por obstrucción o atascamiento de cinco tubos en el intercambiador de calor. (PM5F)

El procedimiento explicado en la sección 4.8.1.1, en el cual se presentó la secuencia para determinar el modelo de la planta con fallo de obstrucción de un tubo dentro del intercambiador de calor; de manera análoga, el procedimiento se aplica, con el desarrollo expuesto en la sección 4.6.1.2, y con las modificaciones hechas a la planta en la Figura 59. Fallo de obstrucción y atascamiento de cinco tubos., se obtuvieron las datas recolectadas en las pruebas; PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO PLANTA 5Tubos; consignados en los Anexo U.

Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). Columna 2 Prueba 20 18 05 2022 Fallo 1 Obstrucción y Atascamiento de cinco tubos (rango utilizado para el modelo); Se presentan los valores de los parámetros característicos del modelo de la planta en estado de fallo con; cinco tubos obstruidos. (Tabla 35)

Tabla 35.
Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de cinco tubos

	Fallo 1.
Número de tubos fallados	5
T_{a0} (Constante de tiempo)	9.0 s
Θ (Tiempo Muerto)	9.0 s
K (Ganancia)	0.0286533

Basado en los valores de la Tabla 35.

Parámetros de los modelos de la planta con obstrucción de cinco tubos, El Tiempo de estabilización, el tiempo muerto y la ganancia, se representa el comportamiento del modelo de la planta identificado en el experimento; PRUEBA 20 18 05 2022, y utilizando funciones de transferencia se plantea:

Ecuación 57.
Modelo matemático de la planta en estado de fallo con cinco tubos obstruidos.

$$\frac{Y_{5T}(s)}{X(s)} = \left(\frac{0.0286533}{9s + 1} \right) e^{-9s}$$

4.8.5.2 Esquema de detección de fallos por obstrucción o atascamiento de cinco tubos en el intercambiador de calor.

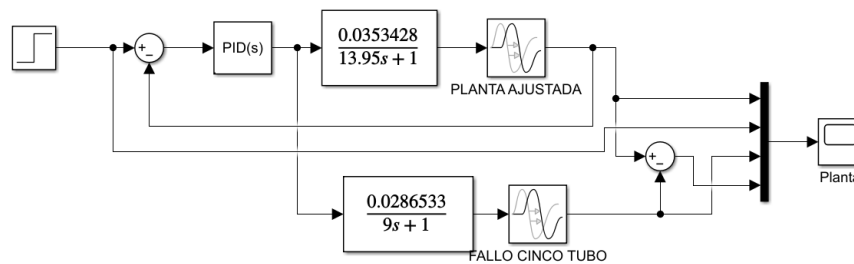
Basados en la sección Modelo matemático para la detección de la planta basado en ecuaciones de paridad con función de transferencia. Se plantea el esquema de la Figura 28. Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos., donde se compara el

modelo original de la planta (Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia.) con los modelos de la planta con cinco fallos obstruidos (Ecuación 57.

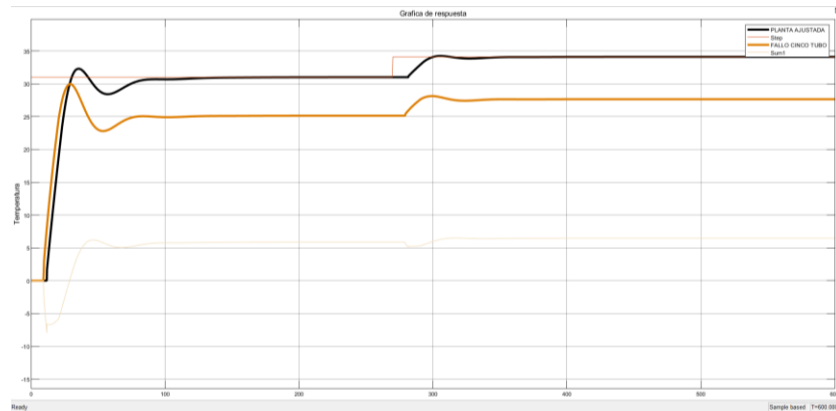
Modelo matemático de la planta en estado de fallo con cinco tubos obstruidos.) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el esquema organizado en el software de SIMULINK, se muestra a continuación:

Figura 91.
Esquema residual de detección del fallo de una obstrucción de cinco tubos del intercambiador de calor



En la Figura 91, se observa en la parte superior, el diagrama de bloques de la planta ajustada, y en la parte inferior el modelo identificado de la planta con la obstrucción de dos tubos; en el multiplexor, se incorporan cuatro entradas; en el siguiente orden de la superior a la inferior; entrada 1. Comportamiento de la planta con el controlador ajustado; Entrada 2. Registro del STEP, Entrada 3. Comportamiento de la planta con la falla de obstrucción de cinco tubos del intercambiador de calor, Entrada 4. Residual comparativo entre las dos plantas, (Figura 92).

Figura 92.
Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de cinco tubos obstruidos en el Intercambiador de calor



4.8.6 Detección de fallo 2; lectura anormal del instrumento, sensor RTD pt100, en el intercambiador de calor.

4.8.6.1 Modelo del fallo 2; lectura anormal del instrumento, sensor RTD PT100, en el intercambiador de calor. (PMFS)

En la sección 0, se definió el experimento 3: Lectura anormal del sensor/transmisor RTD PT 100 código TT202, y basados en el procedimiento explicado en la sección 4.8.1.1, en el cual se presentó la secuencia para determinar el modelo de la planta con fallo de obstrucción de un tubo dentro del intercambiador de calor; de manera análoga, el procedimiento se aplica, a la descripción de la sección 4.6.1.3, Realización del experimento 3 Lectura anormal del instrumento, sensor TT202 tipo Termorresistencia RTD PT100, y con las modificaciones hechas a la planta en la Figura 60.

Alteración de la física del sensor para provocar la lectura anormal del instrumento., se obtuvieron las datas recolectadas en las pruebas; PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK, consignados en el Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16). Columna 7 PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK (rango utilizado para el modelo), Se presentan los valores de los Parámetro del fallo Lectura anormal del instrumento.

Tabla 36.
Parámetro del fallo Lectura anormal del instrumento

	Fallo 2.
Tao (Tiempo de estabilización)	9 s
Θ (Tiempo Muerto)	10.5 s
K (Ganancia)	0.0278171

Basado en los valores de la Tabla 36.

Parámetro del fallo Lectura anormal del instrumento, El Tiempo de estabilización, el tiempo muerto y la ganancia, se representa el comportamiento del modelo de la planta identificado en el experimento; Prueba 27 24 06 2022, y utilizando funciones de transferencia se plantea las

Ecuación 58.
Modelo matemático de la planta en estado de fallo de lectura anormal del instrumento.

$$\frac{Y_{1s}(s)}{X(s)} = \left(\frac{0.0278171}{9s + 1} \right) e^{-10.5s}$$

4.8.6.2 Esquema de detección de fallo por lectura anormal del instrumento

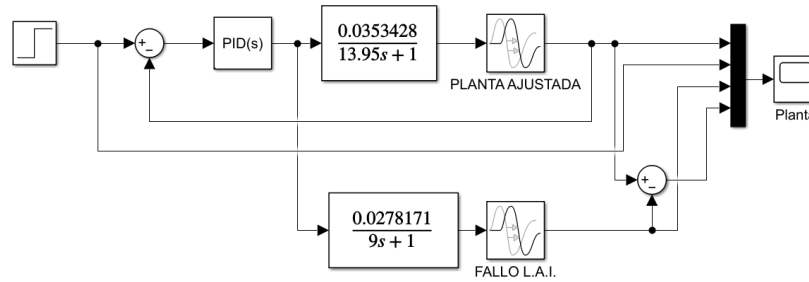
Basados en la sección Modelo matemático para la detección de la planta basado en ecuaciones de paridad con función de transferencia. Se plantea el esquema de la Figura 28.

Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos., donde se compara el modelo original de la planta (Ecuación 51.

Modelo matemático de la planta en estado normal de funcionamiento expresado en funciones de transferencia.) con Modelo matemático de la planta en estado de fallo de lectura anormal del instrumento. (Ecuación 58.

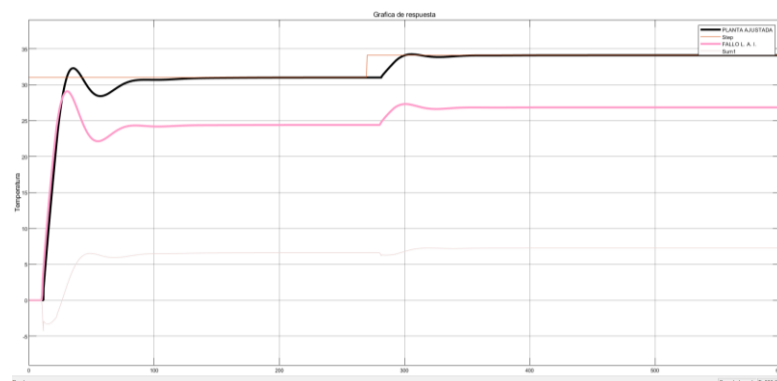
Modelo matemático de la planta en estado de fallo de lectura anormal del instrumento.) el esquema organizado en el software de SIMULINK, se muestra a continuación:

Figura 93.
Esquema residual de detección del fallo de lectura anormal del instrumento



En la Figura 93, se observa en la parte superior, el diagrama de bloques de la planta ajustada, y en la parte inferior el modelo identificado de la planta con la obstrucción de dos tubos; en el multiplexor, se incorporan cuatro entradas; en el siguiente orden de la superior a la inferior; entrada 1. Comportamiento de la planta con el controlador ajustado; Entrada 2. Registro del STEP, Entrada 3. Comportamiento de la planta con la falla lectura anormal del instrumento, Entrada 4. Residual comparativo entre las dos plantas, (Figura 94).

Figura 94.
 Gráfica de respuesta de la simulación de detección de fallos de lectura anormal del instrumento en el Intercambiador de calor



4.9 Generación de patrones basados en residuales de la planta modelo sin falla vs plantas reales

Basado en los datos recolectados durante los experimentos presentados en la sección 4.6;

Con base en Anexo R. Especificaciones físicas de instalación del SENSOR SITRANS TH100 SLIM. se plantea el diagrama eléctrico esquemático Figura 47.

Esquema eléctrico simulado del estado de funcionamiento de la RTD. En el esquema resalta la ubicación de la resistencia R_i , con el propósito de generar una variación en la resistencia equivalente en la lectura del instrumento.

Realización de los experimentos Se efectúa la estimación de los patrones residuales con la planta modelo sin falla.; los cuales se denominan Residuales Planta Modelo +Característica de funcionamiento.

4.9.1 Normalización y pre-ajuste de los datos

Se empleo un método de normalización a punto mínimo, y en amplitud de los datos; los valores capturados en los experimentos se tomaron con distintos periodos de duración, los procesos se midieron con diferencias en la amplitud de los periodos de aplicación de los estímulos, así como el periodo de estabilización y rango de medida temporal del proceso en el estado estable, tal razón hace que la cantidad de datos en cada experimento sean distintos. Los cambios en la captura de datos no están ajustados; como parte de la estrategia de desarrollo se decidió seleccionar solo un segmento de datos de cada una de las pruebas (Ver Tabla 37.

Características dimensionales de las datas analizadas, para la identificación de los procesos)

Tabla 37.

Características dimensionales de las datas analizadas, para la identificación de los procesos

No	Data	Rango de análisis	Aplicación del Step	Cant Datos
1	PRUEBA 17 08 04 2022 Identificación	8182 - 10491	9135	2310
2	PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO PLANTA 5Tubos	3617 - 5487	4320	1871
3	PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO PLANTA 4Tubos	8850 - 10843	9617	1994

4	PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO PLANTA 3TUBO	6500 - 7878	6926	1379
5	PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO PLANTA 2TUBOS	7830 - 9730	8611	1901
6	PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO PLANTA 1TUBO	3780 - 5322	4191	1542
7	PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK	2920 - 4728	3538	1809

El proceso de homogenización de la data se realizó con las siguientes características; inicialmente se igualaron los valores presentes en el STEP, eliminando todos los datos antes del mismo; en todos los experimentos, para efectuar el propósito del cálculo del primer residuales, y proyectando el cálculo al segundo residual, todas las datas fueron limitadas a la cantidad de datos que presenta la data con menor número de datos estudiados. (esta última decisión se tomó basados en la falta de datos en uno de los conjuntos a aplicar la diferencia residual), Los datos se recogieron en una tabla con capacidad de análisis estadístico. (No se muestran en el proyecto, para evitar duplicidad de datos)

4.9.2 Cálculo de los residuales del modelo de la planta sin falla vs los datos reales seleccionados de la planta empleando Simulink

Los valores seleccionados para la generación de patrones de detección y patrones de diagnóstico se organizaron en listas de datos utilizando tablas de Excel; con la siguiente información, para cada archivo, la cantidad de datos utilizados, se ajustaron a la data con menor cantidad de datos 953:

Tabla 38.
 Archivos de Excel® con la data real ajustada para el cálculo de los patrones.

No	Sigla	Nombre	Rango	Datos
1	DataPRSF	Data Planta Real Sin Fallos	9135 - 10491	1357
2	DataPR1F	Data Planta Real con Un Fallo	4320 - 5487	1168
3	DataPR2F	Data Planta Real con Dos Fallos	9617 - 10843	1226
4	DataPR3F	Data Planta Real con Tres Fallos	6926 - 7878	953
5	DataPR4F	Data Planta Real con Cuatro Fallos	8611 - 9730	1120
6	DataPR5F	Data Planta Real con Cinco Fallos	4191 - 5322	1132
7	DataPRFI	Data Planta Real con Fallo del Instrumento	3538 - 4728	1191

Con los datos seleccionados, fueron organizados por captura de cada uno de los experimentos, se procede a cargar los datos en el Workspace de MATLAB®, utilizando el siguiente código:

```
>> DataPRSF=xlsread('DataPRSF.xlsx');  
>> DataPR1F=xlsread('DataPR1F.xlsx');  
>> DataPR2F=xlsread('DataPR2F.xlsx');  
>> DataPR3F=xlsread('DataPR3F.xlsx');  
>> DataPR4F=xlsread('DataPR4F.xlsx');  
>> DataPR5F=xlsread('DataPR5F.xlsx');  
>> DataPRFI=xlsread('DataPRFI.xlsx');
```

Se crearon las variables, en forma de matrices para realizar la comparación de los datos, en el software SIMULINK®, con base en el desarrollo teórico mostrado en la Ecuación 19.

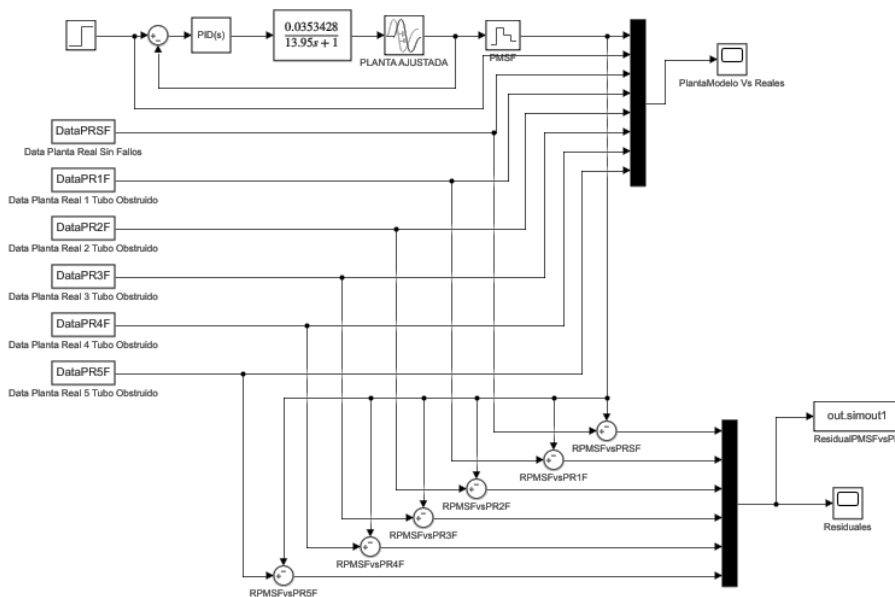
Relación de modelos funcionamiento normal y modelo del fallo y la Figura 28.

Diagrama de bloques del esquema residual de detección de fallos. De la sección 3.7.5; se construyó en siguiente diagrama para la estimación del residual (Figura 95.

Diagrama de Cálculo de Residuales. Planta Modelo Sin Fallos Vs Plantas Reales.);

Figura 95.

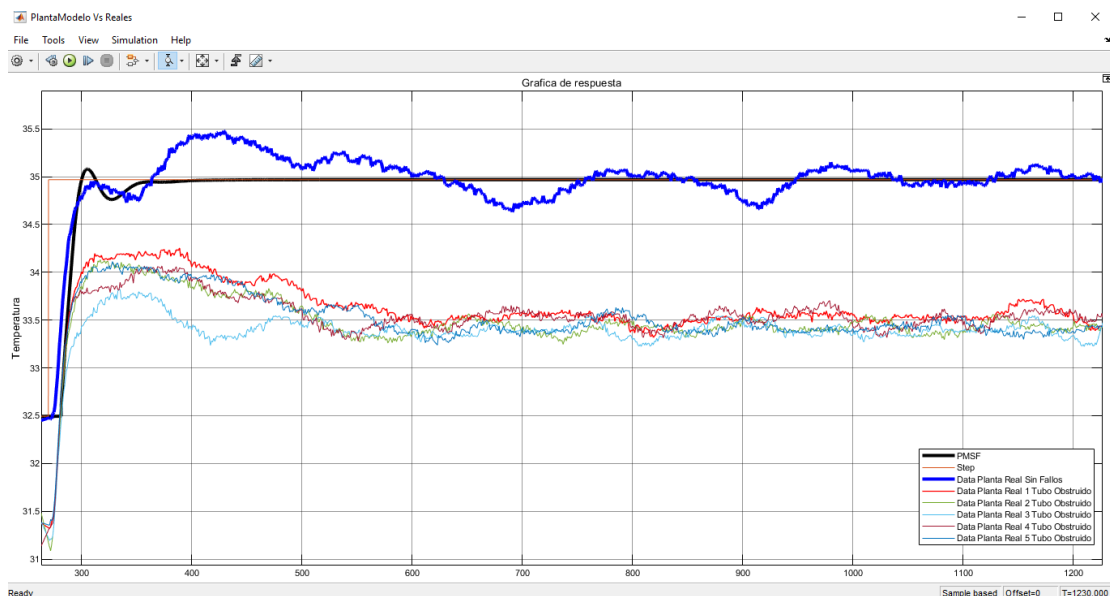
Diagrama de Cálculo de Residuales. Planta Modelo Sin Fallos Vs Plantas Reales.



Para la construcción del diagrama de cálculo de los residuales, se utilizó, la planta modelo de la sección 4.7; Modelo funcional del intercambiador de calor (PMSF) Con el PID calculada, ajustada y evaluada en la sección 4.7.5; Basados en la Tabla 27, la gráfica del comportamiento de la planta con las condiciones de mejora 5 (Gráfica en color verde oscuro), Evaluando el criterio uno; La ley de control presenta una sobre elongación M_p , de 0.126°C , esta alrededor del 4.06% del valor del estímulo, en comparación de la Mejora 4 (color Verde) se observa una reducción en el valor de M_p , y se cumple el criterio uno, con un M_p menor al 10%; por otra parte; según el criterio número dos, el tiempo de estabilización o asentamiento presente en la gráfica es de 36.95 s, siendo 3.97 veces más que la constante de tiempo del mismo, cumpliendo el criterio dos; por tanto, se mantienen los valores PROPORCIONAL E INTEGRAL Y DERIVATIVOS de la MEJORA 5, y se define como un PID la afinado y correctamente sintonizado.

Secuencia de mejora del sintonizador PID, se adicionaron al programa seis bloques “from WorkSpace” para traer la data de las plantas reales guardadas en el WorkSpace de Matlab. También se agregó una sección de cálculo de residuales en la sección inferior del diagrama, donde a través de un bloque Mux, se recopilan los residuales calculados; o la diferencia entre los valores de los datos reales (PRxx) Planta Real; con el modelo de la planta sin fallos (PMSF); finalmente se ubicó un bloque “to workspace” para llevar nuevamente los valores al worksapce de MATLAB®, el tiempo de simulación o número de ciclos de estudio se amplió, de la siguiente manera; 270 (aplicación del STEP) + 953(cantidad de datos de la planta real) = 1223 ciclos o tiempo de simulación y un muestreo de 0.1.

Figura 96.
 Gráficas de respuesta, Planta modelo (color Negro) y Plantas Reales con y sin fallos.



La simulación para el cálculo del residual se desarrolló, bajo las mismas condiciones con las que se realizó el cálculo de la planta identificada De la simulación se obtuvo la siguiente Gráfica de respuesta; Figura 97.

Residuales datos planta seleccionada real vs planta modelo sin fallo; REFERENCIA
(ResidualPMSFvsPRSF) y Figura 97.

Residuales datos planta seleccionada real vs planta modelo sin fallo; REFERENCIA
(ResidualPMSFvsPRSF)

Figura 97.
Residuales datos planta seleccionada real vs planta modelo sin fallo; REFERENCIA
(ResidualPMSFvsPRSF)

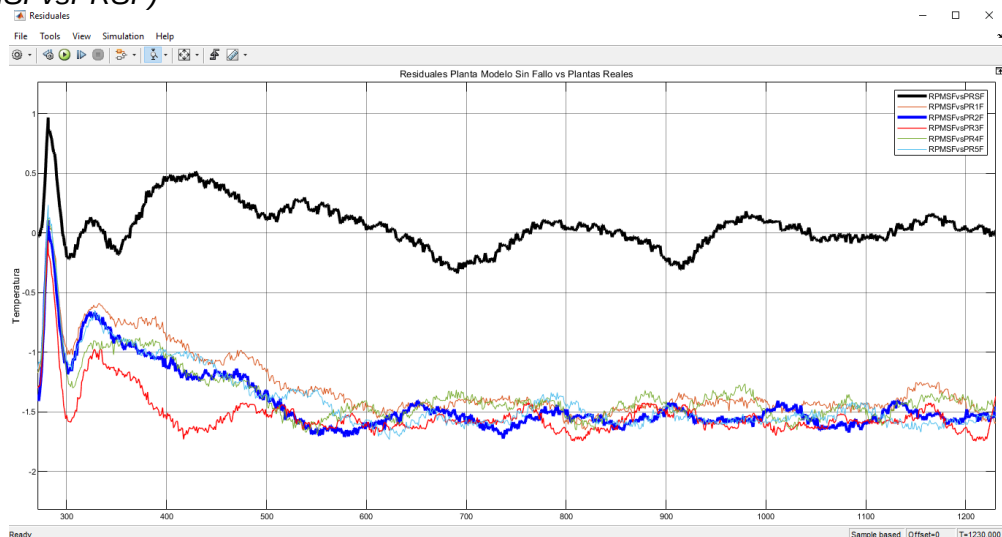


Tabla 39.
Relación de residuales mostrados en la gráfica.

No	Sigla	Nombre	Color
1	ResidualPMSFvsPRSF	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real sin falla (REFERENCIA)	Negro
2	ResidualPMSFvsPR1F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con una falla	Amarillo
3	ResidualPMSFvsPR2F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con dos fallas	Azul
4	ResidualPMSFvsPR3F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con tres fallas	Rojo
5	ResidualPMSFvsPR4F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con cuatro fallas	Gris
6	ResidualPMSFvsPR5F	Residual planta modelo sin falla contra datos planta real con cinco fallas	Turquesa

Con la variable creada “out” se; visualizan los datos, en forma organizada y representados de manera individual, como se observan en la siguiente Figura 98.

Gráficas individuales de los residuales.:

Figura 98.
Gráficas individuales de los residuales.

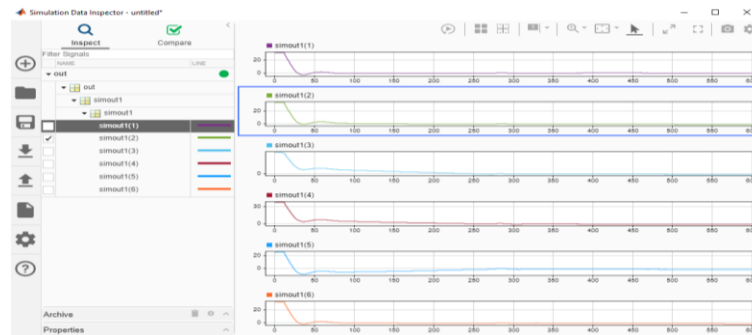
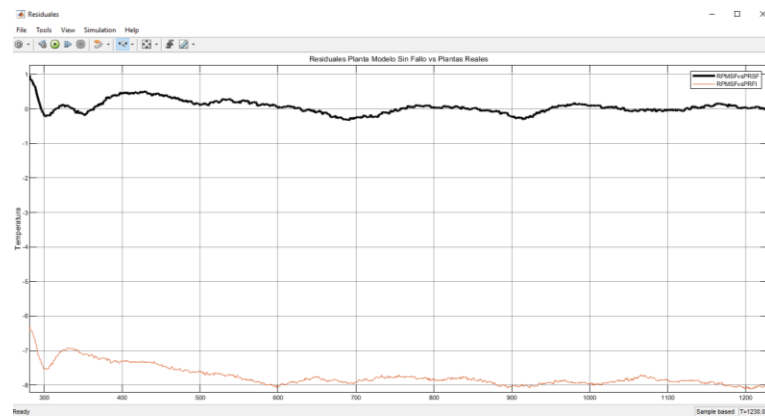


Figura 99.
Residuales datos planta seleccionada real vs planta modelo fallo del Instrumento;
(ResidualPMSFvsPRFI)



De las gráficas y la variable construida “out” se obtienen la lista de datos en Excel de forma individual se guardan en el archivo ResidualPMSFvsPR.xlsx El archivo cuenta con 7 columnas y 12302 filas, la columna 1 Time; las columnas; simout1(1), simout1(2), simout1(3), simout1(4), simout1(5), y simout1(6), corresponden a los datos obtenidos de los residuales.

4.10 Patrones residuales geométricos

Basados en los datos consignados en el archivo Excel® ResidualPMSFvsPR.xlsx, se organizan los datos capturados en la primera hoja del documento con el nombre de “TODOS LOS DATOS”, se realiza la selección a partir del segundo step, ubicado en el ciclo 270, creando una nueva hoja dentro del documento, llamada “Res_STEP”, esta tabla posee también

7 columnas y 9602 filas, la primera fila es de títulos, las demás son datos, la primera columna es de tiempo desde 270 a 1230, con una precisión de 0.1, esta indica el “Time” de muestreo, las demás son: Residual planta modelo sin fallo vs data planta real sin fallo (REFERENCIA RPMSFvsPRSF), las otras seis filas comparan los residual planta modelo sin fallo vs data planta real con fallos (RPMSFvsPR1F, RPMSFvsPR2F, RPMSFvsPR3F, RPMSFvsPR4F y RPMSFvsPR5F), los datos de los residuales comparan datas con valores de estabilización diferentes entre sí, con el propósito de identificar, el cambio del estado transitorio al cambio del estado estable, en los datos generados, es necesario organizar los valores de estabilización según el criterio de 4 o 6 veces tiempo de estabilización, tal como se muestra en la Tabla 40. Selección de valores de tiempo de estabilización.

Tabla 40.
Selección de valores de tiempo de estabilización.

VALORES	Preal SF	Preal 1F	Preal 2F	Preal 3F	Preal 4F	Preal 5F
t63%	9,3	8,775	20,475	11,7	8,325	9
ciclos	13,95	13,1625	30,7125	17,55	12,4875	13,5
4Tao	55,8	52,65	122,85	70,2	49,95	54
5Tao	69,75	65,8125	153,5625	87,75	62,4375	67,5
6Tao	83,7	78,975	184,275	105,3	74,925	81
	339,75	335,8125	423,5625	357,75	330,4375	337,5
Selección	340.1	336	424	358	331.5	337.5

Se desarrollo la secuencia metodología propuesta en la sección 3.7.10; Estimación de patrones residuales basados en medidas estadísticas Y se lograron general los siguientes patrones.

4.10.1 Patrón residual de referencia para detección; Patrón_ RPMSFvsPRSF

Los patrones residuales se basan en la identificación de las medidas estadísticas de Media; Desviación estándar; Varianza; Coeficiente de asimetría y Función de probabilidad.

Figura 100.

Patrón residual de referencia para detección, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPRSF

Medida	Media Aritmética	Desviación Est	Curtosis	Asimetría
Sigla	μ_{PRNDet}	σ_{PRNDet}	$CPRNDet$	$APRNDet$
Cantidad	0,05121	0,17722	0,18141	0,42130

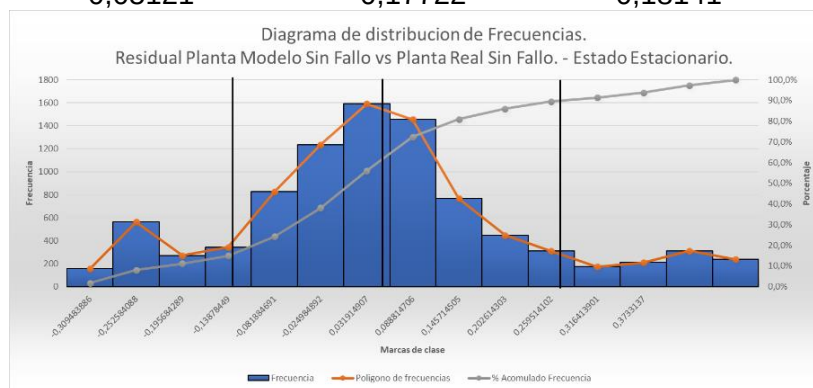


Diagrama de distribución de frecuencias con indicación de la media y la desviación estándar.

4.10.2 Patrones residuales de referencia para el diagnóstico del fallo 1, Obstrucción o atascamiento de tubos.

Figura 101.

Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 1 tubo obstruido, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPR1F.

Medida	Media Aritmética	Desviación Est	Curtosis	Asimetría
Sigla	$\mu_{PR1Fdiag}$	$\sigma_{PR1Fdiag}$	$CPR1Fdiag$	$APR1Fdiag$
Cantidad	-1,33305	0,21922	1,63748	1,60557

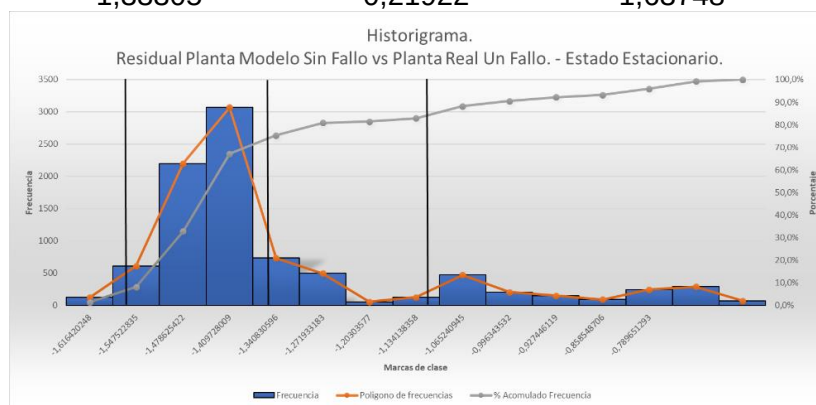


Diagrama de distribución de frecuencias con indicación de la media y la desviación estándar.

Figura 102.

Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 2 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón__RPMSFvsPR2F.

Medida	Media Aritmética	Desviación Est	Curtosis	Asimetría
--------	------------------	----------------	----------	-----------

Sigla
Cantidad

μ PR2Fdiag
 -1,52053

σ PR2Fdiag
 0,11569

CPR2Fdiag
 2,21420

APR2Fdiag
 1,51956



Diagrama de distribución de frecuencias con indicación de la media y la desviación estándar.

Figura 103.

Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 3 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón RPMSFvsPR3F.

Medida
Sigla
Cantidad

Media Aritmética
 μ PR3Fdiag
 -1,56752

Desviación Est
 σ PR3Fdiag
 0,08830

Curtosis
 CPR3Fdiag
 3,37015

Asimetría
 APR3Fdiag
 1,29912

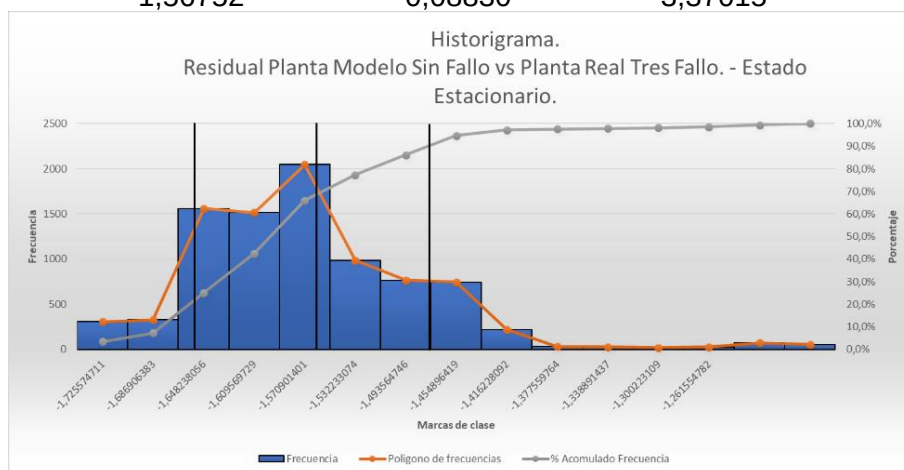


Diagrama de distribución de frecuencias con indicación de la media y la desviación estándar.

Figura 104.

Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 4 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón RPMSFvsPR4F.

Medida
Sigla
Cantidad

Media Aritmética
 μ PR4Fdiag
 -1,39738

Desviación Est
 σ PR4Fdiag
 0,17374

Curtosis
 CPR4Fdiag
 1,67111

Asimetría
 APR4Fdiag
 1,41293

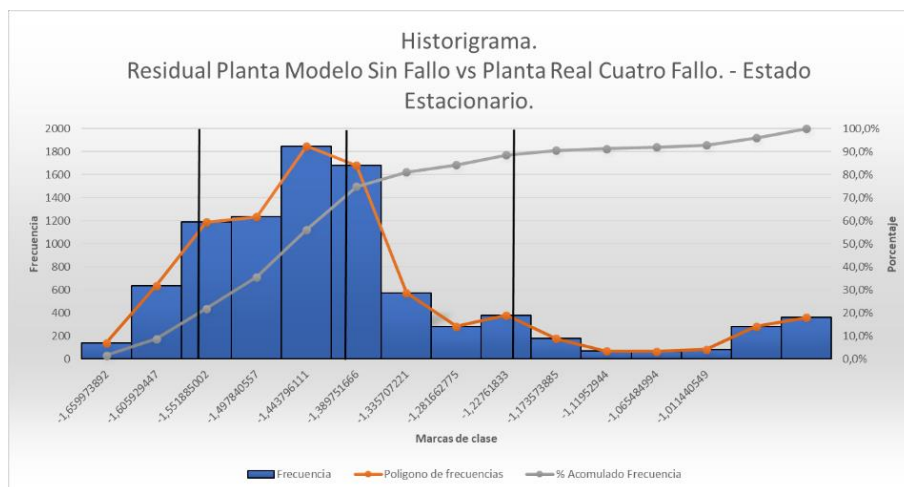


Diagrama de distribución de frecuencias con indicación de la media y la desviación estándar.

Figura 105.

Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo de 5 tubos obstruidos, en estado estacionario. Patrón $_{RPMSFvsPR5F}$.

Medida	Media Aritmética	Desviación Est	Curtosis	Asimetría
Sigla	$\mu_{PR5FDiag}$	$\sigma_{PR5FDiag}$	$CPR5FDiag$	$APR5FDiag$
Cantidad	-1,45115	0,20392	1,31646	1,52166

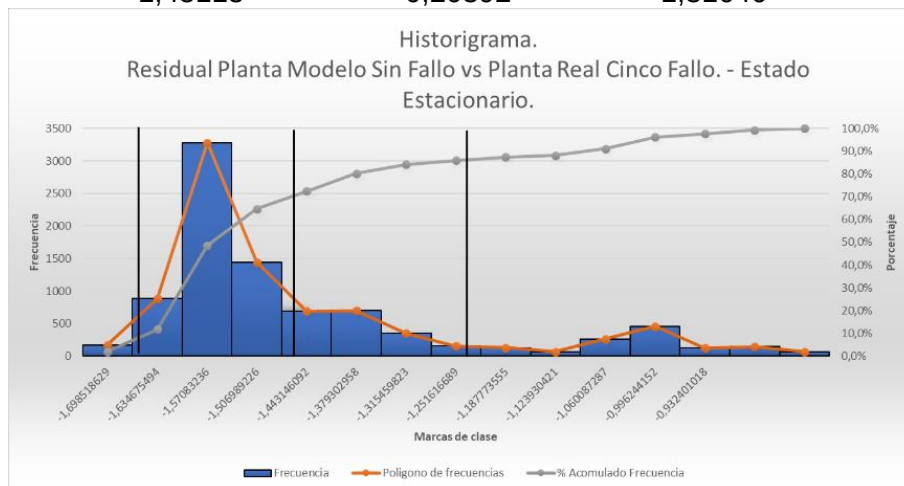


Diagrama de distribución de frecuencias con indicación de la media y la desviación estándar.

4.10.3 Patrón residual de referencia para el diagnóstico del fallo 2, Lectura Anormal del Instrumento.

Figura 106.

Patrón residual de referencia para diagnóstico del fallo del Instrumento, en estado estacionario.
 Patrón_RPMSFvsPRFI.

Medida	Media Aritmética	Desviación Est	Curtosis	Asimetría
Sigla	μ PRFIDdiag	σ PRFIDdiag	CPRFIDdiag	APRFIDdiag
Cantidad	-7,78726	0,23728	1,43566	1,43901

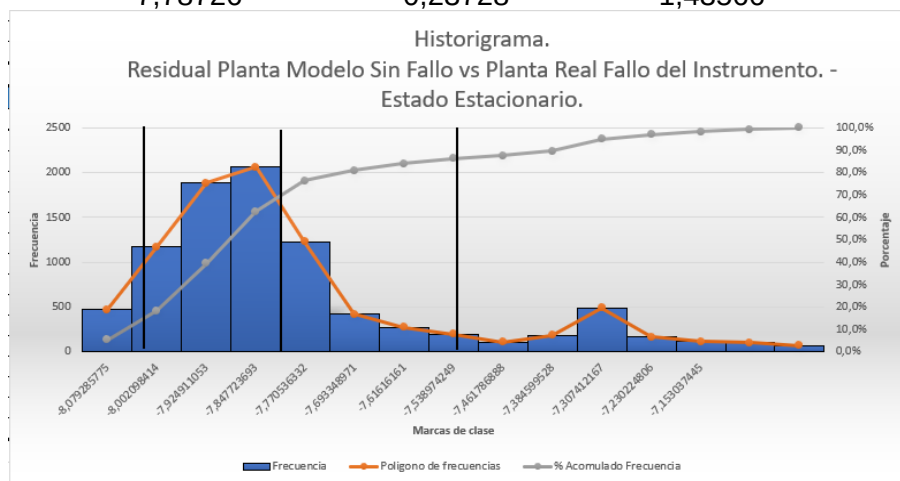


Diagrama de distribución de frecuencias con indicación de la media y la desviación estándar.

4.11 Rangos validos de confianza para cada patrón residual

4.11.1 Rangos para la detección de fallos en el intercambiador de calor

En la sección 0, se estableció el valor medio del residual de la planta modelo sin fallos contra la planta real sin fallos, cuyo valor es (μ PRNDet = 0.05121); este valor obtenido, viene de la sección 4.7. Modelo funcional del intercambiador de calor (PMSF) Donde se construyó y planteo el modelo del intercambiador de calor sin fallos; adicionalmente, en la sección 4.7.1, se formuló la Ley de control PID de la planta, en estado normal de funcionamiento. Dicha ley fue ajustada en la sección 4.7.3. este ajuste permite que la ley de control maneje variaciones que la planta puede presentar, en cuanto a perturbaciones, ruidos y fallos, tal como se comprobó en la

sección 4.7.4 Evaluación de la planta y la ley de control mejorada contra ruidos, perturbaciones y fallos

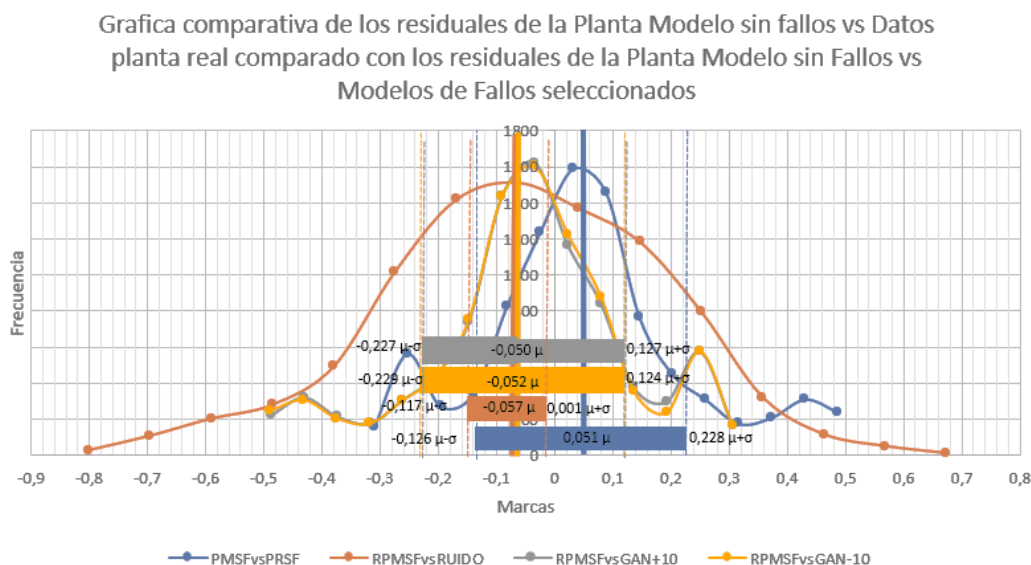
Tabla 41.

Valores promedios y de desviación estándar de los residuales de la planta modelada sin falla vs los fallos simulados en ella

	PMSFvsPRSF	RPMSFvsRUIDO	RPMSFvsGAN+10	RPMSFvsGAN-10
$\mu + \sigma$	0,228433052	0,001305364	0,127339705	0,124971106
μ	0,05121	-0,05785	-0,05028	-0,05228
$\mu - \sigma$	-0,126013052	-0,117005364	-0,227899705	-0,229531106
σ	0,177223052	0,059155364	0,177619705	0,177251106
n	8900	8900	8900	8900

Figura 107.

Gráfica comparativa de diagramas de frecuencia, valores medios y valores de umbrales dados en los residuales de la planta modelada y las simulaciones de fallas.



Teniendo en cuenta los resultados de la reacción de la planta con los diferentes tipos de elementos anormales contenidos por el controlador diseñado y ajustado, se pueden comparar los residuales de la planta modelada sin fallos contra las simulaciones en condiciones anormales, al realizar la comparación con el residual de la planta modelada sin falla con la planta real sin falla, es posible establecer la relación de los valores medios de los residuales y

los límites definidos superiores e inferiores, en cada uno de las simulaciones (ver Figura 107. Gráfica comparativa de diagramas de frecuencia, valores medios y valores de umbrales dados en los residuales de la planta modelada y las simulaciones de fallas.);

La Gráfica comparativa muestra cuatro representaciones de las distribuciones de frecuencias contra las marcas de clase calculadas de los siguientes casos particulares: en color azul, residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real sin fallo (PMSFvsPRSF); en color naranja, el residual de la planta modelo sin fallo contra simulación del ruido (RPMSFvsRUIDO); en color gris, el residual de la planta modelo sin fallo contra simulación del incremento de la ganancia +10 (RPMSFvsGAN+10) y en color amarillo, el residual de la planta modelo sin fallo contra simulación del incremento de la ganancia -10 (RPMSFvsGAN-10), en la gráfica se agregaron bandas horizontales con cada color limitados por los valores de la media más la desviación estándar y la media menos la desviación estándar (Líneas Punteadas) ; con punto medio en el valor de la media de cada distribución (línea continua gruesa).

La distribución de los residuales de la planta modelo sin fallas contra las simulaciones de las condiciones anormales de funcionamiento evaluadas en la planta modelo para verificar la capacidad del sistema de control del PID (distribución naranjada, gris y amarilla), presentan claramente un desplazamiento a la izquierda del residual del residual de la planta modelo sin fallo con la planta real sin fallo.

En la distribución del residual del residual de la planta modelo sin fallo con la planta real sin fallo, las condiciones de los límites evaluados, teniendo en cuenta un valor de los límites superior e inferior igual al valor medio más o menos la desviación estándar ($\mu_{PRNDet} \pm \sigma_{PRNDet}$), según la Ecuación 46.

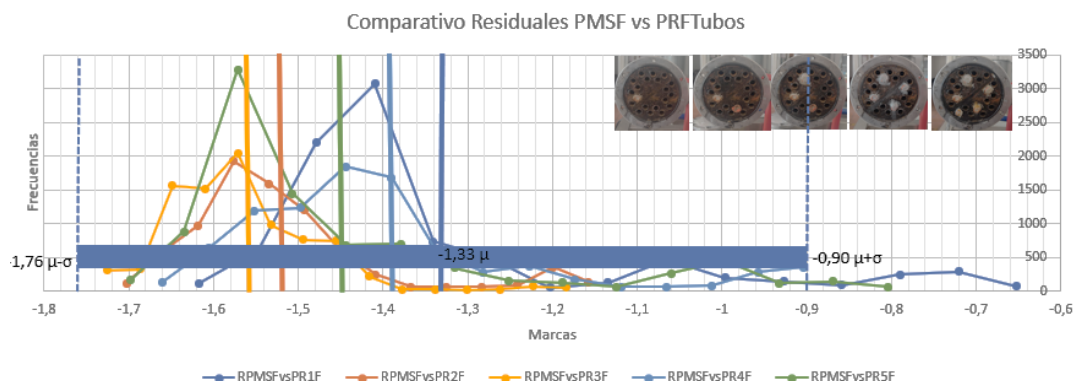
Z de la distribución normal. Presenta un intervalo de confianza del 84.4% aproximadamente; sin embargo, este rango de análisis omite los resultados inferiores de los residuales entre la planta modelo sin fallo contra las simulaciones de los fallos en la planta modelo, teniendo en cuenta que en la sección 4.7.5 Evaluación de la planta y la ley de control mejorada contra ruidos, perturbaciones y fallos La ley de control tiene un comportamiento aceptable frente a este tipo de eventos anormales, se decide ampliar los valores de los límites inferior y superior, los límites inferior y superior se fijan a continuación $\mu_{PRNDe\ Inf.} = -0,296$; $\mu_{PRNDe\ Sup.} = 0,39842$, de esta manera el área bajo la curva de dispersión de frecuencias, limitado entre los valores inferior y superior, aumenta a 95% la confianza de que un valor estimado, este dentro de los límites fijados.

4.11.2 Rangos para el diagnóstico de fallos por obstrucción y atascamiento en el intercambiador de calor

En la sección 4.10.2 se determinaron los Patrones residuales de referencia para el diagnóstico del fallo 1, Obstrucción o atascamiento de tubos. estos patrones están organizados en la siguiente gráfica:

Figura 108.

Gráfica comparativa de diagramas de frecuencia, valores medios y valores de umbrales de los residuales de la planta modelada sin fallos contra las plantas reales del fallo por obstrucción.



La Gráfica comparativa muestra cinco representaciones de las distribuciones de frecuencias contra las marcas de clase calculadas de los siguientes casos particulares: en color azul, residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real con fallo de un tubo (RPMSFvsPR1F); en color naranjado, el residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real con fallo de dos tubos (RPMSFvsPR2F); en color amarillo, el residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real con fallo de tres tubos (RPMSFvsPR3F); en color azul claro, el residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real con fallo de cuatro tubos (RPMSFvsPR4F); en color verde, el residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real con fallo de cinco tubos (RPMSFvsPR5F) en la gráfica se agregó una banda horizontal con color azul, asociado a los valores de RPMSFvsPR1F, de la media más la desviación estándar y la media menos la desviación estándar (Líneas Punteadas) ; con punto medio en el valor de la media de la distribución (línea continua gruesa).

Para un intervalo de confianza del 97.5% en los valores inferiores y superiores asociados al residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real con fallo de un tubo (RPMSFvsPR1F), se incluyen todos los valores medios que se presentan por los demás valores de obstrucción y atascamiento de dos, tres, cuatro o cinco tubos; permitiendo de esta

manera hacer diagnóstico sobre el fallo de obstrucción y atascamiento de tubos, con un rango de valores establecido entre los límites inferiores; $\mu_{PRFD1 \text{ Inf.}_{2.5/2}} = -1,762735569$ y el límite superior $\mu_{PRFD1 \text{ Sup.}_{2.5/2}} = -0,903372964$.

4.11.3 Rangos para el diagnóstico de fallos por lectura anormal del instrumento en el intercambiador de calor

En la sección 4.10.3 se determinó el Patrón residual de referencia para el diagnóstico del fallo 2, Lectura Anormal del Instrumento. Para un intervalo de confianza del 95% en los valores inferiores y superiores asociados al residual de la planta modelo sin fallo contra la planta real con fallo de la lectura anormal del instrumento (RPMSFvsPRFI), se estableció entre los límites inferiores; $\mu_{PRFD2 \text{ Inf.}_{2.5/2}} = -7,322200619$ y el límite superior $\mu_{PRFD2 \text{ Sup.}_{2.5/2}} = -8,252327805$.

4.12 Hipótesis Nula Ho, Hipótesis de detección de fallo

En la sección 3.8.10 Pruebas de hipótesis para la detección de cambios en las medidas estadísticas, para la detección y el diagnóstico de fallos Se planteó la postulación de la hipótesis nula Ho, como hipótesis para la detección del fallo, ajustando los valores calculados; la hipótesis queda planteada a continuación:

“HIPÓTESIS NULA Ho; (hipótesis de funcionamiento normal) el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, pertenece al rango entre el límite inferior permitido($\mu_{PRNDe \text{ Inf.}_{0.05/2}} = -0,296$), y el límite superior permitido($\mu_{PRNDe \text{ Sup.}_{0.05/2}} = 0,39842$), con un nivel de confianza determinado, establece como VERDADERA la hipótesis nula, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE

ACEPTACIÓN y se considera una medición con un estado normal de funcionamiento de la planta, no hay detección. (hipótesis de detección); si el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, no pertenece al rango entre el límite inferior permitido, y el límite superior permitido, establece como FALSO la hipótesis nula, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE RECHAZO y se considera una medición con un estado anormal de funcionamiento, hay detección”

Ecuación 59.

Hipótesis nula H_0 , Hipótesis de detección.

$$H_0\{\mu_x/\mu_x \forall \mu_x \in \mu_{PRNDe}\} \quad \begin{aligned} \text{VERDADERA (ACEPTADA)} & \Leftrightarrow \{-0.296 \leq \mu_x \leq 0.39842\} \\ \text{FALSO (RECHAZO)} & \Leftrightarrow \{\mu_x \leq -0.296 \vee \mu_x \geq 0.39842\} \end{aligned}$$

Donde:

μ_x = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin falla contra la planta monitoreada.

μ_{PRNDe} = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real sin fallos. (patrón de detección).

4.13 Hipótesis de diagnóstico de fallo

4.13.1 Hipótesis H1, Diagnóstico de Fallo de obstrucción y atascamiento del intercambiador de calor

En la sección 3.8.10 Pruebas de hipótesis para la detección de cambios en las medidas estadísticas, para la detección y el diagnóstico de fallos Se planteo la postulación de la hipótesis alternativa, como hipótesis para el diagnóstico del fallo por obstrucción y atascamiento de los tubos de intercambiador de calor, ajustando los valores calculados; la hipótesis queda planteada a continuación:

“HIPÓTESIS ALTERNATIVA H1; (hipótesis de diagnóstico del fallo por obstrucción y atascamiento) el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, pertenece al rango entre el límite inferior permitido ($\mu_{PRFD1 \text{ Inf. } 0.025/2} = -1,762735569$), y el límite superior permitido ($\mu_{PRFD1 \text{ Sup. } 0.025/2} = -0,903372964$), con un nivel de confianza determinado del 97.5%, establece como VERDADERA la hipótesis alternativa H1, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE ACEPTACIÓN y se considera que el valor representa un diagnóstico del fallo por obstrucción y atascamiento.; si el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, no pertenece al rango entre el límite inferior permitido, y el límite superior permitido, establece como FALSO la hipótesis nula, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE RECHAZO y se considera que el valor esta fuera del diagnóstico”

Ecuación 60.

Hipótesis H1, Hipótesis de diagnóstico por fallo de obstrucción y atascamiento.

$$\begin{aligned}
 & \text{VERDADERA (ACEPTADA)} \Leftrightarrow \{-1.7627 \leq \mu_x \leq -0.9033\} \\
 & H1\{\mu_x / \mu_x \forall \mu_x \in \mu_{PRFD1}\} \\
 & \text{FALSO (RECHAZO)} \Leftrightarrow \{\mu_x \leq -0.9033 \vee \mu_x \geq -1.7627\}
 \end{aligned}$$

Donde:

μ_x = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin falla contra la planta monitoreada.

μ_{PRFD1} = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real con fallos tipo obstrucción. (patrón de diagnóstico de fallo por obstrucción y atascamiento).

4.13.2 Hipótesis H2, Diagnóstico de Fallo lectura anormal del instrumento del intercambiador de calor.

Basado en los procedimientos de las secciones anteriores, se planteó la postulación de la hipótesis para el diagnóstico del fallo por lectura anormal del instrumento de intercambiador de calor, ajustando los valores calculados; la hipótesis queda planteada a continuación:

“HIPÓTESIS ALTERNATIVA H2; (hipótesis de diagnóstico del fallo por lectura anormal del instrumento) el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, pertenece al rango entre el límite inferior permitido ($\mu_{PRFD2 Inf.0.025/2} = -8.25232$), y el límite superior permitido ($\mu_{PRFD2 Sup.0.025/2} = -7.32220$), con un nivel de confianza determinado del 97.5%, establece como VERDADERA la hipótesis alternativa H2, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE ACEPTACIÓN y se considera que el valor representa un diagnóstico del fallo por lectura anormal del instrumento.; si el valor promedio del residual entre la planta modelo sin falla contra la planta real monitoreado, no pertenece al rango entre el límite inferior permitido, y el límite superior permitido, establece como FALSO la hipótesis nula, por tanto, se encuentra dentro de LA REGIÓN DE RECHAZO y se considera que el valor esta fuera del diagnóstico”

Ecuación 61.

Hipótesis H2, Hipótesis de diagnóstico por fallo lectura anormal del instrumento.

$$\begin{aligned}
 & \text{VERDADERA (ACEPTADA)} \Leftrightarrow \{-8.25232 \leq \mu_x \leq -7.3222\} \\
 & H2\{\mu_x / \mu_x \forall \mu_x \in \mu_{PRFD2.}\} \\
 & \text{FALSO (RECHAZO)} \Leftrightarrow \{\mu_x \leq -7.3222 \vee \mu_x \geq -8.25232\}
 \end{aligned}$$

Donde:

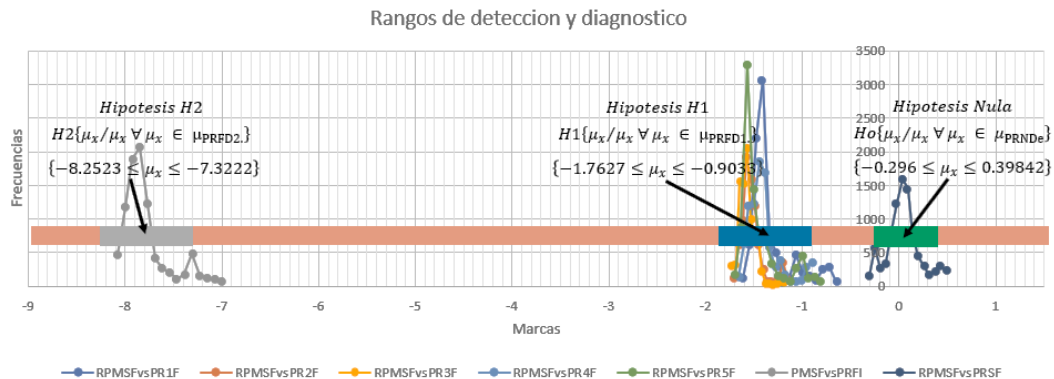
μ_x = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin falla contra la planta monitoreada.

μ_{PRFD2} . = Valor promedio, del residual entre la planta modelada sin fallos contra la planta real con fallos tipo lectura anormal del instrumento. (patrón de diagnóstico de fallo por lectura anormal del instrumento).

4.13.3 Hipótesis H3, Diagnóstico de Fallo desconocido

La hipótesis H3, representa el espectro de resultados posibles fuera de los tres rangos o umbrales anteriores, es decir con una evaluación FALSA de las otras hipótesis;

Figura 109.
 Valores probables del sistema de monitoreo.



En la figura anterior, se representa en color rosa, todo el espectro de valores restantes que se pueden presentar dentro del análisis, este espectro es desconocido y se identifica al obtener una validación falsa tanto en la Hipótesis nula H_0 , como en las Hipótesis H_1 y en la Hipótesis H_2 simultáneamente.

Ecuación 62.

Hipótesis H3, Diagnóstico de Fallo desconocido

$$\begin{aligned}
 & \text{VERDADERA (ACEPTADA)} \iff \{H_0 = \text{FALSO} \wedge H_1 = \text{FALSO} \wedge H_2 = \text{FALSO}\} \\
 & H3\{\mu_x/\mu_x\} \\
 & \text{FALSO (RECHAZO)}
 \end{aligned}$$

4.14 Esquema básico de implantación industrial

El esquema de implantación industrial expuesto en la sección 3.9. Esquema general de implantación industrial, presenta el desarrollo de un sistema industrial, el cual es similar al diseño propuesto en esta investigación, solo se presentarán los ítems donde se presente algún cambio sustancial en el intercambiador de calor.

4.14.1 Elección de accionamientos

Los eventos de detección y diagnóstico de fallos, son mostrados a través del accionamiento de alarmas, visuales o sonoras, que tengan la capacidad de dar aviso a los operarios, en el Anexo C. Hoja de registro de la máquina. Resalta la ausencia de señales de alerta lumínicas o sonoras,

Figura 110.
Columna SIEMENS 8WD4208-0AA



Por sus características, esta columna SIEMENS 8WD4208-0AA, posee tres señales lumínicas, (Señal Verde, Señal Naranja, Señal Roja) y la señal sonora, su diámetro es de 50 mm, compatible con la tecnología del banco de control de temperatura.

4.14.2 Necesidades específicas

Como necesidades específicas del banco de control de temperatura, el diseño del laboratorio tiene como estándar de funcionamiento; (ver sección 4.2.1.4), Calentar el agua de proceso, para lo cual el sistema de control incorpora un autómata programable tipo PLC S7-

1200, y una pantalla SIMATIC HMI (Touch), es evidente que, dentro de la programación del TIA PORTAL, que el software no tiene un control sobre la aparición de eventos anormales, presentando la siguiente necesidad:

“El intercambiador de calor necesita un sistema de detección y diagnóstico de fallos implementado en su programación y funcionamiento”

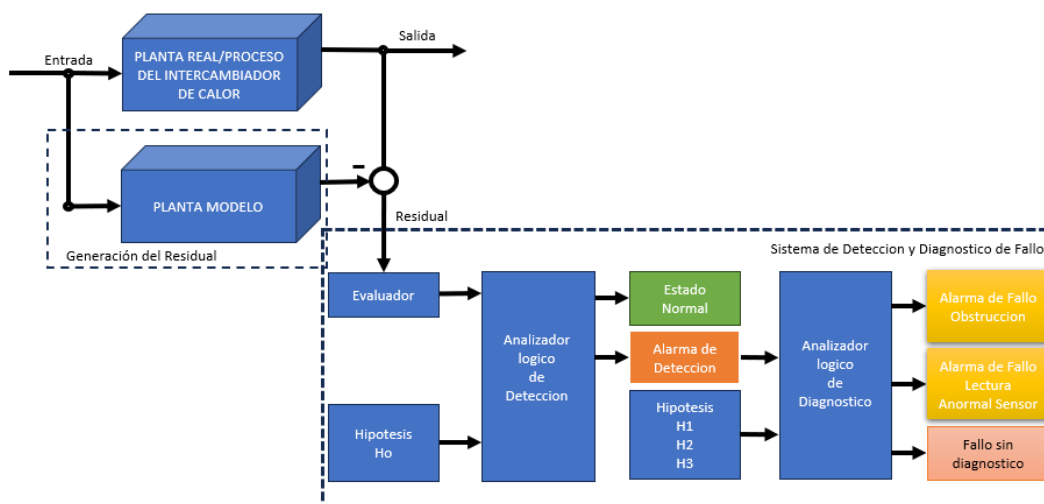
4.14.3 Algoritmo de control

El algoritmo de control debe incorporarse a la alternativa de programación que presenta el software de manejo del intercambiador de calor; CONTROL AUTOMÁTICO, dentro de esta, se realizara la actividad de detección y diagnóstico de fallos, aplicando el siguiente esquema de propósito, Ver Figura 111.

Esquema de implantación del SDDF.

Figura 111.

Esquema de implantación del SDDF.



La Figura 111, presenta la incorporación de dos elementos al programa de CONTROL AUTOMÁTICO del intercambiador de calor; en una parte inicial, es necesario agregar un

bloque para estimación del residual entre la planta real/proceso monitoreado y la planta modelo caracterizada (sección 4.7 Modelo funcional del intercambiador de calor (PMSF) Estos valores ingresan a un procesamiento de evaluación del residual, para estimar las características estadísticas de tendencia central y de distribución, principalmente la media del residual; este valor medio, ingresa al bloque de análisis lógico de detección, donde se compara con el patrón de detección (ver sección 0 Se desarrollo la secuencia metodología propuesta en la sección 3.7.10; Estimación de patrones residuales basados en medidas estadísticas Y se lograron general los siguientes patrones.

Patrón residual de referencia para detección; Patrón_ RPMSFvsPRSF).

En el bloque de análisis lógico de detección, es donde se efectúa la detección de los eventos anormales; el bloque tiene la capacidad de generar una alarma tipo indicador visual de color verde, a manera de indicador del estado normal de funcionamiento; o la alternativa de generar una alerta lumínica (en color naranja) que señala la detección de un cambio en el funcionamiento normal, un estado anormal de funcionamiento o fallo del sistema, adicionalmente la activación de dicho bloque, enciende el analizador lógico de diagnóstico, en este bloque, se comparan con los tres patrones de fallos, anteriormente caracterizadas, para cada una de estas, se activada en caso de presentar un diagnóstico positivo o de fallo uno tipo obstrucción o atascamiento o del fallo tipo dos lectura anormal del instrumento, un indicador en color amarillo, en señal de un posible diagnóstico, si el bloque no puede catalogar la anomalía en una de estas dos alternativas, la presenta con un color naranja pálido en señal de detección de un fallo sin diagnóstico.

El listado de variables presente en el Anexo W. Lista de variables del programa, permite comprender los cambios a realizar en para la programación, el sistema, y crear las siguientes variables digitales:

Tabla 42.
Variables digitales requeridas.

Nombre	Tipo	Comentario	Descripción
DI0.3	Bool	Push Button SDDF	Activar ciclo SDDF
DI0.4	Bool	Luz Verde	Estado Normal
DI0.5	Bool	Luz Naranja	Estado de Detección
DI0.6	Bool	Luz Roja	Estado de Diagnóstico
DI0.7	Bool	Alarma	Estado de Detección

4.14.4 Estados funcionales de la columna SIEMENS 8WD4208-0AA

Los elementos de control de la columna son del tipo digitales, para su representación y programación, es necesario discriminar los estados booleanos de sus elementos, el proceso inicia con la activación del botón en el touch de la pantalla HMI (DI0.3), El activar la función, el programa inicia con la evaluación de los residuales para estimar la estadística y el valor medio de la misma, con el resultado del valor medio μ_x , el analizador lógico de detección, estima la veracidad de la hipótesis nula H_0 o Hipótesis de detección, de esta manera, se tienen dos alternativas; si la hipótesis es falsa, se enciende la señal color verde, si la hipótesis es verdadera, se enciende la luz naranja, esta última es el indicador del analizador lógico de diagnóstico, en él se realizan tres comparativos, si H_1 o H_2 resultan positivas, se enciende la luz roja y el sonido, si por el contrario son negativas se evalúa la hipótesis 3, el H_3 resulta positivo hace que solo se encienda el sonido, indicando que no hay un diagnóstico definido.

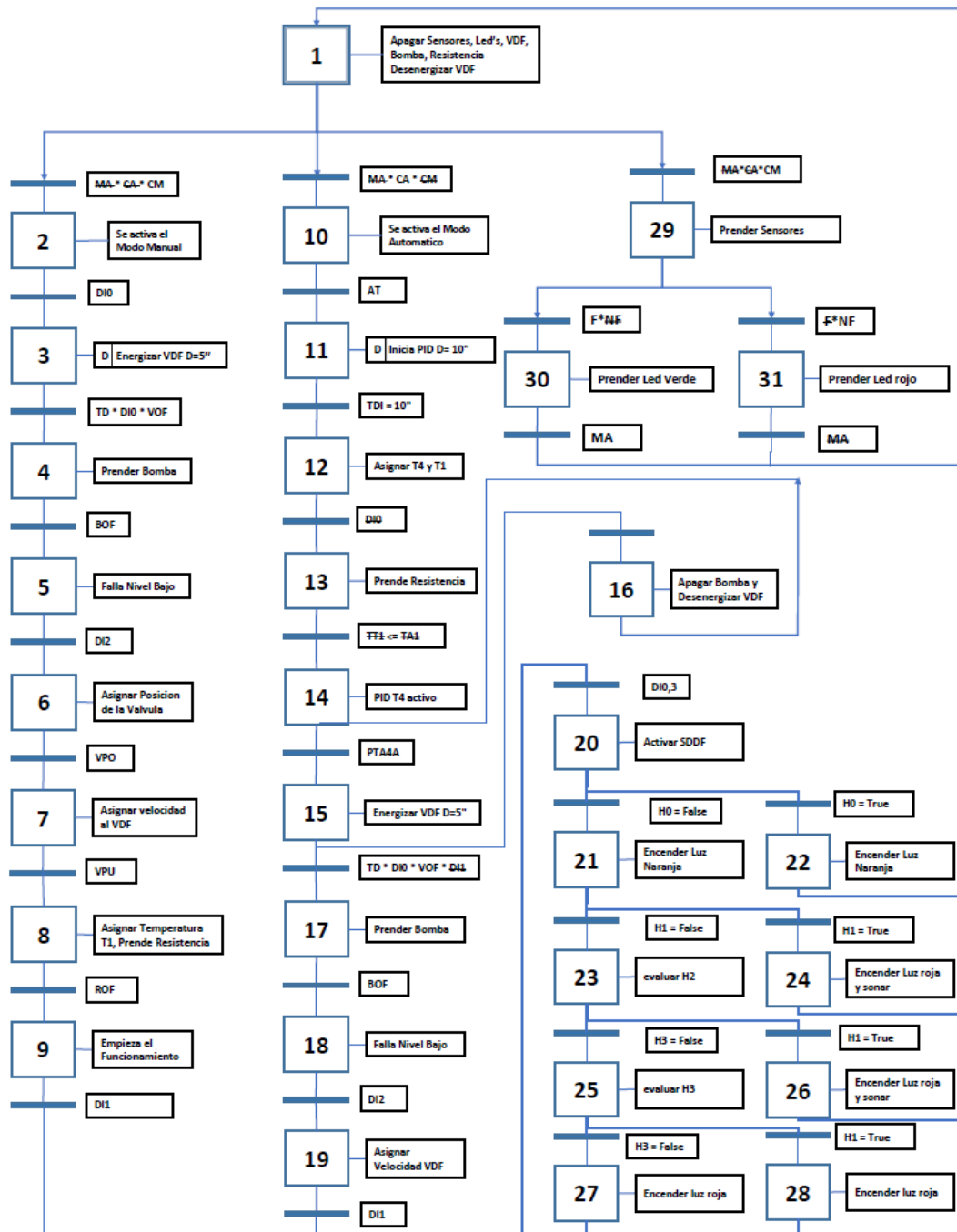
Tabla 43.
Relaciones booleanas para la columna.

Estado	Push Button SDDF (DI0.3)	Luz verde (DI0.4)	Luz Naranja (DI0.5)	Luz Roja (DI0.6)	Alarma (DI0.7)
SDDF Apagado	0	0	0	0	0
SDDF Activo	1	0	0	0	0



DetECCIÓN (False función Normal)	1	1	0	0	0
DetECCIÓN (True) Lectura Anormal	1	0	1	0	0
Diagnóstico (Fallo Obstrucción)	1	0	1	1	1
Diagnóstico (Fallo Lectura Anormal)	1	0	1	1	1
Fallo sin Diagnóstico	1	0	1	0	1

Figura 112.
GRAFCET Propuesta del programa de SDDF.



4.14.5 Modificación propuesta para el programa de SDDF

El protocolo propuesto, permite una vez seleccionado el modo automático, y cumpliendo con todas las condiciones funcionales de activación, el sistema detecte el inicio del proceso del sistema de detección de diagnóstico de fallo, (

Figura 112.

GRAFCET Propuesta del programa de SDDF.) el cual puede desarrollar la activación de cada una de las luces, verde, amarilla o roja, y la activación de la señal sonora, en caso de ser requerida.

4.14.6 Proyección física implantación industrial del sistema de implantación industrial

El proceso de implantación proyecta una modificación parcial del banco, para la realización de la instalación física de la columna, y los demás accesorios necesarios para su correcto funcionamiento. Figura 113.

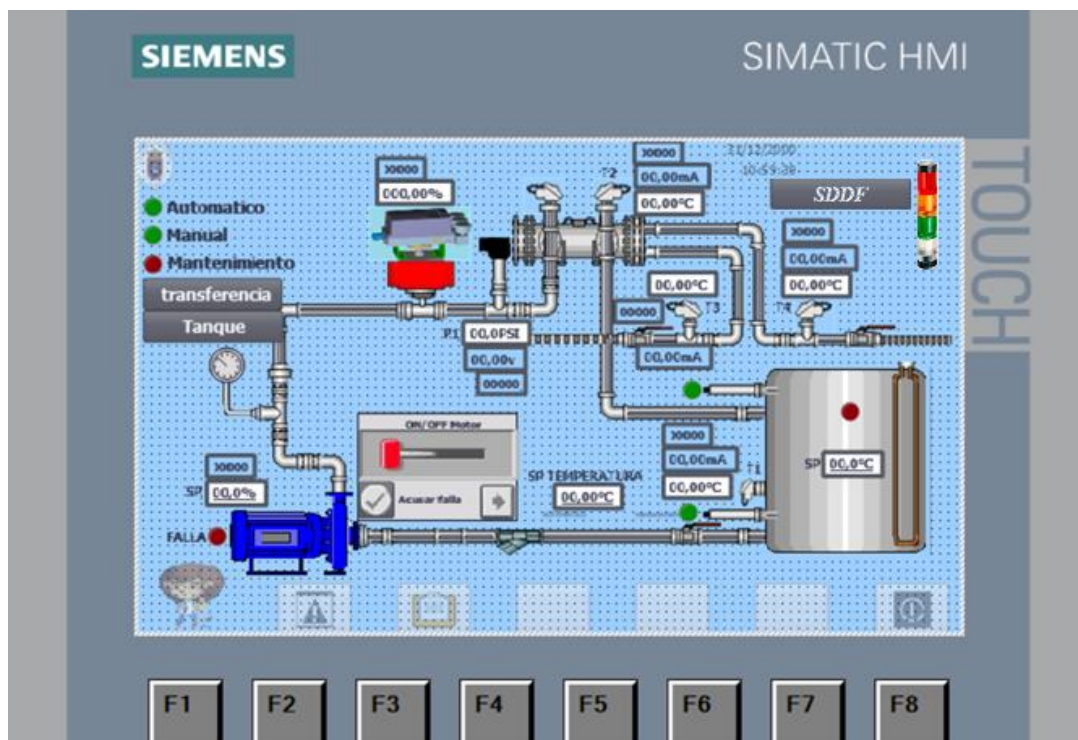
Esquema físico propuesto de implantación. Con esta instalación, el banco tendrá la capacidad de generar alertas visuales en función de la programación, in situ.

*Figura 113.
Esquema físico propuesto de implantación.*



Esquemáticamente, la pantalla HMI, debe incorporar el PUSH BUTTON del SDDF, el cual se ubicará en la parte superior derecha, adicionalmente la ubicación virtual de la columna de señalización, con el propósito de generar alertas visuales en la sala de control.

*Figura 114.
 Esquema proyectado de la pantalla HMI.*



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los intercambiadores de calor, son máquinas de amplio interés industrial y de una compleja formulación matemática, los cuales son objeto constante de diferentes modelos de detección, enfocados al uso de técnicas como; el monitoreo de umbrales, filtros de Kalman y observadores de estado, incluso algoritmos genéticos y ACP, desde el punto de vista de los modelos de diagnóstico los sistemas de Redes de creencia bayesiana, redes neuronales, clasificadores, sistemas Fuzzy y el árbol de decisión de fallos son los métodos utilizados, y finalmente los sistemas híbridos encontrados, comparten características de los modelos anteriormente mencionados, estos métodos permitieron hacer detección y diagnóstico de fallos tipo Fuga, Ensuciamiento, y fallos en la sensórica.

El banco de control de temperatura, objeto de estudio, tiene instalados elementos de control, sistemas de control, elementos de sensórica con alta precisión, de alta eficiencia y de uso industrial, los cuales permitieron un rastreo, continuo de todas las pruebas realizadas, sin embargo, cabe aclarar que su carácter de laboratorio de entrenamiento lo hace sobre dimensionado y con capacidades funcionales diferenciadas.

El comportamiento físico, resultado de las múltiples no linealidades presentes en el funcionamiento normal de un intercambiador de calor del tipo coraza y tubos del banco de

control temperatura fueron representados en un modelo analítico lineal invariante en el tiempo (L.T.I.), con la aplicación del método de los dos puntos, adicionalmente se desarrolló un controlador PID basados en el método de Ziegler – Nichols, el cual fue ajustado utilizando una metodología heurística (TEE), que como se pudo observar en la simulación, resulto adecuado para controlar situaciones de perturbación, al evaluarse las condiciones de ruido y fallos, el controlador PID, presento un comportamiento adecuado, adicionalmente se pudo identificar el modelo de fallos, al modificar los mapas invariantes de funcionamiento del intercambiador incidiendo sobre este, condiciones de obstrucción y atascamiento de hasta cinco tubos en su interior.

Los experimentos realizados en el banco de intercambiador de calor, permitieron establecer claramente que; en el caso de fallo por obstrucción o atascamiento de los tubos al interior del intercambiador de calor, la respuesta lógica del sistema, es una perdida, en la ganancia de temperatura en el agua de proceso, esta ganancia reducida, es una falla perjudicial al sistema productivo; al igual que el fallo número dos lectura anormal del instrumento, puesto que realmente el agua de proceso si está a la temperatura requerida, pero el controlador desconoce que ya alcanzo el valor requerido, esto hace que continúe trabajando para subir la temperatura.

El aporte científico más importante desarrollado en el presente proyecto es la formulación de una metodología híbrida de detección y diagnóstico de fallos, offline, basado en el análisis estadístico de residuales entre la planta modelo sin fallo y la planta real, evaluando hipótesis de medición; (hipótesis nula o de detección, hipótesis de fallo por obstrucción, hipótesis de fallo del instrumento e hipótesis de fallo desconocido) estableciendo de umbrales

de aceptación con rangos de confianza en condiciones aceptables, para fallos de obstrucción y atascamiento de tubos al interior del intercambiador de calor y lectura anormal del instrumento.

Basados en los alcances del proyecto de investigación, se generan nuevos caminos científicos de estudio para continuar con su aplicación, Ampliar los modelos híbridos de detección y diagnóstico de fallos en intercambiadores de calor; incorporar otros tipos de fallos al sistema de detección y diagnóstico de fallos, evaluar la presencia de fallos en otros componentes críticos estacionarios del banco de control de temperatura, como el tanque de almacenamiento y el sistema de tuberías, evaluar la posibilidad de detección de fallos incipientes en la presencia de eventos anormales de funcionamiento, la utilización de modelos basados en inteligencia artificial y clasificadores que mejoren los sistemas de diagnóstico, entre otros.

Uno de los propósitos principales del presente proyecto era realizar la detección de fallo, en un banco de control de temperatura y su equipo estacionario el intercambiador de calor; por medio del análisis de residuales estacionarios, se pudo identificar claramente, que bajo la comparación del análisis del valor medio de los residuales obtenidos entre la planta modelo sin fallo vs datos planta real sin fallos (RPMSFvsPRSF) con el valor medio de la planta modelo sin fallos con los datos de la planta real con los diferentes fallos, las variaciones son suficientes para estimar el tipo de fallo simulado, sin embargo queda fuera de los alcances del proyecto la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para la estimación del número de tubos obstruidos.

Bajo las condiciones técnicas de la investigación, se pudo comprobar que: para mejorar la identificación de la cantidad de tubos obstruidos presenta mayores retos de análisis, y la

aplicación de métodos de inteligencia artificial más exhaustivos o ciencia de datos para reducir el solapamiento de los datos en la información recolectada, tratando de despejar las áreas difusas entre ellas.

El enfoque de desarrollo metodológico permitió desarrollar la propuesta de implantación industrial, una metodología adaptable a sistemas reales, los cuales incrementarían la confiabilidad operacional industrial de los intercambiadores de calor de coraza y tubos, incidiendo en los tiempos de programación de mantenimientos preventivos y correctivos y minimizando las pérdidas monetarias referentes al tiempo de personal inactivo.

A nivel industrial, los equipos estacionarios críticos que están supervisados por métodos de detección y diagnóstico de fallos, presentan mejores niveles en la confiabilidad operacional industrial, al tener la capacidad de identificar eventos anormales no deseados en el funcionamiento debido a distintas causas e identificando que tipo de fallos están presentes; adicionalmente existe una reducción del tiempo de inactividad del equipo; apoya al sistema de mantenimiento predictivo asociado directamente con la planeación y programación de actividades; otro aspecto importante es la mejora de la seguridad y la optimización del rendimiento del equipo.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda, para mejorar o ampliar el alcance del presente proyecto de investigación, continuar con temas referentes a la detección de síntomas de obstrucción de tubos en cada una de las trayectorias, o pasadas del intercambiador de calor, de manera individual y no acumulativa como se realizó en el presente proyecto, adicionalmente, se



recomienda diseñar un experimento sobre el banco de control de temperatura, con las características de diagnóstico de fugas externas en el intercambiador de calor.

Es recomendable, desarrollar propuestas para futuras investigaciones basadas en los resultados obtenidos, enfocadas en profundizar en el uso de tecnologías de aprendizaje profundo y minería de datos, técnicas de inteligencia artificial para diseñar un sistema de diagnóstico capaz de identificar qué cantidad de tubos poseen obstrucción y atascamiento.

6 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ACIEM. (2012). *Glosario basico de terminos de mantenimiento en colombia*. Bogota-Colombia:

ACIEM.

Adam Medina, M., Escobar, R., Juarez Romero, D., Guerrero Ramirez, G., & Lopez Zapata, B. (2 de Agosto de 2013). DETECCIÓN DE FALLAS EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR, UTILIZANDO OBSERVADORES POR MODOS DESLIZANTES DE SEGUNDO ORDEN. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 12(2), 11 (327 - 336). Obtenido de amidiq@xanum.uam.mx

AENOR. (2002). *Norma española UNE-EN 13306 Terminologia del mantenimiento*. Madrid-España: ARNOR.

Ahn, B., Kim, J., & Choi, B. (12 de March de 2018). Artificial intelligence-based machine learning considering flow and temperature of the pipeline for leak early detection using acoustic emission. *Elsevier Ltd.*, 12.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.03.010>

Aranguren Zambrano, S., & Tarantino Alvarado, R. (2006). Criterios y lineamientos introductorios para el desarrollo y aplicación de sistemas de detección y diagnóstico de fallas. 2(8).

Balcells, J., & Romeral, J. L. (2005). *Automatas Programables*. BA: marcombo.
doi:ISBN:9788426710895

Bazovsky, I. (2013). *Reliability Theory and Practice*. Mineola, New York, United States of America: Dover Publications Incorporated.

Clemenza , M., & Brau , R. (2010). *Como desarrollar e implantar un sistema de mantenimiento*. Maracaibo, Venezuela: Astro Data S.A. doi:ISBN 978-980-12-4463-9

Crespo Márquez, A., Moreu de León, P., & Sánchez Herguedas, A. (2004). *Ingeniería de Mantenimiento, Técnicas y Metodos de aplicacion a la fase operativa de los equipos*. Madrid, eSPAÑA: AENORediciones. Obtenido de www.aenor.es

Creus Sole, A. (2010). *Instrimentacion Industrial*. Mexico: Alfaomega.

Duffuaa, S., Raouf, A., & Campbell, J. (2013). *Sistemas de mantenimiento planeacion y control*. Mexico D.F., Mexico: LimusaWILEY.

European Safety, Reliability & Data Association ESReDA. (1998).

Fidias, G. A. (1999). *El proyecto de investigación. (Tercera edición)*. . Caracas. : Episteme.

François Delmotte, M. D. (11 de July de 2013). Fouling detection in a heat exchanger: A polynomial fuzzy observer approach. *ELSEVIER*, 10.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.06.004>

Garcia, P. O. (Abril de 2014). *Reportero Industrial*. Obtenido de <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Tendencias-actuales-en-mantenimiento-industrial+97221>

Gastelbondo, B. W., Tarantino, A. R., & Aranguren, Z. S. (2007). Diseño de un sistema de deteccion y diagnóstico de fallas de alto impacto en calderas industriales de alta presion. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 7.

Giesecke, F., Mitchell, A., Spencer, H., Hill, I., Dygdon, J., Novak, J., & Lockhart, S. (2006).

Dibujo y Comunicacion Gráfica, Tercera Edicion. Mexico: PEARSON EDUCATION.

doi:ISBN: 970-26-0811-2

Gutierrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2008). *Analisis y diseño de experimentos,*

Segunda Edicion. Mexico: McGraw-Hill. doi:ISBN-13: 978-970-10-6526-6

Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. P. (2014). *METODOLOGÍA DE LA*

INVESTIGACION. Colombia: McGraw-hill. doi:ISBN 968-422-931-3

Higgins, L., Mobley, K., & Smith, R. (2002). *Maintenance Engineering Handbook Sixth Edition.*

New York: McGraw-Hill. doi:10.1036/0071394524

Himmelblau, D., & Riggs, J. (2012). *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*

(8th Edition).

Incropera, P. F., & DeWitt, P. D. (1996). *Fundamentos de Transferencia de Calor.* Mexico:

PRENTICE HALL.

Industries, S. A. (2021). *SITRANS T Sensores de temperatura SITRANS*

TS100/TS200/TS300/TS500/TSinsert/TSthermowell Instrucciones de servicio.

NÜRNBERG ALEMANIA: Siemens AG 2020.

IPN-ESLA-UZ. (s. f.). *Funciones de vulnerabilidad de tanques de almacenamiento ante*

acciones sismicas.

Iserman, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems, An Introduction from Fault Detection to Fault*

Tolerance. Berlin Heidelberg: Springer. doi:ISBN-13 978-3-540-24112-6

José Luis Casteleiro-Roca, H. J.-R.-L.-P. (28 de September de 2015). An intelligent fault detection system for a heat pump installation based on a geothermal heat exchanger.

ELSEVIER, 12. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jal.2015.09.007>

Juan C. Tudón Martínez, R. M. (september de 2015). Actuator Fault Diagnosis in a Heat Exchanger based on Classifiers - A Comparative Study. *ELSEVIER*, 6.

Knezevic, J. (1996). *Mantenibilidad*. Madrid: Isdefe.

Kuo, B. (1996). *Sistemas de control Automatico* (7a Edición ed.). Mexico: Prentice HALL PHH.
doi:ISBN 968-880-723-0

Lectura ISO 14224. (1999-07-15). *ISO 14224 1era. Edición. Industrias del Petróleo y del gas natural – Recolección e intercambio de información de confiabilidad y mantenimiento para equipo*. ISO Organización Internacional de Normalización.

Majid Karami, L. W. (21 de February de 2018). Fault detection and diagnosis for nonlinear systems: A new adaptive Gaussian mixture modeling approach. *Elsevier B.V.*, 12.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.032>

Mandal, A. K. (2006). *Introduction to control engineering. Modeling, analisis and desing*. Daryaganj, New Delhi: NEW AGE INTERNATIONAL (P) LIMITED, PUBLISHERS.

Mantenimiento Industrial. (s.f.). *ingenieriaindustrialonline*. Obtenido de
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/mantenimiento/>

Martínez Bencardino, C. (2012). *Estadística y Muestreo*. Bogotá: Biblioteca Nacional de Colombia. doi:ISBN 978-958-648-702-3

McDermott, R., Mikulak, R., & Beauregard, M. (2009). *The basics of FMEA, 2nd Edition*. New York: CRC Press Taylor & Francis Gr. doi:ISBN-13: 978-1-56327-377-3

Medina Adam, E. R. (2 de Agosto de 2013). Detección de fallas en un intercambiador de calor, utilizando observadores por modos deslizantes de segundo orden. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11.

Medina, A., Escobar, R. F., Juárez-Romero, D., Guerrero-Ramírez, G. V., & López-Zapata, B. (2013). *Detección de fallas en un intercambiador de calor, utilizando observadores por modos deslizantes de segundo orden*. Distrito Federal, México: Revista Mexicana de Ingeniería Química.

Mei ZHANG, B. D.-t. (2015). Actuator Fault Detection and Isolation via Input Reconstruction: Application to Intensified Heat Exchanger Reactor. *IEEE*, 6.

Mora, G. A. (2009). *Mantenimiento Planeacion, ejecucion y control*. Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II, Edicion en español*. 6 Deerfield Rd, Asheville, North Carolina, USA: Aladon LLC.

Mulan Pang, L. S. (2014). A Case Study: Monitoring Heat Exchanger Based on Vibration Sensors and Nondestructive Testing Technique. *IEEE*, 6. doi:978-1-4799-1406-7

Nachlas, J. A. (2005). *Reliability Engineering Probabilistic Models and Maintenance Methods*. Boca Raton London New York Singapore: Taylor & Francis Grup.

Nakajima, S. (1991). *Introduccion al TPM*. Madrid: Japan Intitute for Plant Maintenance.

Navaseelan Paul David, B. S. (2015). Modeling, Identification and Detection of Faults in Industrial Boiler. *IEEE*, 5. doi:978-1-4799-7758-1/15/\$31.00

Noria Corporation. (10 de Diciembre de 2014). *LUBLEARN*. Obtenido de <http://noria.mx/lublearn/causas-mas-comunes-de-falla-de-las-maquinas/>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna, Quinta edición*. Madrid - España.: PEARSON EDUCACIÓN.

Ojeda, L. R. (2007). *Probabilidad y estadística básica para ingenieros*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politécnica del litoral Instituto de Ciencias Matemáticas. doi:ISBN: 978-9942-922-02-1

Ortiz Moctezuma, M. (2015). *Sistemas Dinámicos en tiempo continuo. Modelado y Simulación*. Mexico: OmniaScience Scholar. doi:<http://dx.doi.org/10.3926/oss.25> ISBN: 978-84-944673-2-5

Osarenren, J. (2015.). *Integrated reliability Condition Monitoring and Maintenance of equipment*. New York. EEUU.: Taylor & Francis Group.

Peng Wang, R. X. (2017). Automated Performance Tracking for Heat Exchangers in HVAC. *IEEE*, 12. doi:10.1109/TASE.2017.2666184

Pullarcot, S. (2015). *Above Ground Storage Tanks, Practical Guide to Construction, Inspection, and Testing*. U.S.: Taylor & Francis Group.

Qianjun Mao, X. F. (20 de July de 2018). Chiller sensor fault detection based on empirical mode decomposition threshold denoising and principal component analysis. *Elsevier Ltd*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.104>

- Qingyang Lei, J. B. (2015). Dissipativity Based Fault Detection and Diagnosis for Linear Systems. *IEEE*, 6. doi:978-1-4799-7787-1/15/\$31.00
- Ramesh K. Shah, D. P. (2003). *Fundamentals of heat exchanger design*. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, Inc. doi:ISBN 0-471-32171-0
- Rodriguez Ojeda, L. (2007). *Probabilidad y Estadística Basica Para Ingenierios*. Guayaquil - Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral Instituto de Ciencias Matematicas. doi:ISBN: 978-9942-922-02-1
- Ruiz, M. A. (s. f.). *Gerencia Estrategica del Mantenimiento*. N. P: Coleccion Negocos, Empresas y Economia.
- SAE International. (2009). *SAE J1739 JAN2009*. Canada: SAE.
- Salazar, A. (22 de febrero de 2017). *Fierros Industrial*. Obtenido de <http://fierrosindustrial.com/noticias/tendencias-en-mantenimiento-industrial-debe-conocer/>
- Saldivar, S. M. (2008). *Estadística Descriptiva*. Mexico: Instituto Politecnico Nacional. doi:ISBN 978-970-36-0415-9
- Sanchis, L. R., Romero, P. J., & Ariño, L. C. (2010). *Automatización industrial*. n. f.: Publicacions de la Universitat Jaume I.
- SIEMENS. (s.f.). <https://cache.industry.siemens.com>. *Control Industrial CIRUS Columnas de señalizacion y lamparas Incorporadors*. Obtenido de <https://cache.industry.siemens.com>:

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/131/109758131/att_953626/v1/manual_SIRI_US_signal_columns_es-MX.pdf

Silva, A. P., & Orrego, B. J. (2014). *Confiabilidad en la practica Lo que un Gerente de confiabilidad debe saber. Primera Edición*. Barranquilla / Medellín - Colombia: Autores.

SINTEF Industrial Management;. (2002). *Offshore Reliability Data OREDA, 4th Edition*. Det Norske Veritas (DNV). doi:ISBN 82-14-02705-5

SMITH, C. A., & CORRIPIO, A. B. (2012). *CONTROL AUTOMATICO DE PROCESOS TEORIA Y PRACTICA*. MEXICO: LIMUSA WILEY.

Storch De Garcia, J. M. (1998). *Manual de seguridad industrial en plantas quimicas y petroleras*. Madrid: McGRAW-HILL.

Tanjin Amin, S. I. (26 de May de 2018). Process system fault detection and diagnosis using a hybrid technique. *Elsevier Ltd*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.045>

Tavares, L. (s. f.). *Administracion Moderna de Mantenimiento*. BRASIL: Novo Polo Publicaciones.

Torres., L. D. (2005). *Mantenimiento Su implementación y gestión*. ARGENTINA: UNIVERSITAS. doi:ISBN: 987-9406-81-8

Vara, H. A. (2012). *7 pasos para una tesis exitosa. (Tercera edición)*. Lima: Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias Administrativas y Recursos Humanos.

Venkat Venkatasubramanian, R. R. (22 de April de 2002). A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. doi:S 0 0 9 8 - 1 3 5 4 (0 2) 0 0 1 6 0 - 6

- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., & Kavuri, S. (2002). A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. *Computers y chemical engineering*, 19.
- Verde, C., Gentil, S., & Morales-Menendez, R. (2013). *Monitoreo y Diagnóstico Automatico de Fallas en Sistemas Dinamicos*. Mexico: trillas.
- Villajulca, J. (31 de 10 de 2019). *instrumentacionycontrol.net*. (instrumentacionycontrol.net) Recuperado el 25 de 11 de 2022, de <https://instrumentacionycontrol.net/sintonizacion-de-controladores-por-metodo-heuristico-prueba-y-error/>
- Villajulca, J. (31 de 10 de 2019). *instrumentacionycontrol.net*. Obtenido de <https://instrumentacionycontrol.net/sintonizacion-de-controladores-por-metodo-heuristico-prueba-y-error/>
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Mexico: PEARSON EDUCATION. doi:ISBN: 978-607-32_1417-9
- Walter, G. B., Rocco, T. A., & Sandra, A. Z. (2007,). DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCION Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS DE ALTO IMPACTO EN CALDERAS INDUSTRIALES DE ALTA PRESION. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. doi:ISSN: 1692-7257
- Xufeng Zhu, L. S. (2014). Preliminary Exploration: Fault Diagnosis of the Circulating-water Heat Exchangers based on Sound Sensor and Non-destructive Testing Technique. *IEEE*, 5. doi:978-1-4799-1406-7



Yang Zhao, F. X. (7 de November de 2013). An intelligent chiller fault detection and diagnosis methodology using Bayesian belief network. *ELSEVIER*, 11.

doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.007>

Zambrano, C. S., Tarantino, A. R., Aranguren, Z. S., & Agudelo, G. C. (2012). Metodología para identificación de fallos críticos en procesos industriales basada en técnicas de confiabilidad operacional. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 8.

Zambrano, M. (2013). *Gestión ambiental en programas de integridad de oleoductos*. Bogota: UNIVERSIDAD LIBRE.

Zambrano, R. S., & Leal, S. L. (2006). *Fundamentos basicos de mantenimiento*. San Cristobal Venezuela.: FEUNET.

Zampolli, M. (2012). *Guía básica para la implementación de la gestión de activos en empresas de energía*. International Copper Association.

Ze-tao LI, M. Z. (2016). Actuator Gain Fault Diagnosis for Heat-exchanger/reactor. 6. doi:978-1-4673-7189-6/15/\$31.00

Zhu Lei, G. Z. (2016). Fault Diagnosis of a Cooling Package for AECS Based on Principal Component Analysis. *IEEE*, 8. doi:978-1-4673-8554-1/151\$31.00



ANEXOS

Anexo A. Sistema de codificación alfanumérico

El sistema de codificación diseñado para el presente banco de control de temperatura está identificado por cinco caracteres alfanuméricos, estos caracteres están agrupados de la siguiente forma:

Tabla 44. Sistema de codificación alfanumérico.

Sistema					Característica
X	XX	X	-	XX	
					Subcomponente
					Separador
					Numero consecutivo de dicho componente
					Nombre del componente
					Sistema al que pertenece el componente

En la tabla 6, se discrimina la nomenclatura de los dos primeros dígitos del sistema de codificación, estos representan el sistema al que pertenece el equipo, instrumento o componente y tiene la siguiente nomenclatura:

Tabla 45. Nomenclatura de los sistemas del banco de control de temperatura.

No	Sistema del banco de control de temperatura	Nomenclatura
1	Sistema de Agua de Proceso	P
2	Sistema de Agua de Recirculación	R
3	Sistema de Bancada o Marco	B
4	Sistema de Control e Instrumentación,	C
5	Sistema Eléctrico	E

En la tabla 7, se discrimina la nomenclatura del segundo grupo de dígitos del sistema de codificación, estos representan el nombre del equipo, instrumento o componente o accesorio y tiene la siguiente nomenclatura:

Tabla 46. Nomenclatura de los Equipos, Instrumentos o Componentes

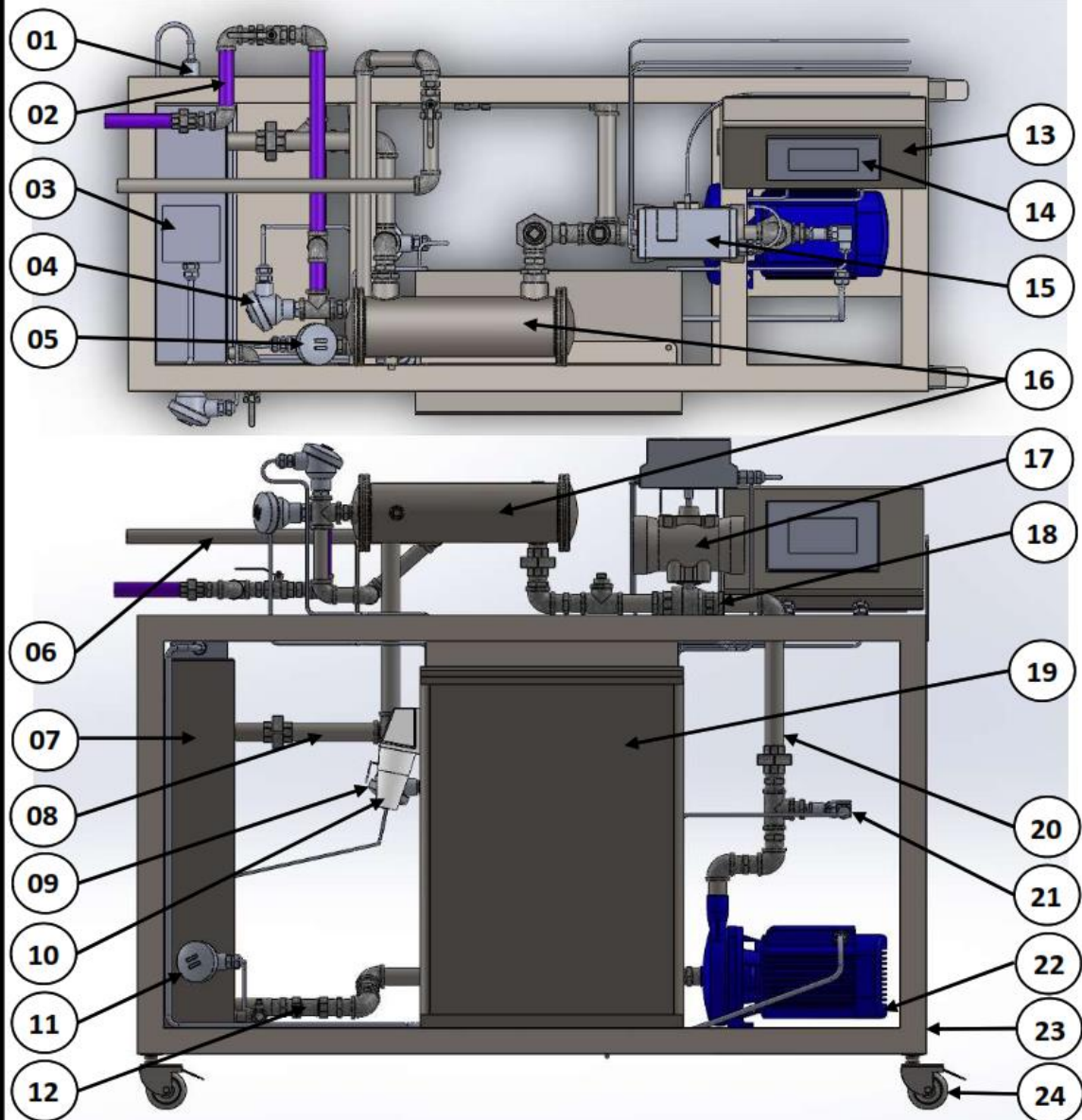
No	Equipo, Instrumento, o Componente	Cód.	No	Equipo, Instrumento, o Componente	Cód.
1	Actuador Neumático	AN	22	Modulo Señales Analógicas SM 1234	MA
2	Barra Móvil	BM	23	Módulo Switch Industrial Ethernet	ME
3	Bornera	BO	24	Motobomba	MB
4	Bornes Auxiliares de Conexión	BA	25	Pantalla HMI 7 in	PH
5	Calentador Eléctrico	CE	26	PLC S71200 CPU 1214C DC/DC/DC	PL
6	Cajón Eléctrico	CL	27	Posicionador	PO
7	Contactador Principal	CP	28	Protección Cableado	PD
8	Contactador Auxiliar 3RH19	CA	29	Relé de Protección Estático 3RF11	RP
9	Estructura Base	EB	30	Ruedas de Seguridad	RS
10	Filtro CEM Micromaster 4 3CC02	FC	31	Sensor de Nivel LVL100	LT
11	Fuente de Alimentación PM 1207	FA	32	Sensor de Presión	PT
12	Guarda Motor 3RV10	GM	33	Soporte Bajo de la Válvula	SB
13	Intercambiador de Calor	IC	34	Soporte Cajón eléctrico	SC
14	Interruptor Termomagnético 5SX1	IX	35	Soporte Tipo J J018	SJ
15	Interruptor Termomagnético 5SY6	IY	36	Tanque de almacenamiento	TA
16	Línea de Agua de Entrada	LE	37	Tapa Frontal Pantalla HMI	TF
17	Línea de Agua de Proceso	LP	38	Tapa Posterior Pantalla HMI	TP
18	Línea de Alta presión	LA	39	Termopar RTD PT100	TT
19	Línea de Desagüe	LD	40	Válvula 1.25 in 1000 WOG	FV
20	Línea de Retorno	LR	41	Variador de Velocidad SIMATICS V20	VV
21	Línea de Succión	LS			

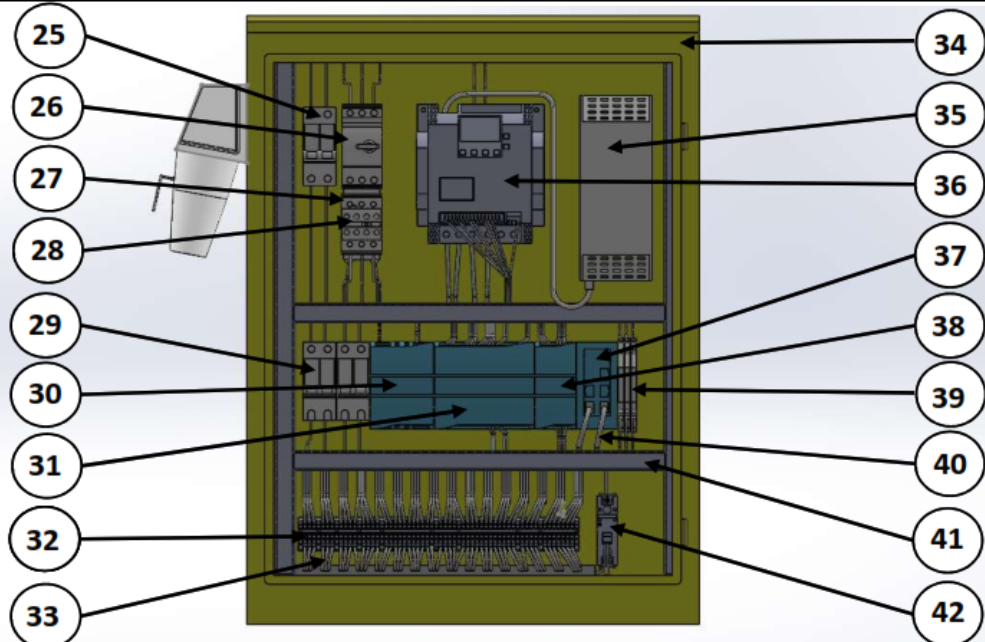
Anexo B. Listado general de codificación

No	Sistema de	Equipo, Instrumento, o Componente	Cód.	No	Sistema de	Equipo, Instrumento, o Componente	Cód.
1	Agua de Proceso	Línea de Agua de Entrada	PLE1	22	Control e Instrumentación	Filtro CEM Micromaster 4 3CC02	CFC1
2	Agua de Proceso	Línea de Agua de Proceso	PLP1	23	Control e Instrumentación	Fuente de Alimentación PM 1207	CFA1
3	Agua de Recirculación	Actuador Neumático	RAN1	24	Control e Instrumentación	Modulo Señales Analógicas SM 1234	CMA1
4	Agua de Recirculación	Calentador Eléctrico	RCE1	25	Control e Instrumentación	Módulo Switch Industrial Ethernet	CME1
5	Agua de Recirculación	Intercambiador de Calor	RIC1	26	Control e Instrumentación	Pantalla HMI 7 in	CPH1
6	Agua de Recirculación	Línea de Alta Presión	RLA1	27	Control e Instrumentación	PLC S71200 CPU 1214C DC/DC/DC	CPL1
7	Agua de Recirculación	Línea de Desagüe	RLD1	28	Control e Instrumentación	Sensor de Nivel LVL100	CLT1/2
8	Agua de Recirculación	Línea de Retorno	RLR1	29	Control e Instrumentación	Sensor de Presión	CPT1
9	Agua de Recirculación	Línea de Succión	RLS1	30	Control e Instrumentación	Termopar RTD PT100	CTT1/4
10	Agua de Recirculación	Motobomba	RMB1	31	Control e Instrumentación	Variador de Velocidad SIMATICS V20	CVV1
11	Agua de Recirculación	Posicionador	RPO1	32	Eléctrico	Bornera	EBO1
12	Agua de Recirculación	Soporte Bajo de la Válvula	RSB1	33	Eléctrico	Bornes Auxiliares de Conexión	EBA1
13	Agua de Recirculación	Soporte Tipo J J018	RSJ1	34	Eléctrico	Cajón Eléctrico	ECE1
14	Agua de Recirculación	Tanque de Almacenamiento	RTA1	35	Eléctrico	Contactador Principal	ECP1
15	Agua de Recirculación	Válvula 1.25 in 1000 WOG	RFV1	36	Eléctrico	Contactador Auxiliar 3RH19	ECA1
16	Bancada o Marco	Barra Móvil	BBM1	37	Eléctrico	Guarda Motor 3RV10	EGM1
17	Bancada o Marco	Estructura Base	BEB1	38	Eléctrico	Interruptor Termomagnético 5SX1	EIX1
18	Bancada o Marco	Ruedas de Seguridad	BRS1	39	Eléctrico	Interruptor Termomagnético 5SY6	EIY1
19	Bancada o Marco	Soporte Cajón Eléctrico	BSC1	40	Eléctrico	Protección Cableado	EPD1
20	Bancada o Marco	Tapa Frontal Pantalla HMI	BTF1	41	Eléctrico	Relé de Protección Estático 3RF11	ERP1
21	Bancada o Marco	Tapa Posterior Pantalla HMI	BTP1				

Anexo C. Hoja de registro de la máquina.

HOJA DE REGISTRO DE LA MAQUINA				CODIGO	FGD-01 V.01					
				PAGINA	1 de 6					
BANCO DE LABORATORIO		BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA								
1.0 IMAGEN DEL BANCO										
										
2.0 DATOS TECNICOS PRINCIPALES										
Peso (Aprox.)	2000 N - (198,5 Kg)			Cantidad	1					
Peso tanque lleno	2390 N - (243,6 Kg)			Fabricante	Sensomatic del Oriente SAS					
Dimensiones	Maximas (Aprox.)			Modelo	Unico					
Altura	900 mm - (0,9 m)			Año de Fabricacion	2014					
Ancho	1500 mm - (1,5 m)			Año de Instalacion	2015					
Profundidad	600 mm - (0,6 m)			Costo	160000000					
Material del Marco	Acero AISI 5118			Recubrimiento	Niquelado Pintura Aceite					
3.0 DESCRIPCION TECNICA DEL BANCO										
El banco de control de temperatura, fue instalado en el año 2015, es un equipo de laboratorio diseñado para el desarrollo de practica de control de temperatura en un tanque de almacenamiento. prácticas de cálculo de la eficiencia del intercambiador de calor, practica de control de la temperatura del agua de alimentación, practica de identificación y modelado de equipos estacionarios y practica de identificación y modelado de instrumentos de medición Tiene unas dimensiones aproximadas de 1500x900x600 mm (Ancho x Alto x Profundo) y un peso estimado de 2390 N(250 Kg). El banco cuenta con una motobomba de 2 HP la cual hace circular el agua del proceso del tanque de almacenamiento, empujándola hacia el intercambiador de calor y finalmente por la línea de retorno, una electro-válvula realiza el control del flujo del agua de proceso. El equipo cuenta con un sistema de control e instrumentación, que toma las variables de, presión y temperatura, envía los datos a un PLC y este efectúa todas las acciones de control correspondientes, una pantalla HMI, permite realizar los ajustes y diferentes procesos en el equipo. El banco requiere de tres fuentes diferentes de alimentación, 1. un caudal de agua de alimentación constante, 2. una línea neumática con presión de aire constante (para el movimiento de la electroválvula) y 3. un sistema de flujo eléctrico 110 Voltios en corriente alterna para el funcionamiento.										
4.0 INSUMOS DE ENTRADA										
Item	1	Descripción	AGUA DE INGRESO							
	Temperatura	24 °C	max	18° C	min	Caudal	7 L/min	max	4 L/min	min
Item	2	Descripción	AIRE COMPRIMIDO							
	Presion	7 bar	max	1,5 bar	min	Temperatura	80 °C	max	- 30°C	min
Item	3	Descripción	ENERGIA ELECTRICA							
	Tension	220 Voltios	Corriente	7 Amperios		Frecuencia	60 Hz			

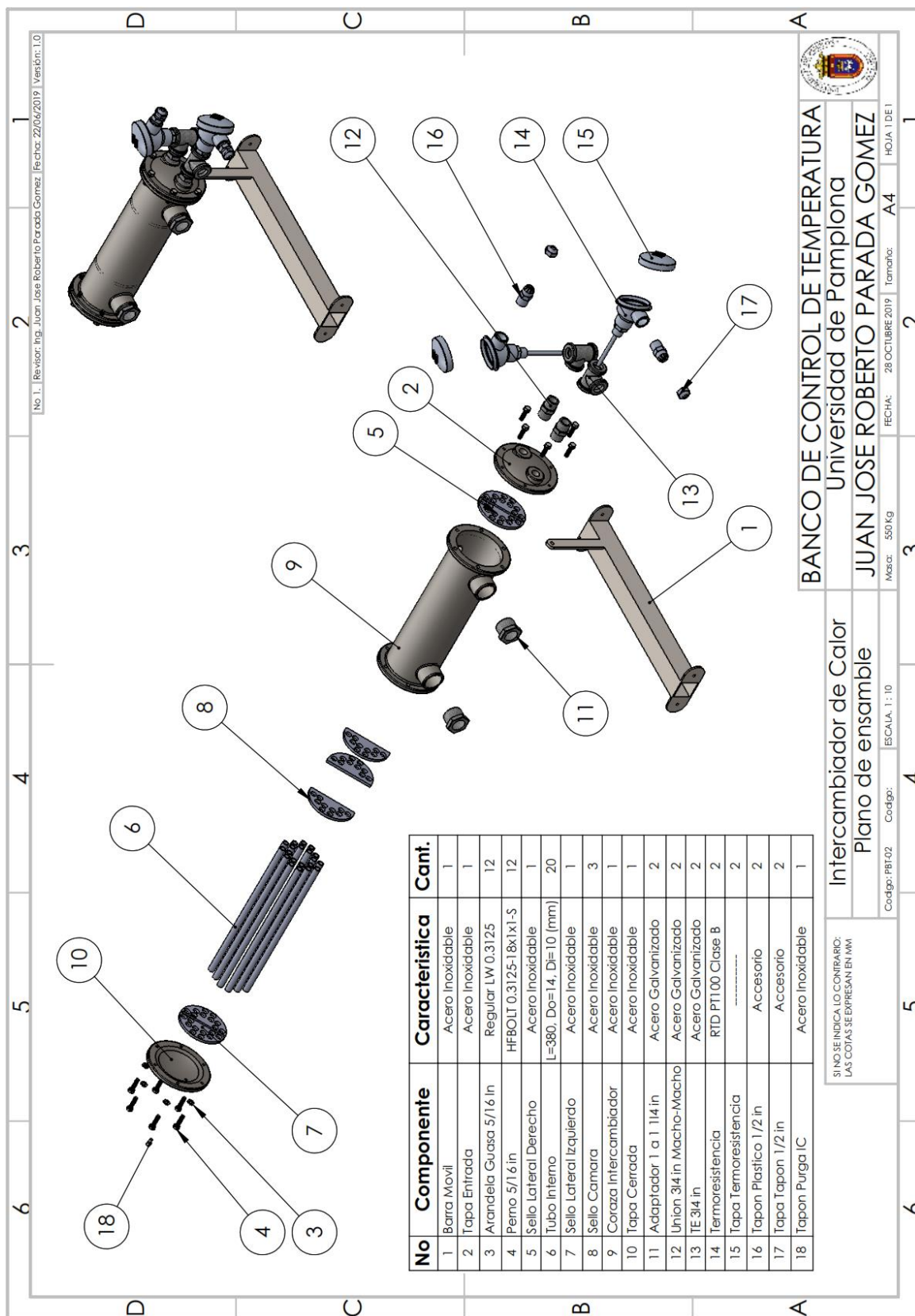
HOJA DE REGISTRO DE LA MAQUINA		CODIGO	FGD-01 V.01
		PAGINA	2 de 6
BANCO DE LABORATORIO	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA		
5.0 COMPONENTES PRINCIPALES DEL BANCO			
			
01. Sensor de Nivel LVL100	07. Tanque de Almacenamiento	13. Protector HMI	19. Cajon Electrico
02. L. Agua de Eentrada	08. Linea de Retorno	14. Pantalla HMI KTP 700	20. Linea de Alta presion
03. Calentador Electrico	09. Sensor de Temperatura TT102	15. Actuador Neumatico	21. Sensor de Presion
04. Sensor de Temperatura TT104	10. Protector Cableado	16. Intercambiador de calor	22. Motobomba
05. Sensor de Temperatura TT103	11. Sensor de Temperatura TT101	17. Posicionador	23. Estructura Base
06. L. Agua de Proceso	12. Linea de Succion	18. Valvula WOG 1.25in	24. Ruedas de seguridad

HOJA DE REGISTRO DE LA MAQUINA		CODIGO	FGD-01 V.01				
		PAGINA	3 de 6				
BANCO DE LABORATORIO	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA						
5.1 COMPONENTES ELECTRICOS Y ELECTRONICOS DEL BANCO							
							
25. Interruptor Termomagnetico	30. Fuente de poder PLC	35. Filtro CEM Micromaster	40. Cable ETHERNET				
26. Guarda Motor	31. PLC S7 1200	36. Variador de velocidad	41. Regleta				
27. Contactor Principal	32. Bornera	37. Switch Industrial Ethernet	42. Rele Proteccion Estatico				
28. Contactor auxiliar	33. Cableado	38. Modulo de señales analogicas					
29. Interruptor	34. Cajón Eléctrico	39. Borne de conexión auxiliar					
6.0 DESAGREGACION DEL BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA							
Item	SISTEMA	COMPONENTE	Cant	MARCA	REFERENCIA	Tipo	Codigo
1	Control e Instrumen	Sensor de Nivel LVL100	2	SIEMENS	SISTRANS LVL100	Instrumento	CLT1/2
2	Agua de Proceso	L. Agua de Eentrada	1	-----	Acero Galvanizado 3/4 in.	Hidraulico	PLE1
3	Agua de Recirculaci	Calentador Electrico	1	-----	Aleacion Niquel-Cromo	Termico	RCE1
4	Control e Instrumen	Sensor de Temperatura TT104	1	SIEMENS	SISTRANS TH100 Slim (PT100)	Instrumento	CTT4
5	Control e Instrumen	Sensor de Temperatura TT103	1	SIEMENS	SISTRANS TH100 Slim (PT100)	Instrumento	CTT3
6	Agua de Proceso	L. Agua de Proceso	1	-----	Acero Galvanizado 3/4 in.	Hidraulico	PLP1
7	Agua de Recirculaci	Tanque de Almacenamiento	1	-----	Acero inoxidable	Estatico	RTA1
8	Agua de Recirculaci	Linea de Retorno	1	-----	Acero Galvanizado 1 in.	Hidraulico	RLR1
9	Control e Instrumen	Sensor de Temperatura TT102	1	SIEMENS	SISTRANS TH100 Slim (PT100)	Instrumento	CTT2
10	Eléctrico	Protector Cableado	1	-----	Comercial	Electrico	EPD1
11	Control e Instrumen	Sensor de Temperatura TT101	1	SIEMENS	SISTRANS TH100 Slim (PT100)	Instrumento	CTT1
12	Agua de Recirculaci	Linea de Succion	1	-----	Acero Galvanizado 1 in.	Hidraulico	RLS1
13	Bancada o Marco	Protector HMI	1	-----	Acero inoxidable	Mecanico	BTF1

HOJA DE REGISTRO DE LA MAQUINA					CODIGO	FGD-01 V.01	
					PAGINA	4 de 6	
BANCO DE LABORATORIO		BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA					
6.0 DESAGREGACION DEL BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA (Continua)							
Item	SISTEMA	COMPONENTE	Cant	MARCA	REFERENCIA	Tipo	Codigo
14	Control e Instrumen	Pantalla HMI KTP 700	1	SIEMENS	SIMATIC HMI KTP 700	Control	CPH1
15	Agua de Recirculaci	Actuador Neumatico	1	Prismo	R15	Nehumatico	RAN1
16	Agua de Recirculaci	Intercambiador de calor	1	-----	Tipo U; 20 T internos	Mecanico	RIC1
17	Agua de Recirculaci	Posicionador	1	o BRAY	Series 6A	Nehumatico	RPO1
18	Agua de Recirculaci	Valvula WOG 1.25in	1	-----	Válvula 1.25 in 1000 WOG	Hidraulico	RFV1
19	Electrico	Cajon Electrico	1	-----	Metalico	Electrico	ECE1
20	Agua de Recirculaci	Linea de Alta presion	1	-----	Acero Galvanizado 1 in.	Hidraulico	RLA1
21	Control e Instrumen	Sensor de Presion	1	SIEMENS	SISTRANS P200	Instrumento	CPT1
22	Agua de Recirculaci	Motobomba	1	PEDROLLO	CP 660 2 HP.	Hidraulico	RMB1
23	Bancada o Marco	Estructura Base	1	-----	Acero Inoxidable	Mecanico	BEB1
24	Bancada o Marco	Ruedas de seguridad	1	-----	Comercial	Mecanico	BRS1
25	Electrico	Interruptor Termomagnetico	1	SIEMENS	SIRIUS DIN 5SY6	Electrico	EIY1
26	Electrico	Guarda Motor	1	SIEMENS	SIRIUS 3RV10	Electrico	EGM1
27	Electrico	Contactador Principal	1	SIEMENS	SIRIUS 3RH1921	Electrico	ECP1
28	Electrico	Contactador Auxiliar	1	SIEMENS	Contactador Auxiliar 3RH19	Electrico	ECA1
29	Electrico	Interruptor	2	SIEMENS	SIRIUS 5SX1	Electrico	EIX1
30	Control e Instrumen	Fuente de poder PLC	1	SIEMENS	Fuente de Alimen PM 1207	Control	CFA1
31	Control e Instrumen	PLC S7 1200	1	SIEMENS	PLC S7-1200 1214C DCDCDC	Control	CPL1
32	Electrico	Bornera	1	SIEMENS	Comercial	Electrico	EBO1
35	Control e Instrumen	Filtro CEM Micromaster	1	SIEMENS	Micromaster 4 3CC02	Control	CFC1
36	Control e Instrumen	Variador de velocidad	1	SIEMENS	SINAMICS V20	Control	CVV1
37	Control e Instrumen	Switch Industrial Ethernet	1	SIEMENS	SCALE XB00	Control	CME1
38	Control e Instrumen	Modulo de señales analogicas	1	SIEMENS	SM 1234	Control	CMA1
39	Electrico	Borne de conexión auxiliar	1	SIEMENS	Comercial	Electrico	EBA1
42	Electrico	Rele Proteccion Estatico	1	SIEMENS	SIRIUS 3RF21	Electrico	ERP1
7.0 DESAGREGACION DE LOS PRINCIPALES EQUIPOS DEL BANCO							
7.1. EQUIPO: INTERCAMBIADOR DE CALOR - RIC1							
Item	SUB -COMPONENTE	SISTEMA	Cant	MARCA	REFERENCIA	Tipo	No Plano
1	Adaptador 1 a 1 1/4 in	Accesorio	2	No Refiere	Acero Galvanizado	Accesorio	PBT-02 (11)
2	Arandela Guasa	Accesorio	12	No Refiere	5/16 In Regular LW 0.3125	Mecanica	PBT-02 (3)
3	Coraza Intercambiador	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Termico	PBT-02 (9)
4	Perno 5/16 in	Accesorio	12	No Refiere	HFBOLT 0.3125-18x1x1-S	Mecanica	PBT-02 (4)
5	Sello Cámara	Recirculacion	3	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanica	PBT-02 (8)
6	Sello Lateral Derecho	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanica	PBT-02 (5)
7	Sello Lateral Izquierdo	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanica	PBT-02 (7)
8	Tapa Cerrada	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanica	PBT-02 (10)
9	Tapa Entrada	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanica	PBT-02 (2)
10	Tapón Purga IC	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanica	PBT-02 (18)
11	Termoresistencia	Control	3	SIEMENS	RTD PT100 Clase B	Instrumento	PBT-02 (14)
12	Tubo Interno	Proceso	20	No Refiere	L=380, Do=14, Di=10 (mm)	Termico	PBT-02 (6)
13	Unión 3/4 In Macho-Macho	Accesorio	2	No Refiere	Acero Galvanizado	Accesorio	PBT-02 (12)

HOJA DE REGISTRO DE LA MAQUINA					CODIGO	FGD-01 V.01	
					PAGINA	5 de 6	
BANCO DE LABORATORIO		BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA					
7.2. EQUIPO: TANQUE DE ALMACENAMIENTO - RTA1							
Item	SUB -COMPONENTE	SISTEMA	Cant	MARCA	REFERENCIA	Tipo	No Plano
	Aislante	Recirculacion	1	No Refiere	Corcho	Termico	PBT-03 (5)
	Base Inferior de la Resistencia	Recirculacion	1	No Refiere	Aleacion de Bronce	Mecanico	PBT-03 (4)
	Base Superior de la Resistenc	Recirculacion	1	No Refiere	Aleacion de Bronce	Mecanico	PBT-03 (3)
	Cajetin Electrico	Recirculacion	1	Comercial	Comercial de 12X12 cm.	Termico	PBT-03 (12)
	Perno #10	Accesorio	2	No Refiere	HLSCREW 0,1900x1	Mecanico	PBT-03 (2)
	Resistencia Electrica	Recirculacion	1	No Refiere	Alambre niquel-cromo	Termico	PBT-03 (6)
	Sensor de Nivel	Control	2	SIEMENS	SISTRANS LVL100	Instrumento	PBT-03 (10)
	Tanque de Almacenamiento	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanico	PBT-03 (1)
	Tapa Cajetin	Recirculacion	1	No Refiere	Comercial	Termico	PBT-03 (13)
	Tapa Tanque	Recirculacion	1	No Refiere	Acero Inoxidable	Mecanico	PBT-03 (11)
	Termoresistencia	Control	1	SIEMENS	RDT PT 100	Instrumento	PBT-03 (8)
	UNION 1 in Hembra Hembra	Accesorio	1	No Refiere	Acero Galvanizado	Mecanico	PBT-03 (7)
8.0 LISTADO GENERAL DE ACCESORIOS, TUBOS Y PERNOS							
Item	Sistema	Accesorio	Cant	Caracteristica		Componente	
1	Bancada o Marco	Arandela #10 BM	4	Narrow FW 0.19		Barra Móvil	
2	Bancada o Marco	Perno #10 Tirafondo BM	4	HLSCREW 0.1900x1		Barra Móvil	
3	Control	Arandela 1/4 HMI	6	FLAT 0.25-0.688		Tapa Posterior HMI	
4	Control	Perno 1/4 HMI	6	HFBOLT 0.25-20x1x1-S		Tapa Posterior HMI	
5	Electrico	Arandela #10 CE	3	Narrow FW 0.19		Cajón Eléctrico	
6	Electrico	Arandela 1/4 Cajon Elec	3	FLAT 0.25-0.688		Cajón Eléctrico	
7	Electrico	Perno #10 Tirafondo CE	3	HLSCREW 0.1900x1		Cajón Eléctrico	
8	Electrico	Perno 1/4 Cajon Elect	3	HFBOLT 0.25-20x1x1-S		Cajón Eléctrico	
9	Proceso	Codo 90° 3/4in	5	Material Acero Galvanizado		Línea de Agua de Entrada	
10	Proceso	TE 3/4in	1	Material Acero Galvanizado		Línea de Agua de Entrada	
11	Proceso	Tubería 3/4in	6	Lon. 550/470/85/80/80/25 mm		Línea de Agua de Entrada	
12	Proceso	Unión 3/4in M-M	2	Material Acero Galvanizado		Línea de Agua de Entrada	
13	Proceso	Válvula de globo 3/4in	1	Material Bronce		Línea de Agua de Entrada	
14	Proceso	Codo 90° 3/4in	5	Material Acero Galvanizado		Línea de Agua de Proceso	
15	Proceso	TE 3/4in	1	Material Acero Galvanizado		Línea de Agua de Proceso	
16	Proceso	Tubería 3/4in	5	Lon. 330/110/90/75/25 mm		Línea de Agua de Proceso	
17	Proceso	Unión 3/4in H-H	1	Material Acero Galvanizado		Línea de Agua de Proceso	
18	Proceso	Unión 3/4in M-M	4	Material Acero Galvanizado		Línea de Agua de Proceso	
19	Proceso	Válvula de globo 3/4in	1	Material Bronce		Línea de Agua de Proceso	
20	Recirculación	Guasa 5/16	12	Regular LW 0.3125		Intercambiador de Calor	
21	Recirculación	Perno 5/16 Intercambia	12	HFBOLT 0.3125-18x1x1-S		Intercambiador de Calor	
22	Recirculación	Adaptador de 1 - 1 1/4 in	3	Material Acero Galvanizado		Línea de Alta Presión	
23	Recirculación	Adaptador de 1 - 3/4 in	1	Material Acero Galvanizado		Línea de Alta Presión	
24	Recirculación	Codo 90° 1in	4	Material Acero Galvanizado		Línea de Alta Presión	
25	Recirculación	Tapón 1in	2	Material Acero Galvanizado		Línea de Alta Presión	

HOJA DE REGISTRO DE LA MAQUINA				CODIGO	FGD-01 V.01
				PAGINA	6 de 6
BANCO DE LABORATORIO		BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA			
8.0 LISTADO GENERAL DE ACCESORIOS, TUBOS Y PERNOS					
Item	Sistema	Accesorio	Cant	Característica	Componente
26	Recirculación	TE 1 in	3	Material Acero Galvanizado	Línea de Alta Presión
27	Recirculación	Tubería 1in	4	Lon. 250/80/80/25 mm	Línea de Alta Presión
28	Recirculación	Unión 1in H-H	2	Material Acero Galvanizado	Línea de Alta Presión
29	Recirculación	Unión 1in M-M	7	Material Acero Galvanizado	Línea de Alta Presión
30	Recirculación	Codo 90° 1/2 in	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Desagüe
31	Recirculación	Unión 1/2 in M-M	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Desagüe
32	Recirculación	Válvula de Globo 1/2 in	1	Material Bronce	Línea de Desagüe
33	Recirculación	Adaptador de 1 - 1 1/4 in	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Retorno
34	Recirculación	Codo 90° 1in	2	Material Acero Galvanizado	Línea de Retorno
35	Recirculación	TE 1 in	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Retorno
36	Recirculación	Tubería 1in	3	Lon. 360/175/160 mm	Línea de Retorno
37	Recirculación	Unión 1in H-H	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Retorno
38	Recirculación	Unión 1in M-M	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Retorno
39	Recirculación	Codo 90° 1in	4	Material Acero Galvanizado	Línea de Succión
40	Recirculación	Tapón 1in	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Succión
41	Recirculación	Tubería 1in	3	Lon. 125/170/180 mm	Línea de Succión
42	Recirculación	Unión 1in H-H	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Succión
43	Recirculación	Unión 1in M-M	5	Material Acero Galvanizado	Línea de Succión
44	Recirculación	Válvula de Globo 1in	1	Material Bronce	Línea de Succión
45	Recirculación	YE 45° 1in	1	Material Acero Galvanizado	Línea de Succión
46	Recirculación	Arandela 3/8 MotoBom	2	FLAT 0.375-0.875	Motobomba
47	Recirculación	Perno 3/8 MotoBomba	2	HFBOLT 0.375-16x1.75x1-S	Motobomba
48	Recirculación	Tuerca 3/8 MotoBomba	2	NUT 1972 0.3750-24-N	Motobomba
49	Recirculación	Perno #10	2	HLSCREW 0.1900x1	Tanque de Almacena
50	Recirculación	Tirafondo 1/4	2	AS-NZS 4407-ST4.2x16-C-H-N	Tanque de Almacena
51	Varios	Tapa-Tapon y Tuerca	19	Plastico	Varios
9.0 DATOS DEL FABRICANTE					
Nombre:	Sensomatic del Oriente SAS			Telefono:	009(7)6434400
Direccion:	Carrera 25 No. 40a-08 Bucaramanga - Santander / Colombia.				
Correo Elect:	-----	Url:	http://www.sensoriente.com/		
10.0 APROBACION Y REFERENCIA					
Elaboro:	JUAN JOSE ROBERTO PARADA G.		Aprobado por:	JOSE MANUEL RAMIREZ QUINTERO	
Titulo:	Ingeniero Mecanico		Titulo:	Ingeniero Mecanico	
Fecha:	1/06/2019		Fecha:		



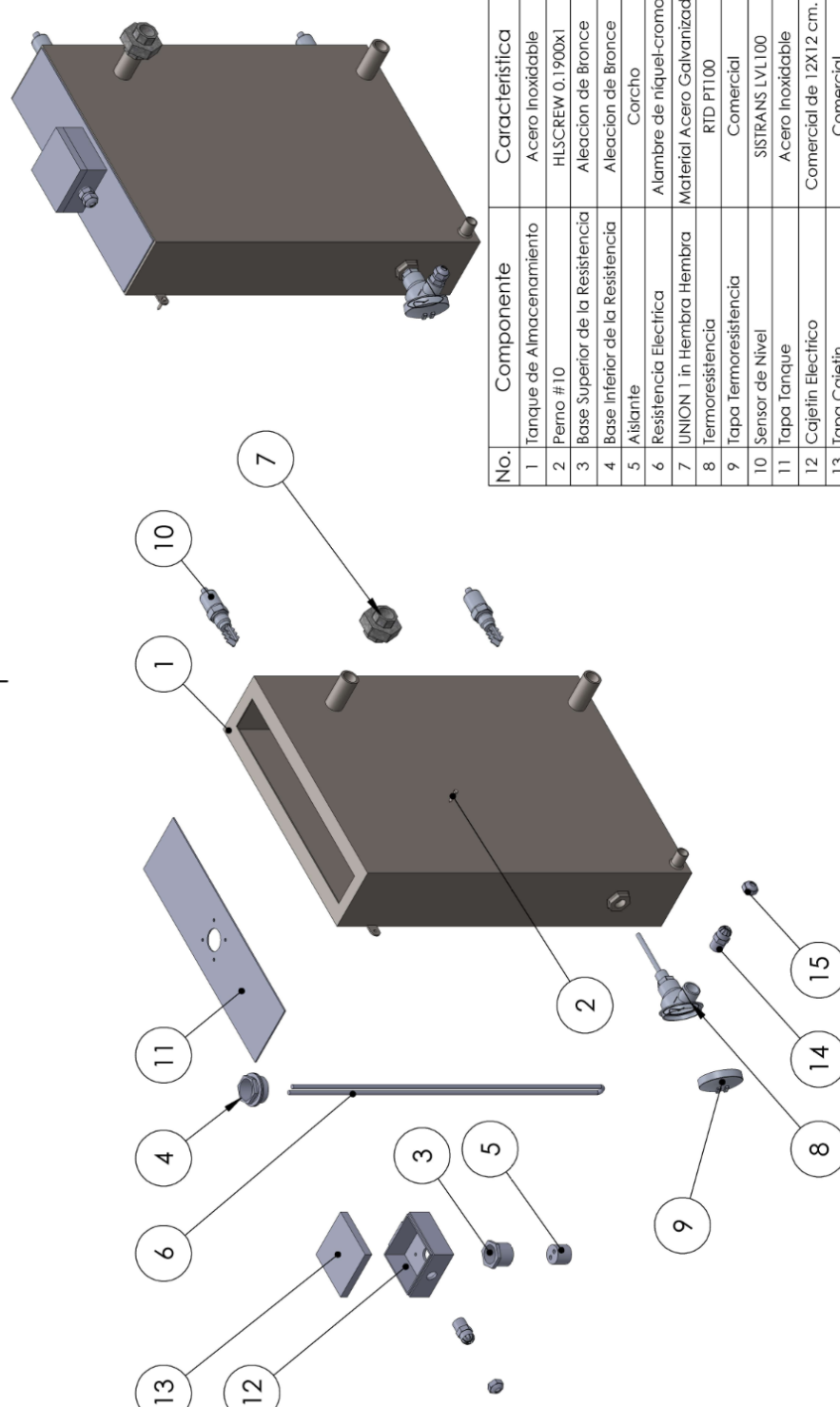
BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA
Universidad de Pamplona
JUAN JOSE ROBERTO PARADA GOMEZ

Masa: 550 Kg
FECHA: 28 OCTUBRE 2019
Tamaño: A4
HOJA 1 DE 1

Intercambiador de Calor
Plano de ensamble

Código: PBT-02
Escala: 1:10
Código: 4

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM



No.	Componente	Característica	Cant
1	Tanque de Almacenamiento	Acero Inoxidable	1
2	Perno #10	HLSCREW 0.1900x1	1
3	Base Superior de la Resistencia	Aleacion de Bronce	1
4	Base Inferior de la Resistencia	Aleacion de Bronce	1
5	Aislante	Corcho	1
6	Resistencia Electrica	Alambre de niquel-cromo	1
7	UNION 1 in Hembra Hembra	Material Acero Galvanizado	1
8	Termoresistencia	RTD PT100	1
9	Tapa Termoresistencia	Comercial	1
10	Sensor de Nivel	SISTRANS LVL100	2
11	Tapa Tanque	Acero Inoxidable	1
12	Cajetin Electrico	Comercial de 12X12 cm.	1
13	Tapa Cajetin	Comercial	1
14	Tapon Plastico 1/2 in	Comercial 1/2 in.	2
15	Tapon Tapon 1/2 in	Comercial 1/2 in.	2

Tanque de Almacenamiento

Plano de ensamble

BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA

Universidad de Pamplona

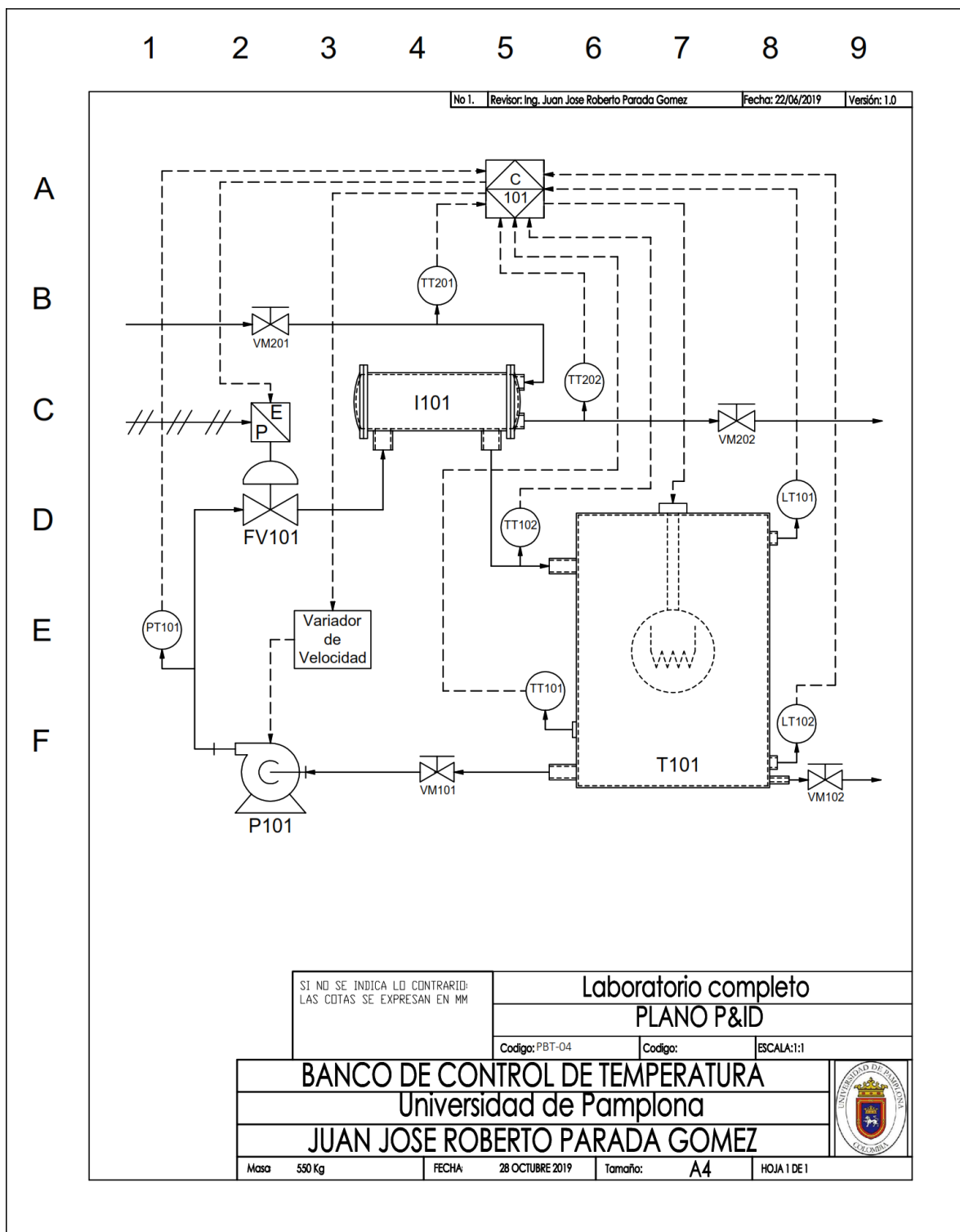
JUAN JOSE ROBERTO PARADA GOMEZ

Si NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

Código: PBT-03 Código: ESCALA-150

Masa: 550 Kg

FECHA: 28 OCTUBRE 2019 Talla: A4 HOJA 1 DE 1



Anexo E. FGD-02 Hoja de registro Sensores.

HOJA DE REGISTRO DE SENSORES		CODIGO	FGD-02 V.01
		PAGINA	1 de 3
SENSOR	SENSOR DE NIVEL		
1.0 GENERALIDADES.		2.0 IMAGEN DEL SENSOR.	
CODIGO	COLT-01/02		
Modelo	SISTRANS LVL100		
Fabricante	SIEMENS		
Tipo	LVL 100XXSNBTPM		
Referencia	7ML5745-1AA22-1AA0		
Descripción			
SISTRANS LVL100 es un interruptor de nivel de vibración compacto para la detección de materiales en aplicaciones de líquidos y lodos, tales como aplicaciones de desbordamiento, alta, baja y demanda, así como protección de bombas. Es ideal para uso en espacios confinados.			
3.0 ESPECIFICACIONES TECNICAS			
Modo de Operación (Principio de medida)		Precisión de medición	
Interruptor de nivel de punto de vibración		Histeresis	Aprox. 2mm (0.08 in) con instalacion vert.
Entradas (Medición de Variables)		Retraso	Aprox. 500 ms (encendido / apagado)
Alta, Baja y demanda		Frecuencia	Aprox. 1100 Hz
Salidas (Opciones de salidas)		Fuente de alimentación	
• Interruptor electrónico sin contacto		Tensión de alimentación 20 ... 253 V CA, 50/60 Hz.	
• Salida de transistor PNP (max -250mA)		20 ... 253 V DC. / 9,6 35 V	
Diseño		Consumo de energía máx. 0.5 W	
Material		Condiciones nominales de operación	
• Caja 316L y plástico PEI.		Condiciones de instalación	
• Afinador 316L (1.4404 o 1.4435)		• Ubicación interior / exterior	
• Proceso de conexión (roscado) 316L (1.4404 o 1.4435)		Condiciones ambientales	
• Proceso de sellado Klingersil C-4400		• Temperatura ambiente -40 ... +70 ° C (-40 ... +158 ° F)	
Proceso de conexión		• Instalación categoría III	
• Rosca de tubo, cilíndrica (ISO 228 T1) G ½ "A, G ¾ "A, o G 1 "A		• Grado de contaminación 2	
• Rosca de tubería, ½ "NPT cónica, N" NPT, o 1 "NPT		Condiciones medianas	
• Herrajes higiénicos Bolting DN 40 PN 40		• Temperatura - Estándar -40 ... +100 ° C (-40 ... +212 ° F)	
Tri-clamp 1 ", 1½", 2 "PN 10		Opción de alta temperatura -40 ... +150 ° C (-40 ... +302 ° F)	
Grado de protección		• Presión (recipiente) -1 ... 64 bar g (-14.5 ... 928 psi g)	
IP65 / Tipo 4 / NEMA 4 (con tapón de válvula DIN 43650),		• Densidad 0.7 ... 2.5 g / cm³ (0.025 ... 0.09 lb / in³)	
IP66 / 67 o IP68 (con conector M12)		Certificados y homologaciones.	
Entrada del conducto 1 x M12 [IP66 / IP67 o IP68 (0,2 bar)]		• Protección contra sobrellenado (WHG)	
Peso (alojamiento) 250 g (9 oz)		• Aprobaciones de envío	
4.0 DATOS DEL FABRICANTE			
Nombre:	SIEMENS	Telefono:	(1) 2942400
Dirección:	Autopista Medellín. Kilómetro 8.5, Costado Sur, Tenjo, Cundinamarca		
Catalogo	https://www.icenta.co.uk/uploads/1/1/4/7/114709647/sitrans-lvl100-vibrating-level-switch-ic.pdf		
5.0 APROBACION Y REFERENCIA			
Elaboro:	JUAN JOSE ROBERTO PARADA G.	Aprobado por:	JOSE MANUEL RAMIREZ QUINTERO
Fecha:	1/06/2019	Fecha:	

HOJA DE REGISTRO DE SENSORES		CODIGO	FGD-02 V.01
		PAGINA	2 de 3
SENSOR	SENSOR DE PRESION		
1.0 GENERALIDADES.		2.0 IMAGEN DEL SENSOR.	
CODIGO	COPT-01		
Modelo	SISTRANS P200		
Fabricante	SIEMENS		
Tipo	LKK-E911-653-02-0002		
Referencia	7MF1565-3CA00-16A1		
Descripcion El transmisor de presión SISTRANS P200 mide el manómetro y la presión absoluta de líquidos, gases y vapores. • Célula de medición cerámica • Medidores y rangos de medición absolutos de 1 a 60 bar (15 a 1000 psi) • Para aplicaciones generales.			
3.0 ESPECIFICACIONES TECNICAS			
Modo de Operación (Principio de medición)		Condiciones nominales de operación	
Celda de medición piezo-resistiva (diafragma cerámico)		Temperatura de proceso con junta hecho de	
Entradas (Medición de Variables)		• FPM (Estándar); -15 ... +125 ° C (+5 ... +257 ° F) • Neopreno; -35 ... +100 ° C (-31 ... +212 ° F) • Perbunan; -20 ... +100 ° C (-4 ... +212 ° F) • EPDM; -40 ... +125 ° C (-40 ... +257 ° F) agua potable	
• Presión manométrica; 1... 60 bar (15... 870 psi) • Presión absoluta; 0.6... 16 bar a (10... 232 psi abs a) • Presión; 0... 1 bar			
Salidas (Opciones de salidas)		Condiciones ambientales	
Señal de Corriente 4 ... 20 mA		Temperatura ambiente; -25 ... +85 ° C (-13 ... +185 ° F)	
• Carga (UB - 10 V) /0.02 A		Temp. de almacena/to; -50 ... +100 ° C (-58 ... +212 ° F)	
• Potencia auxiliar UB; DC 7 ... 33 V (10 ... 30 V para Ex)		Grado de protección; • IP 65, • IP 67	
Señal de voltaje 0 ... 10 V DC		Condiciones medianas	
• Carga > = 10 kΩ		• Temperatura - Estándar -40 ... +100 ° C (-40 ... +212 ° F)	
• Potencia auxiliar UB; 12 ... 33 V DC		Opción de alta temperatura -40 ... +150 ° C (-40 ... +302 ° F)	
• Consumo de energía <7 mA a 10 kΩ		• Presión (recipiente) -1 ... 64 bar g (-14.5 ... 928 psi g)	
Salida radiométrica 0 ... 90%		• Densidad 0.7 ... 2.5 g / cm³ (0.025 ... 0.09 lb / in³)	
• Carga > = 10 kΩ		Compatibilidad electromagnética;	
• Energía auxiliar UB 5 V DC ±10%		• acc. IEC 61326-1 / -2 / -3 • acc. NAMUR NE21	
• Consumo de energía <7 mA a 10 kΩ		Diseño	
Curva característica; Levantamiento lineal		Peso; Aprox. 0.090 kg (0.198 lb)	
Precisión de medición		Conexiones eléctricas;	
Histeresis	• Típico: 0.25% del rango de medición	• Conector según EN 175301-803-A cable M16x1.5 o ½-14 NPT	
Retraso	Tiempo Respuesta T99; <5 ms	• enchufe del dispositivo M12	
Estabilidad		• Cable de 2 o 3 hilos (0,5 mm²) (Ø ± 5.4 mm)	
0.25% del lapso de medición / año		Materiales de piezas húmedas	
Influencia de la temperatura ambiente. .		• Proceso de conexión; Acero inoxidable, mate. Nº 1.4404	
25% / 10 K de rango		• Junta; FPM (Estándar); Neopreno; Perbunan; EPDM	
Influencia de la fuente de alimentación;		Materiales de piezas no mojadas.	
0.005% / V		• Recinto; Acero inoxidable, mate. Nº 1.4404 (SST 316 L)	
		• Estante; El plástico • Cables; PVC	
4.0 DATOS DEL FABRICANTE			
Nombre:	SIEMENS	Telefono:	(1) 2942400
Url:	https://new.siemens.com/co/es.html		
Dirección:	Autopista Medellín. Kilómetro 8.5, Costado Sur, Tenjo, Cundinamarca		
Catálogo:	https://www.fimin.net/wp-content/uploads/pdf/P200-P210-P220.pdf		
5.0 APROBACION Y REFERENCIA			
Elaboro:	JUAN JOSE ROBERTO PARADA G.	Aprobado por:	JOSE MANUEL RAMIREZ QUINTERO
Fecha:	1/06/2019	Fecha:	

HOJA DE REGISTRO DE SENSORES		CODIGO	FGD-02 V.01
		PAGINA	3 de 3
SENSOR	SENSOR DE TEMPERATURA		
1.0 GENERALIDADES.		2.0 IMAGEN DEL SENSOR.	
CODIGO	COTT-01/04		
Modelo	SITRANS TH100 Slim (Pt100)		
Fabricante	SIEMENS		
Tipo	D - 76181 Karlsruhe		
Referencia	7NG3211 - ONN00		
Descripción El transmisor SITRANS TH200 puede utilizarse en todos los sectores industriales. Su tamaño compacto permite instalarlo en un cabezal tipo B (DIN 43729) o mayor. Su etapa de entrada universal permite conectar los siguientes tipos de sensores y fuentes de señales: • Termoresistencias (conexión a 2, 3 ó 4 hilos) • Termopares • Emisores de resistencia y fuentes de tensión continua			
3.0 ESPECIFICACIONES TECNICAS			
Modo de Operación (Principio de medición)		Salidas (Opciones de salidas)	
Termoresistencia		• Señal de salida; 4 ... 20 mA, dos hilos	
Entrada (Medición de Variables) Termoresistencia		• Alimentación auxiliar; 8,5 ... 36 V DC	
• Magnitud medida; Temperatura		• Carga máx; ($U_{aux} - 8,5 V$)/0,023 A	
• Tipo de entrada; PT100 según IEC 60751		• Margen de saturación; 3,6 ... 23 mA	
• Característica; Lineal con la temperatura		• Señal de fallo; 3,6 ... 23 mA	
• Tipo de conexión; Conexión a 2, 3 o 4 hilos		• Tiempo de atenuación; 0 ... 30 s	
• Resolución; 14 bits		• Protección; contra inversión de polaridad	
• Precisión de medida; < 0,25 °C (0.45 °F)		• Resolución; 12 bit	
• Repetibilidad; < 0,1 °C (0.18 °F)		• Precisión a 23 °C (73.4 °F); < 0,1 % del alcance de medida	
• Corriente de medida; Aprox. 0,4 mA		• Influencia de la temperatura; < 0,1 %/10 °C (0.1 %/18 °F)	
• Ciclo de medida; < 0,7 s		• Influencia de la alimentación; < 0,01 %	
• Rango de medida; -60 ... +160 °C (-76 ... +320 °F)		• Influencia de la carga; < 0,025 % del alcance de medidamáx./100 Ω	
• Alcance de medida; 25 ... 220 °C (45 ... 396 °F)		• Deriva a largo plazo; < 0,025 % 1 mes; < 0,035 % 1 año	
• Unidad; °C o °F		Construcción Mecánica	
• Offset; Programable -100 ... +100 °C (-180 ... +180 °F)		• Peso; 50 g	
• Resistencia del cable; Máx. 20 Ω (total)		• Material; Plástico encapsulado	
• Supresión de perturbaciones; 50 y 60 Hz		• Cables de conexión; Máx. 2,5 mm2 (AWG 13)	
Condiciones ambientales de operación		• Protección IEC 60529; • Caja IP40; • Bornes IP00	
• Rango de temp/ra ambiente; -40...+85°C (-40...+185°F)		Certificados y homologaciones	
• Rango de temp/ra almac; -40...+85°C (-40...+185°F)		• Certificado de examen de tipo CE; PTB 05 ATEX 2049X	
• Humedad relativa del aire; < 98 %, con condensación		Requisitos de software	
• Compatibilidad electromagnét; EN 61326 y NAMUR NE21		Windows ME, 2000, XP, Win 7 y Win 8;	
4.0 DATOS DEL FABRICANTE			
Nombre:	SIEMENS	Telefono:	(1) 2942400
Dirección:	Autopista Medellín. Kilómetro 8.5, Costado Sur, Tenjo, Cundinamarca		
Catálogo:	https://www.fimin.net/wp-content/uploads/pdf/P200-P210-P220.pdf		
5.0 APROBACION Y REFERENCIA			
Elaboro:	JUAN JOSE ROBERTO PARADA G.	Aprobado por:	JOSE MANUEL RAMIREZ QUINTERO
Fecha:	1/06/2019	Fecha:	

Anexo F. Modos de Fallos en intercambiadores de calor de coraza y tubos (OREDA-2002).

Taxonomía 3,1,5		Item EQUIPAMIENTO MECANICO / INTERCAMBIADOR DE CALOR / CORAZA Y TUBO									
Poblacion	Instalaciones	Tiempo en servicio agregado (10^4 horas)						Numero de demandas			
42	7	Tiempo Calendario*		Tiempo de operación				97740			
		0,97711		0,8685							
MODO DE FALLA		No de Fallas	Tasa de fallas (por 10^6 h)					Hr. Rep. Activa	Reparacion (Hora-Hombre)		
			Bajo	Media	Alto	SD	n/τ		Min.	Media	Max.
CRITICA		12 *	0,00	8,58	36,72	14,20	12,28	39,5	12,0	73,0	311,0
		12 ↑	0,02	9,70	39,25	14,78	13,82				
Lectura Anormal del instrumento		1 *	0,00	1,03	5,38	2,40	1,02	----	12,0	12,0	12,0
		1 ↑	0,00	1,14	5,83	2,25	1,15				
Fuga Externa - Proceso Medio		1 *	0,00	1,03	5,36	2,40	1,02	----	----	----	----
		1 ↑	0,01	1,29	4,90	1,81	1,15				
Derivacion del Parametro		1 *	0,00	0,89	3,68	1,40	1,02	30,0	60,0	60,0	60,0
		1 ↑	0,00	1,00	3,93	1,46	1,15				
Deficiencia Estructural		9 *	0,00	5,72	30,70	14,19	9,21	40,5	28,0	81,2	311,0
		9 ↑	0,00	6,17	32,68	14,92	10,36				
DEGRADADO		6 *	0,00	6,27	27,61	10,83	6,14	10,0	1,0	7,3	16,0
		6 ↑	0,00	8,82	40,50	16,22	6,91				
Fuga Externa - Proceso Medio		1 *	0,00	1,15	4,58	1,71	1,02	10,0	10,0	10,0	10,0
		1 ↑	0,01	1,25	4,22	1,55	1,15				
Fuga Externa - Medio de Utilidad		3 *	0,00	3,03	14,64	6,05	3,07	----	1,0	3,3	6,0
		3 ↑	0,00	4,41	22,00	9,38	3,45				
Derivacion del Parametro		2 *	0,00	2,06	8,70	3,34	2,05	----	8,0	12,0	16,0
		2 ↑	0,00	2,88	13,85	5,71	2,30				
INCIPIENTE		54 *	5,54	55,58	150,24	48,19	55,26	46,1	15,0	32,1	279,0
		54 ↑	3,42	70,04	209,89	70,20	62,17				
Lectura Anormal del instrumento		14 *	0,31	17,39	54,31	19,33	14,33	1,5	1,5	5,8	23,0
		14 ↑	0,24	22,99	75,06	27,34	16,12				
Fuga Externa - Proceso Medio		8 *	0,00	7,67	41,17	19,02	8,19	----	2,0	2,4	4,0
		8 ↑	0,00	8,19	44,23	20,53	9,21				
Fuga Externa - Medio de Utilidad		3 *	0,00	3,03	14,64	6,05	3,07	----	2,0	5,3	8,0
		3 ↑	0,00	4,41	22,00	9,38	3,45				
Problema Menor en Servicio		10 *	0,16	13,29	42,86	15,55	10,23	12,0	2,0	18,1	76,0
		10 ↑	0,15	17,31	57,93	21,25	11,51				
Otro		2 *	0,00	1,63	7,15	2,80	2,05	25,0	35,0	50,0	65,0
		2 ↑	0,00	1,82	7,64	2,92	2,30				
Derivacion del Parametro		6 *	0,07	4,94	15,62	5,61	6,14	56,0	4,0	94,0	146,0
		6 ↑	0,23	5,70	17,18	5,83	6,91				
Enchufado/ Atascado.		1 *	0,00	1,03	5,36	2,40	1,02	----	5,0	5,0	5,0
		1 ↑	0,01	1,29	4,90	1,81	1,15				
Deficiencia Estructural		10 *	0,08	8,07	26,45	9,65	10,23	58,1	2,0	78,7	279,0
		10 ↑	0,08	9,53	32,10	11,79	11,51				
TODOS LOS MODOS		72 *	6,93	69,62	188,25	60,39	73,69	42,2	1,0	36,5	311,0
		72 ↑	3,92	87,48	262,63	88,37	82,90				

Anexo G. Modos de Fallos en Recipientes (OREDA-2002).

Taxonomia 3,2,10		Item EQUIPAMENTO MECANICO / RECIPIENTES / TANQUE DE COMPENSACION									
Poblacion	Instalaciones	Tiempo en servicio agregado (10^4 horas)					Numero de demandas				
12	7	Tiempo Calendario*		Tiempo de operación							
		0,3400		0,2770							
MODO DE FALLA		No de Fallas	Tasa de fallas (por 10^6 h)					Hr. Rep. Activa	Reparcion (Hora-Hombre)		
			Bajo	Media	Alto	SD	n/τ		Min.	Media	Max.
CRITICA	2 *	0,47	5,65	15,82	5,16	5,88	14,3	24,0	28,5	33,0	
	2 ↑	1,02	6,76	16,69	5,11	7,22					
	Lectura Anormal del instrumento	2 *	0,47	5,65	18,82	5,16	5,88	14,3	24,0	28,5	33,0
		2 ↑	1,02	6,76	16,69	5,11	7,22				
DEGRADADO	4 *	0,89	10,62	29,67	9,67	11,76	23,8	1,0	25,5	72,0	
	4 ↑	0,20	13,16	41,57	14,91	14,44					
Otro	2 *	0,11	5,29	16,33	5,76	5,88	36,0	1,0	36,5	72,0	
	2 ↑	0,04	6,55	22,62	8,34	7,22					
Derivacion del Parametro	1 *	0,01	2,56	9,75	3,59	2,94	----	6,0	6,0	6,0	
	1 ↑	0,00	3,36	16,82	2,19	3,51					
Deficiencia Estructural	1 *	0,00	3,17	19,85	7,70	2,94	11,5	23,0	23,0	23,0	
	1 ↑	0,00	3,49	18,13	8,03	3,61					
INCIPIENTE	26 *	8,10	62,38	159,28	49,54	76,47	67,2	1,0	67,7	594,0	
	26 ↑	0,84	79,22	258,50	94,16	93,86					
Lectura Anormal del instrumento	13 *	0,00	23,11	115,25	49,15	38,23	0,5	1,0	7,5	21,0	
	13 ↑	0,00	37,61	198,31	90,00	46,93					
Fuga Externa - Proceso Medio	1 *	0,01	2,56	9,75	3,59	2,94	----	12,0	12,0	12,0	
	1 ↑	0,00	3,36	16,82	7,19	3,61					
Problema Menor en Servicio	2 *	0,01	5,41	21,32	7,94	5,88	108,5	36,0	126,5	217,0	
	2 ↑	0,02	6,89	26,65	9,85	7,22					
Otro	5 *	0,08	14,33	50,74	18,74	14,71	97,2	13,0	194,4	594,0	
	5 ↑	0,20	16,10	51,64	18,68	18,05					
Derivacion del Parametro	1 *	0,00	3,17	16,85	7,70	2,94	5,5	11,0	11,0	11,0	
	1 ↑	0,00	3,49	18,13	8,03	3,61					
Deficiencia Estructural	4 *	0,00	12,42	63,65	27,56	11,76	51,5	58,0	103,0	179,0	
	4 ↑	0,00	13,27	67,48	29,12	14,44					

Anexo H. Criterios de valoración de niveles de severidad, ocurrencia y detectabilidad para la construcción del AMEF, (Basado en la NORMA SAE J1739).

CRITERIO DE EVALUACION DE SEVERIDAD		
Efecto	Criterio: Severidad o Efecto	Clsf.
Peligroso sin aviso	Puede poner en peligro la máquina o el operador de montaje. Cuando un modo de falla potencial afecta el funcionamiento seguro del equipo y / o implica el incumplimiento de la regulación gubernamental. La falla ocurrirá sin advertencia.	10
Peligroso con aviso	Cuando un modo de falla potencial afecta el funcionamiento seguro del vehículo y / o implica el incumplimiento de la regulación gubernamental. La falla ocurrirá con una advertencia.	9
Muy alto	Gran interrupción en la línea de producción. Es posible que deba desecharse el 100% del producto. Equipo / artículo inoperable, pérdida de la función principal. Cliente muy insatisfecho.	8
Alto	Interrupción menor en la línea de producción. Equipo operable, pero a un nivel reducido de rendimiento. Cliente insatisfecho.	7
Moderado	Interrupción menor en la línea de producción. Equipo / artículo operable, pero algunos componentes inoperables. El cliente experimenta incomodidad.	6
Bajo	Interrupción menor en la línea de producción. Equipo / artículo operable, pero algunos componentes operables con un nivel de rendimiento reducido. El cliente experimenta algo de insatisfacción.	5
Muy Bajo	Interrupción menor en la línea de producción. Defecto notado por la mayoría de los clientes.	4
Menor	Interrupción menor en la línea de producción. Defecto notado por clientes promedio.	3
Muy Menor	Interrupción menor en la línea de producción. Es posible que una parte (menos del 100%) deba volver a trabajar en línea, pero dentro de la estación. Defecto notado por clientes promedio.	2
Ninguno	Sin efecto.	1

CRITERIO DE EVALUACION DE LA OCURRENCIA			
Probabilidad de Fallo	Posibles Tasas de Fallas	Cpk	Clsf.
Muy alto: el fallo es casi inevitable	≥ 1 en 2	<0.33	10
	1 en 3	≥ 0.33	9
Alto: generalmente asociado a procesos similares a los procesos anteriores que a menudo han fallado.	1 en 8	≥ 0.51	8
	1 en 20	≥ 0.67	7
Moderado: generalmente asociado a procesos similares a procesos previos que han experimentado fallas ocasionales, pero no en grandes proporciones.	1 en 80	≥ 0.83	6
	1 en 400	≥ 1.00	5
	1 en 2,000	≥ 1.17	4
Bajo: fallas aisladas asociadas con procesos similares.	1 en 15,000	≥ 1.33	3
Muy bajo: solo fallas aisladas asociadas con procesos casi idénticos.	1 en 150,000	≥ 1.55	2
Remoto: la falla es poco probable. No fallas alguna vez asociadas a procesos casi idénticos.	≤ 1 en 1,500,000	≥ 1.67	1

CRITERIO DE EVALUACION DE DETECCION		
Detección	Criterio: Probabilidad de que la existencia de un defecto sea detectada por los controles del proceso antes del siguiente proceso posterior, o antes de que parte o componente abandone la ubicación de fabricación o montaje	Clsf.
Casi Imposible	No hay controles conocidos disponibles para detectar el modo de falla	10
Muy remoto	Los controles de corriente de probabilidad muy remota detectarán el modo de falla	9
Remoto	Los controles de corriente de probabilidad remota detectarán el modo de falla	8
Muy Bajo	Los controles de corriente de muy baja probabilidad detectarán el modo de falla	7
Bajo	Los controles de corriente de baja probabilidad detectarán el modo de falla	6
Moderado	Los controles de corriente de probabilidad moderada detectarán el modo de falla	5
Moderadamente alto	Controles de corriente de alta probabilidad moderada detectarán el modo de falla	4
Alto	Los controles de corriente de alta probabilidad detectarán el modo de falla	3
Muy Alto	Los controles de corriente de muy alta probabilidad detectarán el modo de falla	2
Casi Seguro	Los controles actuales casi seguramente detectarán el modo de falla. Se conocen controles de detección confiables con procesos similares.	1

Anexo I. Análisis de Modos y Efectos de Fallos en el Intercambiador de calor.

FORMATO DE ANALISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLOS AMEF				BANCO EQUIPO		BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO U - RIC1			CODIGO PAGINA		FDG-03 V1.0 1 de 1	
No	IDF	FALLO INSPIENTE	DESCRIPCION	IDM	MODOS DE FALLO INSPIENTE	EFEECTO DE FALLO INSPIENTE	Severidad	CAUSAS POSIBLES DEL FALLO	Ocurriencia	CONTROLES DE DETECCION Y PREVENCIÓN EN EL BANCO	Detección	NRP
1	STD	Deficiencia Estructural	Potencia reducida debido a impactos, corrosión extrema, Fracturas o agrietamientos.	a	Daño en la coraza por deformación.	Desviación del flujo de agua al interior de la carcasa del intercambiador de calor, aumenta la turbulencia del agua, reduce la eficiencia del intercambiador de calor, aumenta el ruido y la vibración.	2	Golpe o impacto con un elemento contundente; deformación debido al incremento de la temperatura.	5	No refiere protección o prevención	10	100
				b	Coraza con corrosión extrema.	Disminuye la transferencia de calor, entre la coraza y el exterior del equipo, aumenta el calor al interior del intercambiador lo que ocasiona que se aumente la temperatura del agua de proceso en la salida y aumenta la temperatura a la salida del agua de recirculación.		Selección incorrecta del material, deterioro o pérdida de la capa de protección anticorrosiva		No refiere protección o prevención		
				c	Soltura mecánica del perno de sujeción.	Aumento de la vibración y ruido de golpes continuo en el intercambiador de calor.		Corrosión del perno, mal ajuste por mantenimiento		No refiere protección o prevención		
				d	Fracturas o agrietamientos	Aumento de la vibración y ruido de golpes continuo en el intercambiador de calor.		Mal procedimiento de aplicación de la soldadura		No refiere protección o prevención		
2	PDE	Desviación de los parámetros.	Los parámetros monitoreados exceden los niveles de tolerancia.	a	Temperatura de la salida del agua de recirculación es 2º menor.	El sensor de temperatura COTT-102, muestra un valor de temperatura + o - en 2º de la temperatura correcta.	7	Procedimiento de calibración del sensor incorrecto, Malfuncionamiento del Sensor	4	El sistema de control actua sobre el encendido del calentador en el tanque	8	224
				b	Temperatura de la salida del agua de proceso es 2º menor.	El sensor de temperatura COTT-102, muestra un valor de temperatura + o - en 2º de la temperatura correcta.		Procedimiento de calibración del sensor incorrecto, Malfuncionamiento del Sensor		El sistema de control actua sobre el funcionamiento de la electro válvula		
3	PLU	Enchufado/ Atascado.	Impedimento total o parcial para el flujo debido a la presencia de agua, sustancias aceitosas, sarro.	a	Taponamiento total o parcial de la línea de agua de proceso.	Con el taponamiento total del sistema de agua de proceso, no hay transferencia de calor en el intercambiador, la temperatura del agua de recirculación a la salida de intercambiador de calor es mayor a la esperada y la temperatura del sensor de temperatura en la salida del agua de proceso es mucho menor. Con el taponamiento parcial; la temperatura a la salida del agua de recirculación es un poco mas alta de lo esperada y la temperatura a la salida del agua de proceso es un poco menor de lo esperada.	5	Acumulación de material particulado disuelto en el agua, Desprendimiento interno del material de la tubería.	5	No refiere protección o prevención	10	250
				b	Taponamiento total o parcial de la línea de agua de recirculación.	Con el taponamiento total del sistema de agua de recirculación, no hay transferencia de calor en el intercambiador, la presión en la línea de alta presión se incrementa, la temperatura del agua de recirculación a la salida de intercambiador de calor menor a la esperada y la temperatura del sensor de temperatura en la salida del agua de proceso es mucho menor. Con el taponamiento parcial; la temperatura a la salida del agua de recirculación es mas alta de lo esperada y la temperatura a la salida del agua de proceso es menor de lo esperada.		Acumulación de material particulado disuelto en el agua, emulsificación del agua con aceites y otros elementos, Desprendimiento interno del material de la tubería y otros componentes.		No refiere protección o prevención		
4	ELP	Fuga Externa de medios de proceso.	Escape al ambiente de sustancias a medio procesar.	a	Fuga por el (o los) punto(s) de entrada y salida y la tapa de entrada del agua de proceso.	Se reduce el flujo masico de agua de proceso en la línea de agua de proceso. La variación del proceso de salida no es percibida	5	Alojamiento de los componentes roscados, pérdida y deterioro de las cremas aislantes o sellantes.	2	No refiere sistema de protección o prevención del daño	10	100
				b	Fuga por el sello de la tapa cerrada o el tapon de purga del agua de proceso	Se reduce el flujo masico de agua de proceso en la línea de agua de proceso. La temperatura a la salida del intercambiador de calor en el agua de proceso es mayor.		Alojamiento de los componentes roscados, pérdida y deterioro de las cremas aislantes o sellantes.		No refiere sistema de protección o prevención del daño		
5	ELU	Fuga Externa de medios de utilidades.	Escape al ambiente de refrigerante.	a	Fuga por el (o los) punto(s) de acceso o de salida del agua de recirculación.	Reducción del flujo masico de agua de recirculación en la línea de retorno. La variación de temperatura no es percibida.	7	Alojamiento de los componentes roscados, pérdida y deterioro de las cremas aislantes o sellantes.	3	No refiere protección o prevención	9	189
				b	Fuga por el tapon de purga de la coraza.	Reducción del flujo masico de agua de recirculación en la línea de retorno. La variación de temperatura no es percibida.		Alojamiento de los componentes roscados, pérdida y deterioro de las cremas aislantes o sellantes.		No refiere protección o prevención		
				c	Fuga por picadura de la coraza.	Reducción del flujo masico de agua de recirculación en la línea de retorno. La variación de temperatura no es percibida.		Ruptura o picadura por corrosión.		No refiere protección o prevención		
6	AIR	Lectura Anormal del Instrumento(s).	Por. Ej. Falsas alarmas, lecturas fallidas.	a	Lectura anormal en T1	No hay control de la temperatura en el interior del tanque, el sistema no funciona.	7	Procedimiento incorrecto de calibración.	4	El sistema de control actua sobre el encendido del calentador en el tanque de almacenamiento	8	224
				b	Lectura anormal en T2	No se especifica alguna acción sobre una lectura anormal en la temperatura		Procedimiento incorrecto de calibración.		No refiere protección o prevención		
				c	Lectura anormal en T3	No se especifica alguna acción sobre una lectura anormal en la temperatura		Procedimiento incorrecto de calibración.		No refiere protección o prevención		
				d	Lectura anormal en T4	La acción de control sobre la apertura o cierre de la válvula se pierde, no hay regulación.		Procedimiento incorrecto de calibración.		El sistema de control actua sobre el funcionamiento de la electro válvula		
7	SER	Problemas menores en servicio	Componentes perdidos, decolorados, sucios.	a	Componentes perdidos, decolorados, sucios.	El efecto es netamente estetico sobre los componentes del sistema.	2	Deterioro por exposición inadecuada en ambientes hostiles	4	No refiere protección o prevención	10	80
8	OTH	Otros	Especificarlos en el campo.	a	Especificarlos en el campo	No especifica	1	No hay programa de mantenimiento	2	No refiere protección o prevención	10	20

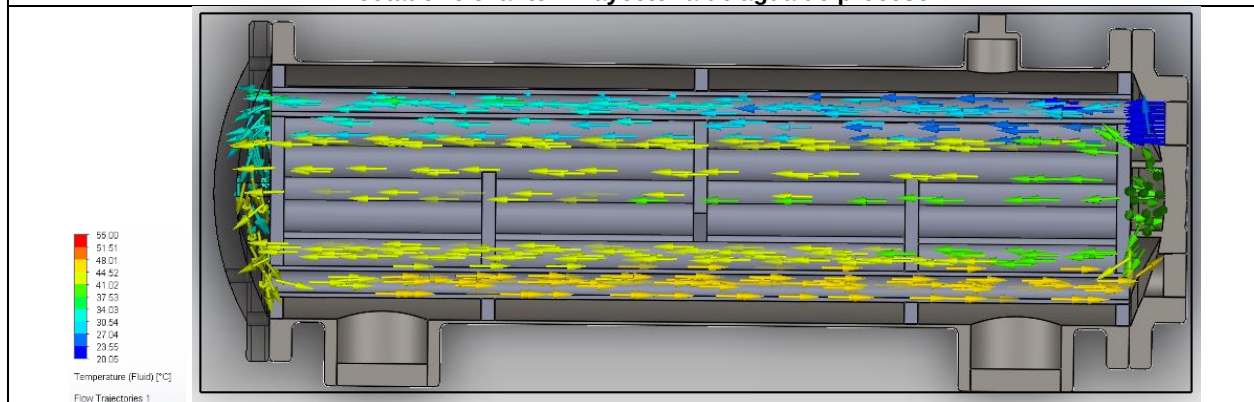
Anexo J. Análisis de Modo y Efecto de Fallo en el Tanque de Almacenamiento.

FORMATO DE ANALISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLOS AMEF				BANCO EQUIPO	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA TANQUE DE ALMACENAMIENTO - RTAI		CODIGO	FDG-03 V1.0		
Nº	IDF	DESCRIPCION	IDM	MODO DE FALLO INSIPIENTE	EFFECTO DE FALLO INSIPIENTE	Severidad	CAUSAS POSIBLES DEL FALLO	Ocurrencia	CONTOLES DE DETECCION Y PREVENCIÓN EN EL BANCO	NRP
1	STD	Rendimiento reducido a causa de impactos, corrosión, inaspeable, fracturas, etc.	a	Daño en la lamina por deformación.	Desviación en la orientación del tubo de salida del agua del tanque sobre la línea de succión	2	Impacto por un elemento contundente, trabajo excesivo a máxima temperatura	4	No refiere protección o prevención	10
			b	Lamina con corrosión extrema.	Desprendimiento de material corroído, contaminación del agua de recirculación		No refiere protección o prevención			
			c	Fracturas o agrietamientos en las uniones.	solura de válvulas y sensores, vibraciones y ruidos en el tanque.		No refiere protección o prevención			
2	PDE	Los parámetros monitoreados exceden los niveles de tolerancia.	a	Temperatura en el tanque excede el límite	Acción de control on-off sobre la temperatura, se activa de forma prematura en comparación al funcionamiento normal	6	Bloqueo de la función de encendido de la resistencia, calibración incorrecta de la temperatura	3	No refiere protección o prevención	8
3	ELP	Escape al ambiente de fluidos primarios.	a	Fuga por la lamina debido a la corrosión o rompimiento de la soldadura.	Pérdida lenta y continua del agua de recirculación	7	Picadura de la superficie del tanque	3	No refiere protección o prevención	10
			b	Fuga de agua por las uniones roscadas o válvula de desague.	Pérdida lenta y continua del agua de recirculación		Elementos roscados sueltos, pérdida o daño del sello anti fuga.		No refiere protección o prevención	
4	AIR	Por. Ej. Falsas alarmas, lecturas fallidas.	a	Lectura anormal del sensor de temperatura	Funcionamiento inadecuado del control on-off del sistema	7	Degradación del sensor, corrientes parasitas, soltura mecánica del sensor, llenado de otro medio de transmisión.	4	No refiere protección o prevención	8
			b	Lectura anormal del sensor de nivel alto	Señal no utilizada		Sensor flojo, descalibrado o en corto.		No refiere protección o prevención	
			c	Lectura anormal del sensor de nivel bajo	Funcionamiento inadecuado del control on-off del sistema		Sensor flojo, descalibrado o en corto.		No refiere protección o prevención	
5	OTH	Especificar en el campo comentarios.	a	Especificarlos en el campo comentarios	No especifica	1	No hay programa de mantenimiento	3	No refiere protección o prevención	10
6	SER	Componentes perdidos, decolorados, sucios.	a	Componentes perdidos, decolorados, sucios.	El efecto es netamente estetico sobre los componentes del sistema.	2	Deterioro por exposicion inadecuada en ambientes hostiles	3	No refiere protección o prevención	10
										30

Anexo K. Análisis Fallo Intercambiador de calor Fuga externa de procesos a medias.

Laboratorio:	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA	
Equipo:	Intercambiador de Calor	Estacionario
Fallo 1:	Fuga Externa de medios de procesos	

Acotado relevante - Trayectoria de agua de proceso



Descripción

El producto del intercambiador de calor, es un flujo continuo de agua de 6 L/min, a una temperatura de salida variable entre 21°C a 35°C, el agua de producto llega al intercambiador de calor a una temperatura ambiente, que para las condiciones del laboratorio de ingeniería mecatrónica es de 21°C, el flujo de agua del producto es recibido en el intercambiador de calor por el cabezal estacionario el cual posee tres cámaras, una cámara fría o de ingreso, que registra el valor de temperatura de llegada del agua de producto (Tco) y distribuye el agua a los cinco tubos de ingreso a la primera pasada del intercambiador de calor, (físicamente y de forma ideal, en esta cámara no hay intercambio de calor); el producto viaja por la primera pasada del intercambiador de calor, tramo sobre el cual se recibe parte de la energía térmica que ofrece el sistema, la trayectoria es de 380 mm X 5 tubos, durante este trayecto, el los tubos están en contacto en la parte externa con el agua de medio o recirculación y en la parte interna con el agua de proceso, la primera pasada del intercambiador de calor termina en el cabezal flotante, este cabezal cuenta con dos cámaras, donde el producto hace un giro de retorno a la segunda etapa o pasada por el intercambiador de calor, llegando a la segunda cámara del cabezal estacionario, en esta cámara se ven 10 agujeros, cinco de llegada de la segunda pasada y cinco de salida de la tercera pasada, el agua de proceso, retoma nuevamente el cuerpo del intercambiador de calor, cumpliendo con la pasada número tres y llegando a la segunda cámara del cabezal flotante, el agua de producto dura un periodo de tiempo muy pequeño en este cabezal, por tal razón se considera de forma ideal que no hay pérdida de calor, sobre el retorno, nuevamente el producto se traslada por los tubos de la segunda etapa durante este trayecto que tiene la misma distancia que en la primera, el agua de producto gana nuevamente energía térmica completando el máximo posible de energía recibida, al terminar este trayecto llega a la segunda cámara del cabezote anterior o cámara se salida (mencionada anteriormente) la cual registra el valor de temperatura de salida del agua de proceso.

Mecanismos de fallo	Descripción	Pronóstico del Impacto sobre el sistema de control
1. Falla de la unión entre el tubo de entrada y el cabezote estacionario.	Perdida del flujo masico del agua de proceso.	Dado que la cantidad de flujo masico del agua de proceso se reduce y no es posible medirla, las temperaturas finales del intercambiador de calor se incrementan, al aumentar el valor de la variable de control, teóricamente debe abrirse la válvula electroneumática probablemente se visualice la consecuencia un goteo externo del I.C.

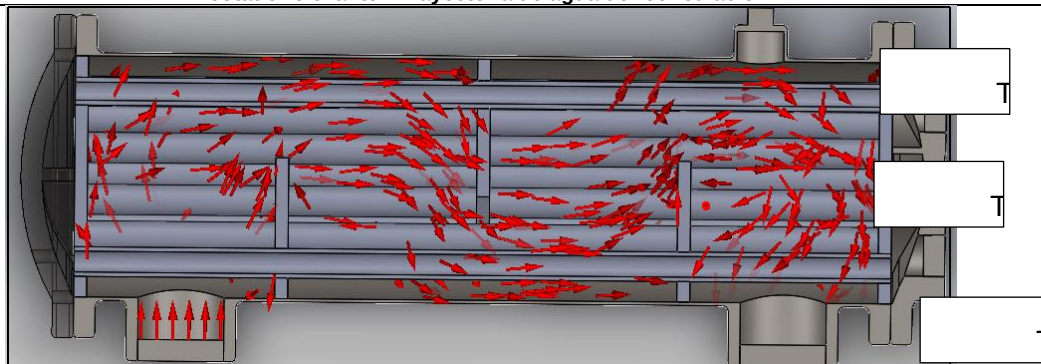
2. Picado, grietas o ruptura en la parte externa de la cámara de entrada del agua de proceso.	Perdida del flujo masico del agua de proceso, en este punto del sistema, no hay variación en la temperatura	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 1
3. Picado, grietas o ruptura en de sello lateral del cabezal estacionario con la cámara de entrada del agua de proceso.	El daño estructural de este componente comunicara automáticamente el agua de proceso con el agua de recirculación, siendo esta última la que tiene mayor presión, habrá un aumento probablemente significativo de la temperatura y el flujo masico del agua de proceso.	Se produce una mezcla del agua de recirculación con el agua de proceso, por la capacidad de la bomba del Banco, el agua de recirculación se mezcla en las cavidades del cabezal, esto hace que la temperatura del agua de proceso aumente, significativamente.
4. Daño del sello o junta pernada entre el cabezote estacionario y el cuerpo del intercambiador de calor	Perdida del flujo masico del agua de proceso, en este punto del sistema, no hay variación en la temperatura.	Dado que la cantidad de flujo masico del agua de proceso se reduce y no es posible medirla, las temperaturas finales del intercambiador de calor se incrementan, al aumentar el valor de la variable de control, teóricamente debe abrirse la válvula electroneumática probablemente se visualice la consecuencia un goteo externo del I.C.
5. Picado, grietas o ruptura en los tubos de la primera pasada en el intercambiador de calor.	El daño estructural de este componente comunicara automáticamente el agua de proceso con el agua de recirculación, siendo esta última la que tiene mayor presión, habrá un aumento probablemente significativo de la temperatura y el flujo masico del agua de proceso.	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 3
6. Picado, grietas o ruptura en de sello lateral del cabezal flotante con la cámara de entrada del agua de proceso.	El daño estructural de este componente, comunicara automáticamente el agua de proceso con el agua de recirculación, siendo esta última la que tiene mayor presión, habrá un aumento probablemente significativo de la temperatura y el flujo masico del agua de proceso.	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 3
7. Falta de ajuste o daño en el perno de purga de la línea de agua de proceso.	Perdida del flujo masico del agua de proceso, en este punto del sistema, hay variación en la temperatura.	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 1
8. Picado, grietas o ruptura en la parte externa de la cámara de salida del agua de proceso.	Perdida del flujo masico del agua de proceso, en este punto del sistema, la variación con la temperatura real no sería muy significativo.	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 1

MODO DE SIMULACIÓN	
Mecanismo Seleccionado	Falta de ajuste o daño en el perno de purga de la línea de agua de proceso.
Componente Físico	Descripción
Notas adicionales.	

Anexo L. Análisis falla del intercambiador de calor Fuga Externa de Utilidades medias.

Laboratorio:	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA	
Equipo:	Intercambiador de Calor	Estacionario
Fallo:	Fuga Externa de Utilidades medias	

Acotado relevante - Trayectoria de agua de recirculación



Descripción

El intercambiador de calor utiliza como medio de transporte de la energía térmica, agua de recirculación, esta agua de recirculación es la utilidad del intercambiador de calor, el recorrido del agua de recirculación llega al intercambiador de calor en la boca de entrada a la coraza del intercambiador, inmediatamente el agua de recirculación ingresa al cuerpo del intercambiador de calor, dentro de la coraza del intercambiador de calor, el agua de recirculación llena el espacio confinado entre la cara interna de la coraza y la cara externa de los tubos, en sus extremos se restringe el movimiento en las zonas laterales fuera del cuerpo del intercambiador de calor por el sello lateral, el agua de recirculación hace una pasada por esta zona moviéndose cambiando la dirección del recorrido debido al choque con los deflectores. La trayectoria es de 380 mm durante este recorrido transmite la energía térmica a las caras de contacto con el volumen confinado, el desplazamiento termina en la boca de salida.

Mecanismos de fallo	Descripción	Pronóstico del Impacto sobre el sistema de control
1. Falla de la unión entre el tubo de entrada y la boca de entrada de la coraza.	Perdida del flujo masico del agua de recirculación.	Dado que la cantidad de flujo masico del agua de recirculación se reduce y no es posible medirlo en qué proporción, las temperaturas finales del intercambiador de calor se reducen, al aumentar el valor de la variable de control, teóricamente debe abrirse la válvula electroneumática probablemente se visualice la consecuencia un goteo externo del I.C.
2. Picado, grietas o ruptura en la coraza del I.C.	Perdida del flujo masico del agua de recirculación, en este punto del sistema, no hay variación en la temperatura	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 1
3. Picado, grietas o ruptura en los sellos laterales del I.C.	El daño estructural de este componente, comunicara automáticamente el agua de proceso con el agua de recirculación, siendo esta última la que tiene mayor presión, habrá una reducción probablemente significativa de la temperatura y el flujo masico del agua de recirculación.	Se produce una mezcla del agua de recirculación con el agua de proceso, por la capacidad de la bomba del Banco, el agua de recirculación se mezcla en las cavidades del cabezal, esto hace que la temperatura del agua de recirculación disminuya, significativamente.
4. Picado, grietas o ruptura en los tubos del I.C.	Igual que la descripción de la falla 3.	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 3
5. Falla de la unión del perno de purga y la coraza.	Perdida del flujo masico del agua de recirculación en este punto del sistema, hay variación en la temperatura.	Igual que pronóstico de falla del mecanismo 1
6. Falla de la unión entre el tubo de salida y la boca de salida de la coraza.	Perdida del flujo masico del agua de recirculación.	En este punto, la cantidad de energía transferida al agua de proceso fue total,

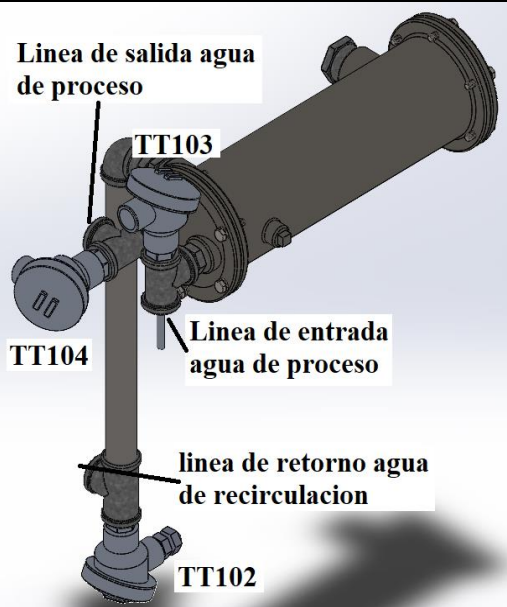


		por tal razón los sensores de temperatura no registran variaciones.
MODO DE SIMULACIÓN		
Mecanismo Seleccionado	Falla de la unión del perno de purga y la coraza.	
Componente Físico	Descripción	
Notas adicionales. _____		

Anexo M. Análisis fallo del Intercambiador de Calor lectura anormal del instrumento.

Laboratorio:	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA	
Equipo:	Intercambiador de Calor	Estacionario
Fallo:	lectura anormal del instrumento	

Imagen.



Descripción

El intercambiador de calor es un sistema térmico que comparte en su interior dos tipos de trayectorias diferentes, una es el agua de recirculación, esta agua recorre el intercambiador de calor, desde la entrada de agua caliente, por dentro del espacio que esta entre el interior de la coraza y el exterior de los tubos hasta la salida del agua caliente o a la línea de retorno de agua de recirculación (señalada en la figura) directamente no hay una sensoría que permita monitorear los valores a la entrada y la salida, existe un valor asumido como el valor de entrada, este se provee por la termoresistencia ubicada al interior del tanque, y la termo resistencia TT102(vista en la figura) que se asume como la temperatura a la salida del agua de recirculación. Para el agua de proceso, el cual se monitorea permanentemente, está la termo resistencia TT103 la cual da la información sobre la temperatura del agua fría o agua de proceso a la entrada del intercambiador de calor y la termo resistencia TT104, la cual es la prioridad de toda la línea de funcionamiento y es la variable monitoreada del sistema que se utiliza para regular el sistema de control.

Mecanismos de fallo	Descripción	Pronostico del Impacto sobre el sistema de control
1. Lectura anormal de la termo resistencia TT102.	El sensor envía una señal anormal al PLC	El sensor TT102, no tiene ningún impacto en el sistema de control, esta señal no es relevante, el estado del sistema estaría inalterado.
2. Lectura anormal de la termo resistencia TT103.	El sensor no envía ninguna señal al PLC	El sensor TT103, no tiene ningún impacto en el sistema de control, esta señal no es relevante, el estado del sistema estaría inalterado.
3. Lectura anormal de la termo resistencia TT104	El sensor envía una señal anormal al PLC	El sensor TT104, la señal modifica el funcionamiento de la válvula, dependiendo de la zona de operación si es $5.4 < T_{co} < 8.32$ y del tipo de señal que envíe, si la señal de temperatura es alta, la válvula reduce el caudal y viceversa, pero si la zona de operación es mayor a 8.32, y la señal de temperatura es mayor la válvula se abre para bajar la temperatura y viceversa.



MODO DE SIMULACIÓN	
Mecanismo Seleccionado	Anulación manual individual de cada termorresistencia RTD PT100
Componente Físico	Descripción
Notas adicionales.	

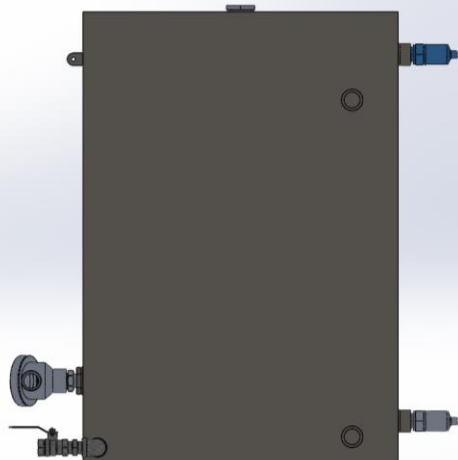
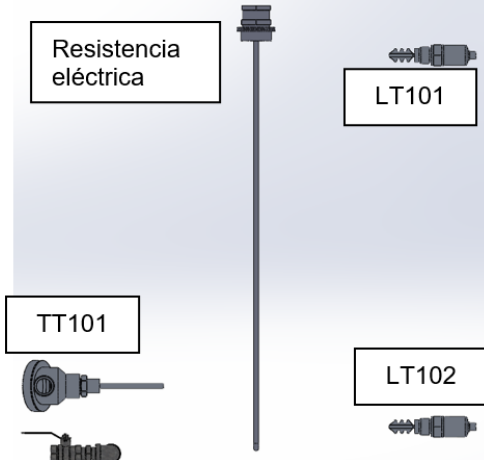
Anexo N. Análisis fallo del Intercambiador de Calor Enchufado/ Atascado.

Laboratorio:	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA	
Equipo:	Intercambiador de Calor	Estacionario
Fallo:	Enchufado/ Atascado	
Trayectoria de agua de proceso		
Numeración de los tubos cabezal entrada		Numeración de los tubos cabezal retorno



MODO DE SIMULACIÓN	
Mecanismo Seleccionado	obstrucción o Atascamiento del cabezal de retorno del intercambiador de calor.
Componente Físico	Descripción
Notas adicionales.	

Anexo O. Análisis fallos en el tanque de almacenamiento Lectura anormal del instrumento

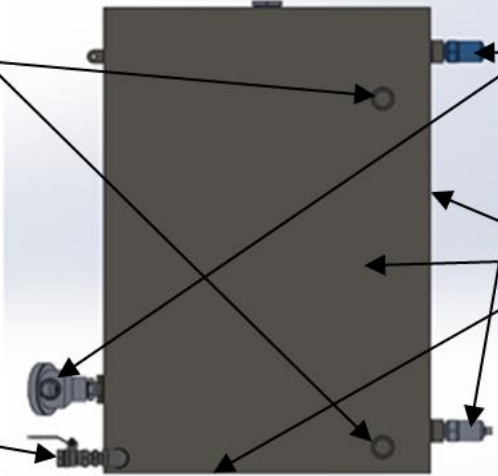
Laboratorio:	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA	
Equipo:	Tanque de almacenamiento	Estacionario
Fallo:	Lectura anormal del instrumento	
Agua de recirculación		
Tanque de almacenamiento	Instrumentos Instalados	
		
Descripción		
El tanque de almacenamiento cumple con dos funciones primarias importantes, la primera almacenar una cantidad de 48 Litros de agua, para cumplir con estas dos funciones, el tanque de almacenamiento cuenta con dos sensores de nivel tipo presencia, instalados en la sección posterior, (vistos a la derecha de la imagen del tanque de almacenamiento), funcionan como elementos de seguridad, si no se detecta agua en el nivel superior se restringe el funcionamiento de la siguiente función; la segunda función consiste en calentar dicha cantidad de agua a una temperatura deseada establecida, menor a 60 °C, para esto una vez que los sensores de presencia estén activos, la resistencia eléctrica al interior del tanque, recibe la orden de encendido, y calienta el agua a su alrededor, dicha temperatura esta censada por una termorresistencia tipo RTD PT100, TT101, el agua al interior del tanque se encuentra en movimiento, sale por un tubo ubicado en la parte inferior posterior succionada por la bomba, y regresa por la parte superior del intercambiador de calor.		
Mecanismos de fallo	Descripción	Pronostico del Impacto sobre el sistema de control
1. Lectura anormal del instrumento LT101	El funcionamiento de dicho sensor es del tipo discreto, activo o inactivo, DEBO PREGUNTA QUE PASA	DESCONOCIDO EN EL SISTEMA
2. Lectura anormal del instrumento LT102	El funcionamiento de dicho sensor es del tipo discreto, activo o inactivo, DEBO PREGUNTA QUE PASA	
3. Lectura anormal de la termo resistencia TT101.	El sensor no envía ninguna señal al PLC. BLOQUEO DE LA SEÑAL. APAGADO DEL SENSOR. SEÑAL DIFERENTE A LA REAL. SEÑAL NULA.	En caso de presentar un fallo, la resistencia eléctrica no puede funcionar correctamente.
MODO DE SIMULACIÓN		
Mecanismo Seleccionado	Anulación manual individual de cada sensor	
Componente Físico	Descripción	
Notas adicionales.		

Anexo P. Análisis de fallo en el tanque de almacenamiento fuga externa de medios de proceso.

Laboratorio:	BANCO DE CONTROL DE TEMPERATURA	
Equipo:	Tanque de almacenamiento	Estacionario
Fallo:	fuga externa de medios de proceso	

Tanque de almacenamiento

Accesorios.



Valvula de Purga.

Instrumentos.

Paredes del tanque.

Descripción

El tanque de almacenamiento cumple con dos funciones primarias importantes, la primera almacenar una cantidad de 48 Litros de agua, para cumplir con estas dos funciones, el tanque de almacenamiento cuenta con dos sensores de nivel tipo presencia, instalados en la sección posterior, (vistos a la derecha de la imagen del tanque de almacenamiento), funcionan como elementos de seguridad, si no se detecta agua en el nivel superior se restringe el funcionamiento de la siguiente función; la segunda función consiste en calentar dicha cantidad de agua a una temperatura deseada establecida, menor a 60 °C, para esto una vez que los sensores de presencia estén activos, la resistencia eléctrica al interior del tanque, recibe la orden de encendido, y calienta el agua a su alrededor, dicha temperatura esta censada por una termorresistencia tipo RTD PT100, TT101, el agua al interior del tanque se encuentra en movimiento, sale por un tubo ubicado en la parte inferior posterior succionada por la bomba, y regresa por la parte superior del intercambiador de calor.

Mecanismos de fallo	Descripción	Pronostico del Impacto sobre el sistema de control
1. ruptura o picado de las paredes del tanque.	Las paredes sufren picado o perdida de material, o los elementos de sujeción constructivos del tanque se sueltan y crean grietas por donde se presenta la fuga.	Dependiendo de la altura de la grieta, se reduce la cantidad de agua al interior del tanque, hasta el nivel de la perdida, esto indica una menor cantidad de masa y un menor tiempo de encendido de la resistencia para alcanzar la temperatura. Si la grieta, el instrumento, el accesorio o la válvula presentan fallas, el tanque seguirá funcionando hasta que el nivel de llenado sea inferior a la altura de la posición del sensor de nivel "ALTO" o superior, des pues de esto la resistencia no seguirá trabajando.
2. Fuga por las uniones de os instrumentos y accesorios con el tanque	Los instrumentos y accesorios no fueron instalados correctamente (ausencia de cinta de sellado), o están sueltos y se presenta fuga por la unión.	
3.	Los sellos internos de la válvula, se deterioran con el uso..	

MODO DE SIMULACIÓN

Mecanismo Seleccionado	Daño o fuga de la válvula de purga.
Componente Físico	Descripción

Notas adicionales.

Anexo Q. Lista de chequeo del experimento de identificación.

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA- U.P. MAESTRÍA EN CONTROLES INDUSTRIALES			
DIAGNÓSTICO DE FALLOS DE LOS EQUIPOS ESTACIONARIOS CRÍTICOS DEL PROCESO DE INTERCAMBIO DE CALOR, PARA EL INCREMENTO EN LA INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL INDUSTRIAL, EN EL LABORATORIO DE MECATRÓNICA EN LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA			
NOMBRE DEL FORMATO			Cod. Formato
LISTA DE SECUENCIA DEL EXPERIMENTO DE IDENTIFICACIÓN DEL LAZO DE CONTROL			LS-01
DATOS BÁSICOS DE LA PRUEBA			
PRUEBA		CÓDIGO	LS01-_____
CONTROL DE SECUENCIA			
N	Ítem	Hecho	
01.	Encendido del banco de control de temperatura (B.C.T.)		
02.	Selección del modo Manual en el B.C.T.		
03.	Establecer los valores iniciales en la pantalla HMI		
04.	Encender la bomba de agua de la línea de proceso y regular el caudal inicial		
05.	Encender la bomba de agua del B.C.T. y registrar la hora de inicio.		
06.	Seleccionar la visual de temperaturas		
07.	Monitorear el punto estabilización y registrar la hora de estabilización.		
08.	Calcular tEi (tiempo de estabilización inicial) conservar las condiciones del banco durante un periodo tEi medio.		
09.	Estimular la apertura de la válvula y registrar el tiempo de inicio		
10.	Seleccionar la visual de temperaturas		
11.	Monitorear el punto estabilización y registrar la hora de estabilización.		
12.	Evaluar repetir la prueba		
13.	Apagar la resistencia del tanque y registrar la hora de apagado		
14.	Seleccionar la visual de temperaturas		
15.	Monitorear el descenso y registrar la hora de estabilización.		
16.	Apagar la bomba de la línea de proceso y la del B.C.T.		
17.	Captura de la data almacenada en la memoria del HMI		
18.	Finalizar la prueba de recolección de datos		
DILIGENCIADO POR			
RESPONSABLE		OBSERVACIONES	

Anexo R. Especificaciones físicas de instalación del SENSOR SITRANS TH100 SLIM.

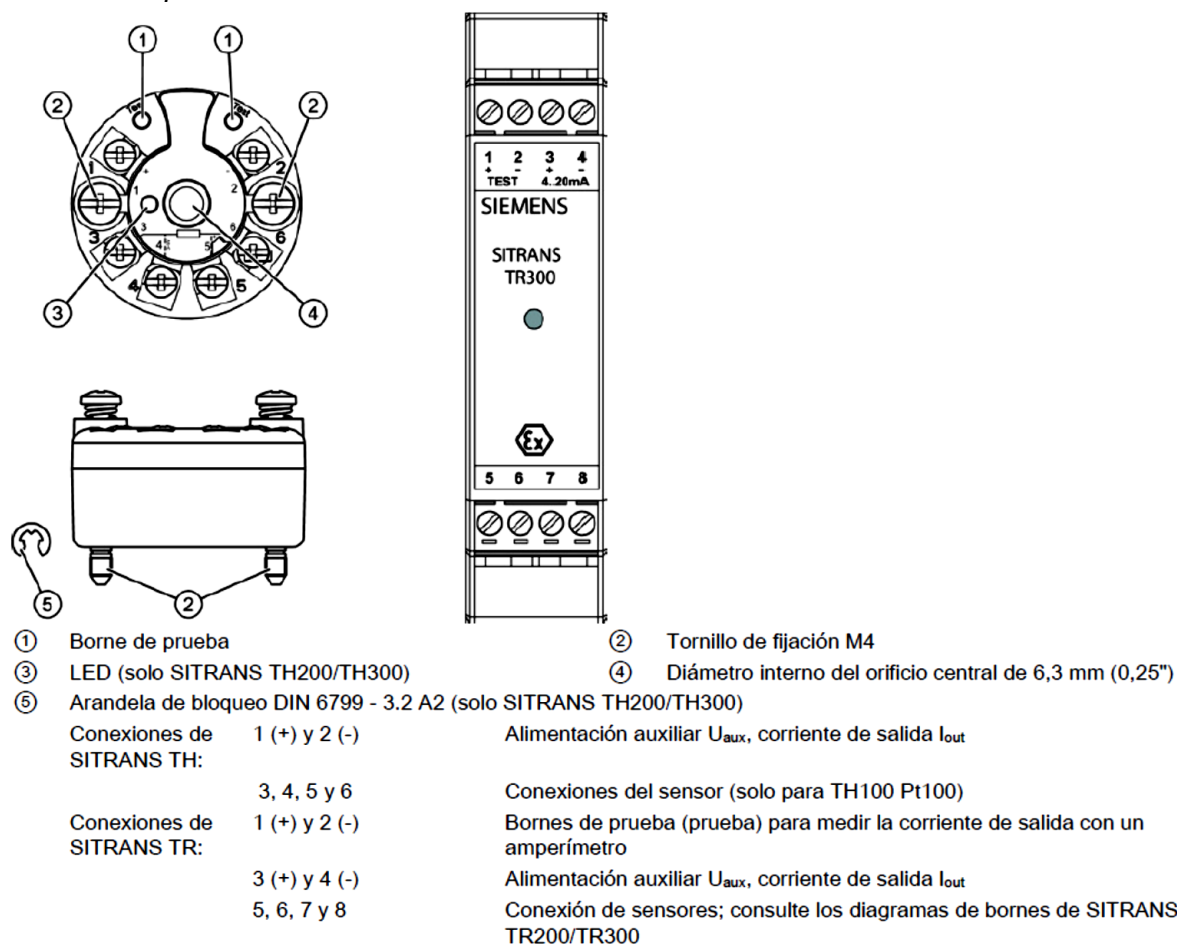


Figura 4-1 Asignación de conexiones de SITRANS TH

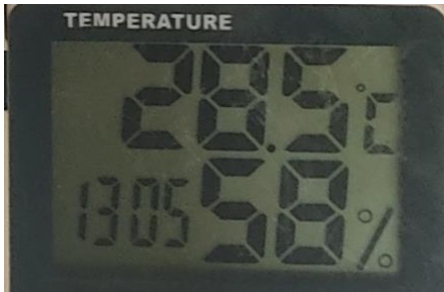
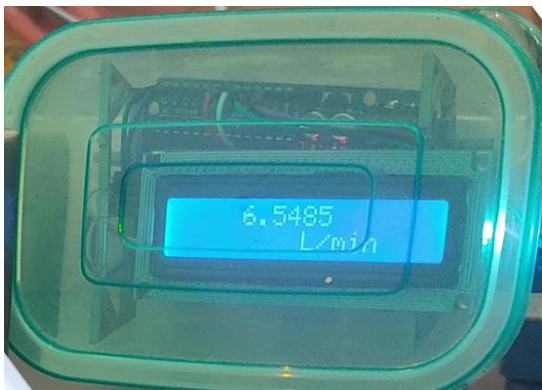
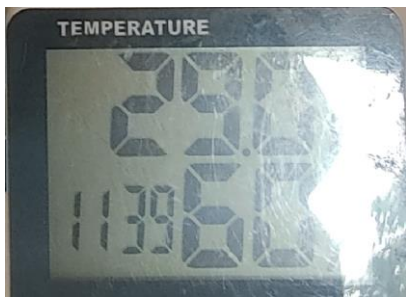
	Dos hilos ¹⁾	Tres hilos	Cuatro hilos	Promediado/determinación de la diferencia ²⁾ , no para TH100
TH100, TH200/TH300 (solo para TH100 Pt100)				

Anexo S. Histórico del proceso de adecuación y captura de información.

Registro progresivo del proceso de adecuación y captura de información.				
No	Actividad	Descripción	Fecha	Duración Estimada
01	Reconocimiento del Equipo	Contacto inicial sobre el equipo, reconocimiento general de partes y componentes.	11/10/2019	2 hr
02	Registro fotográfico	Registro fotográfico detallado del equipo, componentes generales	18/10/2019	2 hr
03	Búsqueda de información técnica	Recolección de manuales, fichas técnicas, diagramas de instalación, diagramas de conexión, planos, manual de funcionamiento.	25/10/2019	100 hr
04	Levantamiento de los planos del banco de control de temperatura	Construcción de partes, accesorios, equipos y componentes, elaboración del diagrama PI&D, Elaboración del Plano eléctrico u elaboración del plano de conexión.	04/11/2019	160 hr
05	Diseño de la documentación técnica del banco de control de temperatura.	elaboración de la hoja de registro del banco de control de temperatura, hoja de registro del sensor, diseño del formato AMEF.	18/03/2020	40 hr
06	Adecuación de la alimentación del equipo	Requerimiento de necesidades, Instalación inicial de los sistemas de alimentación.	21/09/2020	10 hr
07	Revisión y reparación del banco de control de temperatura.	Revisión de los terminales de conexión del tablero de control, sustitución del módulo analógico,	10/03/2022	10 hr
08	Instalación del programa de captura de data en el PLC S7 1200 (TIAPORTAL)	Revisión del software, instalación del programa y pruebas de conexión.	28/04/2021	4.0 hr
09	Remplazo del Variador de frecuencia	revisión, reparación y remplazo del variador de frecuencia.	19/05/2021	5.0 hr
10	Instalación de equipos, sensores	Instalación y ensamble de dispositivos tecnológicos en el banco de control de temperatura.	08/10/2021	10 hr
11	Prueba 01 02 11 2021	Verificación exitosa del funcionamiento del hardware y software usado para la detección y de la captura de data.	02/11/2021	5.2 hr
12	Prueba 02 09 11 2021	Prueba fallida de estabilización, se observa la baja capacidad del tanque de agua fría, se plantea aumentar la capacidad	09/11/2021	2.2 hr
13	Prueba 03 12 11 2021	Prueba fallida de estabilización, no se observa ningún cambio al variar la posición de la válvula	12/11/2021	1.5 hr
14	Prueba 04 24 11 2021	El sistema presenta mayor sensibilidad a los cambios en la línea de agua fría.	24/11/2021	2.6 hr
15	Prueba 05 01 12 2021	La temperatura de entrada del agua fría es variable.	01/12/2021	2.7 hr
16	Prueba 06 03 12 2021	La temperatura de entrada del agua fría es variable, la capacidad del tanque de reserva es insuficiente y la transferencia de calor con el ambiente es muy baja.	03/12/2021	3.9 hr
17	Prueba 07 14 12 2021	El proceso no tiene punto de estabilización, el banco no reacciona a los estímulos de los actuadores la válvula y la bomba, las perturbaciones están afectando continuamente el proceso	14/12/2021	2.2 hr
18	Prueba 08 14 12 2021	La capacidad del tanque de enfriamiento permite el incremento progresivo de la temperatura en el punto de ingreso de agua fría.	14/12/2021	1.9 hr
19	Prueba 09 17 12 2021	Se detecto mayor sensibilidad del equipo al cambio de flujo y variación de temperatura en la línea de acción del agua fría.	17/12/2021	2.1 hr

20	Prueba 10 21 12 2021	Prueba de funcionamiento del banco sin el sistema de bombeo de agua fría, conectado directamente al agua de la llave.	10/21/2021	0.6 hr
21	Prueba 11 17 12 2021	El sistema muestra estabilidad en la temperatura de entrada, no se aprecian cambios significativos ni constantes al variar las condiciones operativas de los actuadores.	17/12/2021	4.1 hr
22	Prueba 12 20 12 2021	Al mantener constante el flujo de la bomba del agua caliente, y variar lentamente la apertura de la válvula, no se observan cambios significativos, se detectó que la posición de cierre de la válvula inicia por debajo del 7% de apertura	20/12/2021	5.8 hr
23	Prueba 13 25 03 2022	Se estabiliza el banco a condiciones mínimas de apertura de la válvula 15% y se realiza un Step estímulo con máxima apertura 95%, el sistema no registra ningún cambio significativo, se concluye una mala selección del actuador	25/03/2021	3.5 hr
24	Prueba 14 30 03 2022	Al estabilizar el equipo, se realizaron pruebas de estímulos a diferentes condiciones, prevalece el cambio súbito en el variador de velocidad de la bomba y la apertura de la válvula constante.	30/03/2022	2.1 hr
25	Prueba 15 01 04 2022	La región operativa que presenta una variación más significativa en el cambio de temperatura a la salida del intercambiador se enmarca en la máxima apertura de la válvula y en la variación de la frecuencia de funcionamiento de la bomba.	01/04/2022	2.1 hr
26	Prueba 16 06 04 2022	Prueba de verificación del fallo en la selección de la válvula de apertura y cierre.	06/04/2022	1.0 hr
27	Prueba 17 08 04 2022 identificación	Prueba exitosa de identificación de funcionamiento del intercambiador de calor. Punto de operación 44 °C en la temperatura a la entrada de agua caliente, Apertura de la válvula 100% caudal de agua fría 6.7 L/min, porcentaje de funcionamiento de la bomba 15%, temperatura a la entrada de agua fría 27°C. estímulo de incremento del porcentaje de funcionamiento 90%, temperatura de estabilización a la salida del agua fría 33.5%	08/04/2022	6.1 hr
28	Prueba 18 27 04 2022 prueba válvula	Prueba exitosa de caracterización del funcionamiento del conjunto de la electroválvula.	27/04/2022	5.5 hr
29	Prueba 19 25 05 2022 estabilización	Prueba exitosa de estabilización en un conjunto a punto de operación	25/05/2022	2.0 hr
30	Prueba 20 18 05 2022	Experimento Fallo obstrucción o atascamiento de 5 tubos del intercambiador	18/05/2022	3.3 hr
31	Prueba 21 02 06 2022	Experimento Fallo obstrucción o atascamiento de 4 tubos del intercambiador	02/06/2022	4.6 hr
32	Prueba 22 08 06 2022	Experimento Fallo obstrucción o atascamiento de 3 tubos del intercambiador	08/06/2022	3.7 hr
33	Prueba 23 09 06 2022	Experimento Fallo obstrucción o atascamiento de 2 tubos del intercambiador	09/06/2022	4.1 hr
34	Prueba 24 09 06 2022	Experimento Fallo obstrucción o atascamiento de 1 tubo del intercambiador	09/06/2022	3.3 hr
35	Prueba 25 10 06 2022	Experimento de control bajo condiciones normales	10/06/2022	4.0 hr
36	Prueba 26 17 06 2022	Experimento de fallo del sensor de temperatura bajo condiciones improbables.	17/06/2022	4.2 hr
37	Prueba 27 24 06 2022	Experimento de fallo del sensor de temperatura bajo condiciones probables.	24/06/2022	3.9 hr
38	Análisis y redacción	Organización, análisis, redacción del proyecto	09/07/2023	80 hr
			TOTAL	511.2 hr

Anexo T. Capturas de condiciones ambientales del laboratorio y flujo de agua de agua de proceso a diferentes horas y en diferentes pruebas.

Condiciones típicas aproximadas de funcionamiento del laboratorio	
Flujo de agua de proceso	Temperatura ambiente, hora y humedad relativa
	
	
	

Anexo U. Tabla de datos de temperatura recolectados y organizados (parte 1/16).

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 27 26 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 1AUBOS				PLANTA 1AUBOS				PLANTA 1AUBOS				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 2TUBOS				OK			
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
8724	32.503264	15	3907	31.2120972	15	9206	31.2482681	15	6511	30.9259774	15	8201	31.2518845	15	7880	31.3005208	15	1127	24.9311589	15							
8725	32.5105591	15	3910	31.2120972	15	9207	31.2555008	15	6516	30.9652994	15	8201	31.2663498	15	7881	31.2916641	15	1128	24.9150772	15							
8726	32.4780121	15	3911	31.2627335	15	9208	31.2699661	15	6517	30.9480591	15	8202	31.2663498	15	7882	31.2916641	15	1129	24.92509262	15							
8727	32.4960938	15	3912	31.2482681	15	9209	31.2699661	15	6518	30.962532	15	8203	31.2663498	15	7883	31.2735825	15	1130	24.9584808	15							
8728	32.4599208	15	3913	31.2663498	15	9210	31.2482681	15	6519	30.8938065	15	8204	31.2663498	15	7884	31.2482681	15	1131	24.9512482	15							
8729	32.4852448	15	3914	31.2699661	15	9211	31.2518845	15	6520	30.9914627	15	8205	31.2518845	15	7885	31.2337952	15	1132	24.9584808	15							
8730	32.4852448	15	3915	31.2627335	15	9212	31.2301788	15	6521	30.9552994	15	8206	31.3025208	15	7886	31.2663498	15	1133	24.9367752	15							
8731	32.4599208	15	3916	31.2555008	15	9213	31.1750926	15	6522	30.9806137	15	8207	31.2301788	15	7887	31.2808151	15	1134	24.92509262	15							
8732	32.4924774	15	3917	31.2120972	15	9214	31.1361389	15	6523	30.973381	15	8208	31.2916641	15	7888	31.2663498	15	1135	24.9042782	15							
8733	32.4997101	15	3918	31.2084808	15	9215	31.2012482	15	6524	31.0131683	15	8209	31.2916641	15	7889	31.2374115	15	1136	24.9403935	15							
8734	32.4960938	15	3919	31.2555008	15	9216	31.2374115	15	6525	30.962532	15	8210	31.2880478	15	7890	31.3278351	15	1137	24.9186935	15							
8735	32.4563065	15	3920	31.2191298	15	9217	31.1940079	15	6526	30.98423	15	8211	31.2301788	15	7891	31.3059534	15	1138	24.9403935	15							
8736	32.4454575	15	3921	31.1750926	15	9218	31.1614609	15	6527	31.0023193	15	8212	31.1976318	15	7892	31.3206024	15	1139	24.92509262	15							
8737	32.4780121	15	3922	31.1903915	15	9219	31.1650772	15	6528	30.9321101	15	8213	31.2084808	15	7893	31.353157	15	1140	24.9367752	15							
8738	32.4960938	15	3923	31.1750926	15	9220	31.1831589	15	6529	30.9552994	15	8214	31.2337952	15	7894	31.3278351	15	1141	24.9313589	15							
8739	32.4743958	15	3924	31.1831589	15	9221	31.2084808	15	6530	31.009552	15	8215	31.2084808	15	7895	31.3567734	15	1142	24.9693298	15							
8740	32.4129028	15	3925	31.1795425	15	9222	31.1578445	15	6531	30.9661484	15	8216	31.2012482	15	7896	31.3459242	15	1143	24.9440079	15							
8741	32.4635391	15	3926	31.2157135	15	9223	31.1614609	15	6532	30.9261611	15	8217	31.2627335	15	7897	31.2916641	15	1144	24.9729462	15							
8742	32.3948212	15	3927	31.1650772	15	9224	31.1795425	15	6533	30.9082794	15	8218	31.2446518	15	7898	31.3278351	15	1145	24.9620972	15							
8743	32.4237595	15	3928	31.1940079	15	9225	31.1976318	15	6534	30.9191284	15	8219	31.2518845	15	7899	31.3784714	15	1146	24.9584808	15							
8744	32.4852448	15	3929	31.1940079	15	9226	31.2265625	15	6535	30.9227448	15	8220	31.3025208	15	7900	31.374855	15	1147	24.9729462	15							
8745	32.4273758	15	3930	31.1940079	15	9227	31.2374115	15	6536	30.9227448	15	8221	31.2191298	15	7901	31.3784714	15	1148	24.9403935	15							
8746	32.4056702	15	3931	31.2120972	15	9228	31.2627335	15	6537	30.9227448	15	8222	31.3025208	15	7902	31.3966027	15	1149	24.9620972	15							
8747	32.3695068	15	3932	31.2374115	15	9229	31.2735825	15	6538	30.9480591	15	8223	31.2880478	15	7903	31.374855	15	1150	24.9403935	15							
8748	32.3839722	15	3933	31.2084808	15	9230	31.2374115	15	6539	30.9552994	15	8224	31.2699661	15	7904	31.353157	15	1151	24.9440079	15							
8749	32.4201431	15	3934	31.2084808	15	9231	31.2663498	15	6540	30.9227448	15	8225	31.2989044	15	7905	31.3350677	15	1152	24.9006119	15							
8750	32.3839722	15	3935	31.2157135	15	9232	31.2808151	15	6541	30.8504028	15	8226	31.342308	15	7906	31.3350677	15	1153	24.9584808	15							
8751	32.3839722	15	3936	31.2120972	15	9233	31.2446518	15	6542	30.8684921	15	8227	31.3025208	15	7907	31.3567734	15	1154	24.9874115	15							
8752	32.4382248	15	3937	31.1976318	15	9234	31.2265625	15	6543	30.8938065	15	8228	31.2808151	15	7908	31.364006	15	1155	24.9874115	15							
8753	32.3731212	15	3938	31.1903915	15	9235	31.1976318	15	6544	30.9259774	15	8229	31.2735825	15	7909	31.3603897	15	1156	24.9693298	15							
8754	32.4092865	15	3939	31.1903915	15	9236	31.2482681	15	6545	30.918958	15	8230	31.2663498	15	7910	31.400177	15	1157	24.9313589	15							
8755	32.3948212	15	3940	31.1650772	15	9237	31.2120972	15	6546	30.9046631	15	8231	31.2627335	15	7911	31.3603897	15	1158	24.9729462	15							
8756	32.4092865	15	3941	31.2084808	15	9238	31.2265625	15	6547	30.8106232	15	8232	31.2989044	15	7912	31.374855	15	1159	24.9512482	15							
8757	32.4237595	15	3942	31.1795425	15	9239	31.2843125	15	6548	30.8178558	15	8233	31.2880478	15	7913	31.4182587	15	1160	24.9584808	15							
8758	32.3948212	15	3943	31.2446518	15	9240	31.2843125	15	6549	30.8323212	15	8234	31.2808151	15	7914	31.3924431	15	1161	24.9313589	15							
8759	32.3731212	15	3944	31.2120972	15	9241	31.2843125	15	6550	30.8270488	15	8235	31.2880478	15	7915	31.432724	15	1162	24.9584808	15							
8760	32.4020538	15	3945	31.2265625	15	9242	31.3025208	15	6551	30.8721085	15	8236	31.2699661	15	7916	31.400177	15	1163	24.9620972	15							
8761	32.3912048	15	3946	31.2374115	15	9243	31.2735825	15	6552	30.9031081	15	8237	31.2699661	15	7917	31.4182587	15	1164	24.9440079	15							
8762	32.3875835	15	3947	31.2265625	15	9244	31.3061371	15	6553	30.8684921	15	8238	31.2084808	15	7918	31.3924431	15	1165	25.0235625	15							
8763	32.4129028	15	3948	31.2191298	15	9245	31.3061371	15	6554	30.8359375	15	8239	31.2555008	15	7919	31.4291077	15	1166	25.0416641	15							
8764	32.4201431	15	3949	31.2374115	15	9246	31.2627335	15	6555	30.7952339	15	8240	31.2627335	15	7920	31.380877	15	1167	25.0163498	15							
8765	32.4237595	15	3950	31.2337952	15	9247	31.2337952	15	6556	30.7997665	15	8241	31.2663498	15	7921	31.386841	15	1168	25.0669861	15							
8766	32.4852448	15	3951	31.2012482	15	9248	31.2627335	15	6557	30.8142395	15	8242	31.2663498	15	7922	31.37485											



(continua Anexo U) (parte 2/16).

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 10 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 5TUBOS				PLANTA 4TUBOS				PLANTA 3TUBO				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 1TUBO				OK			
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
8810	32,4237595	15	3995	31,244618	15	9292	31,2735825	15	6601	30,7836032	15	8286	31,1903915	15	5866	31,2337952	15	3213	25,0050677	15				3213	25,0050677	15	
8811	32,4780121	15	3996	31,2402681	15	9293	31,2518845	15	6602	30,7201996	15	8287	31,1940079	15	5867	31,2627335	15	3214	25,0308151	15				3214	25,0308151	15	
8812	32,4743958	15	3997	31,2265625	15	9294	31,2808478	15	6603	30,7382813	15	8288	31,1799262	15	5868	31,2446518	15	3215	25,0163498	15				3215	25,0163498	15	
8813	32,4671631	15	3998	31,2402681	15	9295	31,2482681	15	6604	30,7671295	15	8289	31,2084808	15	5869	31,2518845	15	3216	25,0452881	15				3216	25,0452881	15	
8814	32,4816264	15	3999	31,2989044	15	9296	31,2482681	15	6605	30,8214722	15	8290	31,1650772	15	5870	31,2627335	15	3217	25,0235825	15				3217	25,0235825	15	
8815	32,4924774	15	4000	31,2374115	15	9297	31,2374115	15	6606	30,7816848	15	8291	31,1614609	15	5871	31,2446518	15	3218	25,0308151	15				3218	25,0308151	15	
8816	32,4480738	15	4001	31,2735825	15	9298	31,2157135	15	6607	30,8467865	15	8292	31,1650772	15	5872	31,2555008	15	3219	25,0416641	15				3219	25,0416641	15	
8817	32,4237595	15	4002	31,2663498	15	9299	31,2265625	15	6608	30,8106232	15	8293	31,1795425	15	5873	31,2120972	15	3220	25,0416641	15				3220	25,0416641	15	
8818	32,4816264	15	4003	31,2808151	15	9300	31,1795425	15	6609	30,8214722	15	8294	31,1361389	15	5874	31,2555008	15	3221	25,0271988	15				3221	25,0271988	15	
8819	32,514183	15	4004	31,3025208	15	9301	31,1650772	15	6610	30,8287048	15	8295	31,1578445	15	5875	31,2555008	15	3222	25,0489044	15				3222	25,0489044	15	
8820	32,514183	15	4005	31,2663498	15	9302	31,2120972	15	6611	30,7997665	15	8296	31,1723099	15	5876	31,3025208	15	3223	24,9756265	15				3223	24,9756265	15	
8821	32,5286484	15	4006	31,2555008	15	9303	31,2265625	15	6612	30,8323212	15	8297	31,1542282	15	5877	31,2044315	15	3224	24,9946518	15				3224	24,9946518	15	
8822	32,5177994	15	4007	31,2808151	15	9304	31,2120972	15	6613	30,8323212	15	8298	31,1903915	15	5878	31,2916641	15	3225	24,9548645	15				3225	24,9548645	15	
8823	32,4924774	15	4008	31,2627335	15	9305	31,237952	15	6614	30,8938065	15	8299	31,1650772	15	5879	31,2555008	15	3226	24,9367752	15				3226	24,9367752	15	
8824	32,5286484	15	4009	31,2735825	15	9306	31,2193288	15	6615	30,9082794	15	8300	31,1723099	15	5880	31,2699661	15	3227	24,9078445	15				3227	24,9078445	15	
8825	32,557579	15	4010	31,3278351	15	9307	31,2518845	15	6616	30,885738	15	8301	31,1795425	15	5881	31,2663498	15	3228	24,9620972	15				3228	24,9620972	15	
8826	32,5286484	15	4011	31,342308	15	9308	31,2265625	15	6617	30,8287048	15	8302	31,1795262	15	5882	31,2808151	15	3229	24,9693288	15				3229	24,9693288	15	
8827	32,514183	15	4012	31,342308	15	9309	31,2012482	15	6618	30,8504028	15	8303	31,2265625	15	5883	31,2555008	15	3230	24,9548645	15				3230	24,9548645	15	
8828	32,5214157	15	4013	31,353157	15	9310	31,2193288	15	6619	30,8504028	15	8304	31,1903915	15	5884	31,237952	15	3231	25,0127335	15				3231	25,0127335	15	
8829	32,4780121	15	4014	31,3567734	15	9311	31,1795262	15	6620	30,8399375	15	8305	31,237952	15	5885	31,2808478	15	3232	25,0235825	15				3232	25,0235825	15	
8830	32,5394874	15	4015	31,3386841	15	9312	31,2012482	15	6621	30,940268	15	8306	31,2482681	15	5886	31,169861	15	3233	24,9882681	15				3233	24,9882681	15	
8831	32,4852448	15	4016	31,2989044	15	9313	31,1469959	15	6622	30,885738	15	8307	31,2482681	15	5887	31,3242188	15	3234	25,0127335	15				3234	25,0127335	15	
8832	32,514183	15	4017	31,3097534	15	9314	31,1650772	15	6623	30,9118958	15	8308	31,2084808	15	5888	31,2989044	15	3235	24,9801788	15				3235	24,9801788	15	
8833	32,5105591	15	4018	31,342308	15	9315	31,2120972	15	6624	30,9191284	15	8309	31,1940079	15	5889	31,3097534	15	3236	24,9946518	15				3236	24,9946518	15	
8834	32,514183	15	4019	31,3820877	15	9316	31,2518845	15	6625	30,9046631	15	8310	31,2012482	15	5890	31,3242188	15	3237	25,0163498	15				3237	25,0163498	15	
8835	32,5039264	15	4020	31,4182877	15	9317	31,2301788	15	6626	30,9010391	15	8311	31,2084808	15	5891	31,3097534	15	3238	24,9874115	15				3238	24,9874115	15	
8836	32,5105591	15	4021	31,3893204	15	9318	31,2446518	15	6627	30,9501901	15	8312	31,2193288	15	5892	31,2808151	15	3239	24,9693288	15				3239	24,9693288	15	
8837	32,4743958	15	4022	31,4254913	15	9319	31,2518845	15	6628	30,983065	15	8313	31,2157135	15	5893	31,374855	15	3240	24,9331589	15				3240	24,9331589	15	
8838	32,4635391	15	4023	31,3929443	15	9320	31,2555008	15	6629	30,864921	15	8314	31,2916641	15	5894	31,3712387	15	3241	24,9756265	15				3241	24,9756265	15	
8839	32,4924774	15	4024	31,374855	15	9321	31,237952	15	6630	30,983065	15	8315	31,2844315	15	5895	31,3242188	15	3242	24,9232099	15				3242	24,9232099	15	
8840	32,4960938	15	4025	31,353157	15	9322	31,2446518	15	6631	30,972101	15	8316	31,2808478	15	5896	31,374855	15	3243	24,9874115	15				3243	24,9874115	15	
8841	32,4671631	15	4026	31,3784714	15	9323	31,2482681	15	6632	30,9010391	15	8317	31,2916641	15	5897	31,353157	15	3244	24,9188935	15				3244	24,9188935	15	
8842	32,4997101	15	4027	31,4074097	15	9324	31,2735825	15	6633	30,862794	15	8318	31,2301788	15	5898	31,353157	15	3245	24,9440079	15				3245	24,9440079	15	
8843	32,514183	15	4028	31,3893204	15	9325	31,3061371	15	6634	30,9082794	15	8319	31,3097534	15	5899	31,342308	15	3246	24,9440079	15				3246	24,9440079	15	
8844	32,4960938	15	4029	31,447197	15	9326	31,2808478	15	6635	30,9118958	15	8320	31,2808478	15	5900	31,3386841	15	3247	24,9548645	15				3247	24,9548645	15	
8845	32,4852448	15	4030	31,4363403	15	9327	31,2663498	15	6636	30,9046631	15	8321	31,2808478	15	5901	31,349244	15	3248	24,9440079	15				3248	24,9440079	15	
8846	32,4960938	15	4031	31,4363403	15	9328	31,2301788	15	6637	30,9082794	15	8322	31,3169861	15	5902	31,353157	15	3249	24,9042382	15				3249	24,9042382	15	
8847	32,4960938	15	4032	31,4506133	15	9329	31,2482681	15	6638	30,8576431	15	8323	31,3025208	15	5903	31,353157	15	3250	24,9331589	15				3250	24,9331589	15	
8848	32,5214157	15	4033	31,4254913	15	9330	31,2518845	15	6639	30,8214722	15	8324	31,2735825	15	5904	31,4363403	15	3251	24,9367752	15				3251	24,9367752	15	
8849	32,5214157	15	4034	31,4363403	15	9331	31,2916641	15	6640	30,8142395	15	8325	31,2989044	15	5905	31,4074097	15	3252	24,9756265	15</							



(continua Anexo U) (parte 3/16)

PRUEBA 17 08 04 2022 Identificación				PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO PLANTA 5TUBOS				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO PLANTA 4TUBOS				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO PLANTA 3TUBO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO PLANTA 2TUBOS				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO PLANTA 1TUBO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
X(ms)	T4 °C	VDF H ₂		X(ms)	T4 °C	VDF H ₂		X(ms)	T4 °C	VDF H ₂		X(ms)	T4 °C	VDF H ₂		X(ms)	T4 °C	VDF H ₂		X(ms)	T4 °C	VDF H ₂		X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	
8896	32,3948212	15	4081	31,280478	15	9378	31,3097534	15	6687	30,7310486	15	8372	31,2012482	15	3952	31,3061371	15	5299	25,0706024	15							
8897	32,3658029	15	4082	31,3061371	15	9379	31,3061371	15	6688	30,7310486	15	8373	31,1650772	15	3953	31,3459244	15	5300	25,0344315	15							
8898	32,3506502	15	4083	31,2916641	15	9380	31,280478	15	6689	30,7706065	15	8374	31,1469955	15	3954	31,3169661	15	5301	25,0416641	15							
8899	32,3550339	15	4084	31,3242188	15	9381	31,2755025	15	6690	30,7238159	15	8375	31,1650772	15	3955	31,3097534	15	5302	25,0416641	15							
8900	32,4020538	15	4085	31,2446518	15	9382	31,2193298	15	6691	30,7328135	15	8376	31,1397552	15	3956	31,3278351	15	5303	25,0344315	15							
8901	32,3767395	15	4086	31,2627335	15	9383	31,2844315	15	6692	30,7491302	15	8377	31,0999756	15	3957	31,3169661	15	5304	25,080677	15							
8902	32,3767395	15	4087	31,2696661	15	9384	31,2374115	15	6693	30,8033829	15	8378	31,1397552	15	3958	31,342308	15	5305	25,086841	15							
8903	32,4039921	15	4088	31,2518845	15	9385	31,2663498	15	6694	30,7961502	15	8379	31,1216736	15	3959	31,3278351	15	5306	25,0489044	15							
8904	32,4056702	15	4089	31,2663498	15	9386	31,2518845	15	6695	30,8033829	15	8380	31,056572	15	3960	31,3278351	15	5307	25,0778351	15							
8905	32,4020538	15	4090	31,2446518	15	9387	31,2663498	15	6696	30,8214722	15	8381	31,0710373	15	3961	31,342308	15	5308	25,0308151	15							
8906	32,3751232	15	4091	31,2555008	15	9388	31,2482681	15	6697	30,8359375	15	8382	31,067421	15	3962	31,3386841	15	5309	25,0271988	15							
8907	32,3912048	15	4092	31,2518845	15	9389	31,2337952	15	6698	30,8359375	15	8383	31,0927353	15	3963	31,3097534	15	5310	25,0308151	15							
8908	32,4056702	15	4093	31,2193298	15	9390	31,2916641	15	6699	30,8359375	15	8384	31,0818863	15	3964	31,3278351	15	5311	25,0344315	15							
8909	32,4056702	15	4094	31,2755025	15	9391	31,2555008	15	6700	30,8178558	15	8385	31,1072083	15	3965	31,3025208	15	5312	25,0163498	15							
8910	32,3948212	15	4095	31,2663498	15	9392	31,2374115	15	6701	30,7816049	15	8386	31,0927353	15	3966	31,3097534	15	5313	25,0271988	15							
8911	32,3767395	15	4096	31,3061371	15	9393	31,2555008	15	6702	30,8106232	15	8387	31,1397552	15	3967	31,280478	15	5314	25,005008	15							
8912	32,3948212	15	4097	31,2518845	15	9394	31,2916641	15	6703	30,8540268	15	8388	31,1397552	15	3968	31,3386841	15	5315	24,9874115	15							
8913	32,3912048	15	4098	31,2844315	15	9395	31,2374115	15	6704	30,8938065	15	8389	31,1397552	15	3969	31,3242188	15	5316	24,9512482	15							
8914	32,3224869	15	4099	31,2755025	15	9396	31,2627335	15	6705	30,8721085	15	8390	31,1289063	15	3970	31,3386841	15	5317	24,9693298	15							
8915	32,3224869	15	4100	31,2755025	15	9397	31,2518845	15	6706	30,8865738	15	8391	31,1252899	15	3971	31,3206024	15	5318	24,9078445	15							
8916	32,3550339	15	4101	31,3025208	15	9398	31,2374115	15	6707	30,9118958	15	8392	31,1252899	15	3972	31,3567734	15	5319	24,9910278	15							
8917	32,3333539	15	4102	31,280478	15	9399	31,2663498	15	6708	30,8901901	15	8393	31,1252899	15	3973	31,3640067	15	5320	24,9403915	15							
8918	32,3297195	15	4103	31,3025208	15	9400	31,280478	15	6709	30,9046631	15	8394	31,1108246	15	3974	31,3820877	15	5321	24,9982601	15							
8919	32,3550339	15	4104	31,2990444	15	9401	31,3386841	15	6710	30,8901901	15	8395	31,067421	15	3975	31,3567734	15	5322	24,9982601	15							
8920	32,3478012	15	4105	31,2844315	15	9402	31,3169661	15	6711	30,8648758	15	8396	31,0999756	15	3976	31,374855	15	5323	24,9693298	15							
8921	32,3224869	15	4106	31,2755025	15	9403	31,3097534	15	6712	30,8757248	15	8397	31,1072083	15	3977	31,3820877	15	5324	24,9584008	15							
8922	32,3514175	15	4107	31,2663498	15	9404	31,3097534	15	6713	30,9010391	15	8398	31,0638046	15	3978	31,3386841	15	5325	24,9512482	15							
8923	32,3405685	15	4108	31,2518845	15	9405	31,3097534	15	6714	30,8757248	15	8399	31,0710373	15	3979	31,3206024	15	5326	24,923099	15							
8924	32,3297195	15	4109	31,2374115	15	9406	31,3097534	15	6715	30,8757248	15	8400	31,0855026	15	3980	31,4146423	15	5327	24,9186935	15							
8925	32,3405685	15	4110	31,2518845	15	9407	31,2265625	15	6716	30,9321091	15	8401	31,056572	15	3981	31,3784714	15	5328	24,9548645	15							
8926	32,3550339	15	4111	31,2157135	15	9408	31,2989044	15	6717	30,9599157	15	8402	31,0457153	15	3982	31,3929443	15	5329	24,9512482	15							
8927	32,3333539	15	4112	31,2012482	15	9409	31,2989044	15	6718	30,9552964	15	8403	31,0818863	15	3983	31,4074097	15	5330	24,9259262	15							
8928	32,3514175	15	4113	31,2157135	15	9410	31,2916641	15	6719	30,9402824	15	8404	31,0710373	15	3984	31,432724	15	5331	24,9078445	15							
8929	32,3333539	15	4114	31,1903915	15	9411	31,3603897	15	6720	30,9086137	15	8405	31,0710373	15	3985	31,4435806	15	5332	24,923099	15							
8930	32,3405685	15	4115	31,2084808	15	9412	31,3206024	15	6721	30,9405991	15	8406	31,056572	15	3986	31,400177	15	5333	24,8897552	15							
8931	32,3514175	15	4116	31,2012482	15	9413	31,3206024	15	6722	30,9191284	15	8407	31,1108246	15	3987	31,4182587	15	5334	24,8499756	15							
8932	32,3751232	15	4117	31,2157135	15	9414	31,3206024	15	6723	30,9082794	15	8408	31,1108073	15	3988	31,3893204	15	5335	24,923099	15							
8933	32,3478012	15	4118	31,1795425	15	9415	31,3459244	15	6724	30,9010391	15	8409	31,1035919	15	3989	31,353157	15	5336	24,9042282	15							
8934	32,3333539	15	4119	31,2482681	15	9416	31,353157	15	6725	30,9227448	15	8410	31,0927353	15	3990	31,4363403	15	5337	24,8535919	15							
8935	32,3839722	15	4120	31,2374115	15	9417	31,3278351	15	6726	30,9599157	15	8411	31,0999756	15	3991	31,432724	15	5338	24,9403915	15							
8936	32,3478012	15	4121	31,2012482	15	9418	31,3386841	15	6727	31,009552	15	8412	31,1108246	15	3992	31,4508133	15	5339	24,9042282	15							
8937	32,3751232	15	4122	31,1976318	15	9419	31,3015208	15	6728	30,9969954	15	8413	31,0638046	15	3993	31,432724	15	5340	24,8897552	15							
8938	32,3333539	15	4123	31,2012482	15	9420	31,3097534	15																			



(continua Anexo U) (parte 4/16)

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 08 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 08 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 08 2022 FALLO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 5Tubos				PLANTA 4Tubos				PLANTA 3TUBO				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 1TUBO							
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
8982	32,333359	15	4187	31,395580	15	9464	31,429107	15	6773	30,8359375	15	8458	31,1108246	15	4038	31,4148423	15	3385	24,9440079	15							
8983	32,333359	15	4168	31,353157	15	9465	31,3278351	15	6774	30,8359375	15	8459	31,0818863	15	4039	31,3350677	15	3386	24,9693280	15							
8984	32,2790833	15	4169	31,3929443	15	9466	31,3423008	15	6775	30,8540268	15	8460	31,0529556	15	4040	31,3459244	15	3387	24,9756525	15							
8985	32,3214869	15	4170	31,3820877	15	9467	31,400177	15	6776	30,8576431	15	8461	31,0855026	15	4041	31,3242180	15	3388	25,0127355	15							
8986	32,3566502	15	4171	31,374855	15	9468	31,353157	15	6777	30,8142395	15	8462	31,0746536	15	4042	31,364006	15	3389	24,9601788	15							
8987	32,2935486	15	4172	31,374855	15	9469	31,3929443	15	6778	30,8359375	15	8463	31,1180573	15	4043	31,353157	15	3390	24,9674115	15							
8988	32,3514175	15	4173	31,4182587	15	9470	31,350677	15	6779	30,8142395	15	8464	31,1108246	15	4044	31,3893204	15	3391	24,9756525	15							
8989	32,3180705	15	4174	31,3965607	15	9471	31,3567734	15	6780	30,8467065	15	8465	31,0855026	15	4045	31,3929443	15	3392	24,9946510	15							
8990	32,3478012	15	4175	31,4363403	15	9472	31,3459244	15	6781	30,8540268	15	8466	31,0710373	15	4046	31,3893204	15	3393	24,9620972	15							
8991	32,3152466	15	4176	31,411026	15	9473	31,386641	15	6782	30,8359375	15	8467	31,067421	15	4047	31,3738351	15	3394	24,9729462	15							
8992	32,3043976	15	4177	31,4291077	15	9474	31,2808151	15	6783	30,8721085	15	8468	31,056572	15	4048	31,2808151	15	3395	25,0059008	15							
8993	32,3369522	15	4178	31,4291077	15	9475	31,2699661	15	6784	30,8576431	15	8469	31,1108246	15	4049	31,2844315	15	3396	24,9756525	15							
8994	32,3116302	15	4179	31,4182587	15	9476	31,2989044	15	6785	30,8393065	15	8470	31,1035919	15	4050	31,2989044	15	3397	24,9729462	15							
8995	32,2826996	15	4180	31,4652786	15	9477	31,350677	15	6786	30,8287040	15	8471	31,1469955	15	4051	31,3206024	15	3398	24,9367752	15							
8996	32,2826996	15	4181	31,4254813	15	9478	31,3169661	15	6787	30,9191284	15	8472	31,1578445	15	4052	31,3242180	15	3399	24,9440079	15							
8997	32,2971849	15	4182	31,400177	15	9479	31,3025208	15	6788	30,9019031	15	8473	31,0818863	15	4053	31,374655	15	3400	24,9601788	15							
8998	32,3180705	15	4183	31,4291077	15	9480	31,2808151	15	6789	30,9191284	15	8474	31,0999756	15	4054	31,3169661	15	3401	24,9756525	15							
8999	32,3152466	15	4184	31,400177	15	9481	31,2735825	15	6790	30,8829575	15	8475	31,0818863	15	4055	31,3242180	15	3402	24,9331589	15							
9000	32,3043976	15	4185	31,4508133	15	9482	31,2301788	15	6791	30,8721085	15	8476	31,0818863	15	4056	31,2844315	15	3403	24,9601788	15							
9001	32,3007013	15	4186	31,447197	15	9483	31,2627335	15	6792	30,8829575	15	8477	31,089119	15	4057	31,2699661	15	3404	24,9584008	15							
9002	32,3152466	15	4187	31,4182587	15	9484	31,2555008	15	6793	30,8540268	15	8478	31,1795425	15	4058	31,2555008	15	3405	24,9042282	15							
9003	32,3180705	15	4188	31,447197	15	9485	31,2337952	15	6794	30,9263611	15	8479	31,1723099	15	4059	31,2337952	15	3406	24,9693280	15							
9004	32,2754669	15	4189	31,3965607	15	9486	31,2374115	15	6795	30,9589157	15	8480	31,1723099	15	4060	31,2265625	15	3407	24,9601788	15							
9005	32,3180705	15	4190	31,3567734	15	9487	31,1940079	15	6796	30,9529944	15	8481	31,2084080	15	4061	31,2301788	15	3408	24,9946510	15							
9006	32,3007013	15	4191	31,364006	15	9488	31,1978310	15	6797	30,9408264	15	8482	31,1469955	15	4062	31,2663490	15	3409	24,9674115	15							
9007	32,3152466	15	4192	31,3965607	15	9489	31,2084080	15	6798	30,9408264	15	8483	31,1435716	15	4063	31,2844315	15	3410	24,9910270	15							
9008	32,2935486	15	4193	31,400177	15	9490	31,2448510	15	6799	30,9263611	15	8484	31,2374115	15	4064	31,2989044	15	3411	24,9546645	15							
9009	32,2754669	15	4194	31,4074097	15	9491	31,2157135	15	6800	30,9227440	15	8485	31,2012482	15	4065	31,2808151	15	3412	24,9403915	15							
9010	32,2935486	15	4195	31,364006	15	9492	31,2120972	15	6801	30,9299774	15	8486	31,2157135	15	4066	31,2627335	15	3413	24,9078445	15							
9011	32,2826996	15	4196	31,3784714	15	9493	31,2518045	15	6802	30,9529944	15	8487	31,2012482	15	4067	31,2482681	15	3414	24,9440079	15							
9012	32,2754669	15	4197	31,350677	15	9494	31,2157135	15	6803	30,9444227	15	8488	31,1723099	15	4068	31,2735825	15	3415	24,9403915	15							
9013	32,2826996	15	4198	31,353157	15	9495	31,2193290	15	6804	30,9661484	15	8489	31,1759262	15	4069	31,2989044	15	3416	24,9512482	15							
9014	32,2790833	15	4199	31,3423008	15	9496	31,2193290	15	6805	31,009552	15	8490	31,1940079	15	4070	31,3025208	15	3417	24,9546645	15							
9015	32,2971849	15	4200	31,353157	15	9497	31,2301788	15	6806	30,9914627	15	8491	31,2084080	15	4071	31,2699661	15	3418	24,9674115	15							
9016	32,3116302	15	4201	31,2916641	15	9498	31,1759262	15	6807	30,9661484	15	8492	31,2120972	15	4072	31,2518045	15	3419	24,9546645	15							
9017	32,3116302	15	4202	31,3025208	15	9499	31,1940079	15	6808	30,9806137	15	8493	31,2301788	15	4073	31,2699661	15	3420	24,9403915	15							
9018	32,333359	15	4203	31,2699661	15	9500	31,2120972	15	6809	30,9769974	15	8494	31,2627335	15	4074	31,2448510	15	3421	24,9367752	15							
9019	32,3767995	15	4204	31,2735825	15	9501	31,2084080	15	6810	30,9986954	15	8495	31,2482681	15	4075	31,2518045	15	3422	24,9150772	15							
9020	32,3731232	15	4205	31,3061371	15	9502	31,2374115	15	6811	30,9589157	15	8496	31,2301788	15	4076	31,2448510	15	3423	24,8969955	15							
9021	32,3695080	15	4206	31,2735825	15	9503	31,2265625	15	6812	31,0746536	15	8497	31,2482681	15	4077	31,2374115	15	3424	24,9006119	15							
9022	32,3658029	15	4207	31,2844315	15	9504	31,2301788	15	6813	31,067421	15	8498	31,2627335	15	4078	31,2844315	15	3425	24,8716736	15							
9023	32,3045685	15	4208	31,2627335	15	9505	31,2193290	15	6814	31,0384627	15	8499	31,2916641	15	4079	31,2482681	15	3426	24,8606246	15							
9024	32,3731232	15	4209	31,3169661	15	9506	31,1940079	15	6815	31,0276337	15	8500	31,2482681	15	4080	31,2663490	15	3427	24,9006119	15							
9025	32,3731232	15	4210	31,3169661	15	9507	31																				



(continua Anexo U) (parte 5/16)

PRUEBA 17 08 04 2022			PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO			PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO			PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO			PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK		
Identificación			PLANTA 3TUBOS			PLANTA 4TUBOS			PLANTA 3TUBO			PLANTA 2TUBOS			PLANTA 1TUBO			OK		
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz
9068	32,389722	15	4253	31,2193298	15	9550	31,3169861	15	6859	30,9552994	15	8544	31,1216736	15	4124	31,3784714	15	3471	24,8699555	15
9069	32,4119028	15	4254	31,1650772	15	9551	31,3242188	15	6860	30,9191284	15	8545	31,1469955	15	4125	31,4001777	15	3472	24,8680573	15
9070	32,3912048	15	4255	31,1940079	15	9552	31,3603897	15	6861	30,9227448	15	8546	31,089119	15	4126	31,3784714	15	3473	24,9108935	15
9071	32,3875805	15	4256	31,1650772	15	9553	31,374855	15	6862	30,9046651	15	8547	31,1252999	15	4127	31,4254913	15	3474	24,8699555	15
9072	32,3875805	15	4257	31,1397552	15	9554	31,364006	15	6863	30,9263611	15	8548	31,1361389	15	4128	31,3965607	15	3475	24,8535919	15
9073	32,3912048	15	4258	31,1723099	15	9555	31,4001777	15	6864	30,9227448	15	8549	31,1180573	15	4129	31,3893204	15	3476	24,8825226	15
9074	32,3912048	15	4259	31,1795425	15	9556	31,4001777	15	6865	30,9010391	15	8550	31,1180573	15	4130	31,3965607	15	3477	24,8644409	15
9075	32,4020538	15	4260	31,1903915	15	9557	31,3965607	15	6866	30,8901901	15	8551	31,1361389	15	4131	31,4146423	15	3478	24,9512482	15
9076	32,3875805	15	4261	31,2157135	15	9558	31,3784714	15	6867	30,9227448	15	8552	31,1035919	15	4132	31,3929443	15	3479	24,9693290	15
9077	32,4204131	15	4262	31,2157135	15	9559	31,3929443	15	6868	30,9299774	15	8553	31,1252999	15	4133	31,3965607	15	3480	24,9765625	15
9078	32,4563065	15	4263	31,2193298	15	9560	31,3712387	15	6869	30,9118958	15	8554	31,1108246	15	4134	31,4146423	15	3481	24,9440079	15
9079	32,4273758	15	4264	31,2157135	15	9561	31,374855	15	6870	30,9010391	15	8555	31,1180573	15	4135	31,3820677	15	3482	24,9620972	15
9080	32,4382248	15	4265	31,2120972	15	9562	31,374855	15	6871	30,9118958	15	8556	31,1035919	15	4136	31,3820677	15	3483	24,9331589	15
9081	32,4382248	15	4266	31,2265625	15	9563	31,3820677	15	6872	30,9118958	15	8557	31,1216736	15	4137	31,353157	15	3484	24,9440079	15
9082	32,4418411	15	4267	31,2374115	15	9564	31,342308	15	6873	30,9263611	15	8558	31,1072083	15	4138	31,3499244	15	3485	24,9001780	15
9083	32,4309921	15	4268	31,2374115	15	9565	31,342308	15	6874	30,9062794	15	8559	31,1180573	15	4139	31,3506677	15	3486	24,9946510	15
9084	32,4635391	15	4269	31,2193298	15	9566	31,3368641	15	6875	30,9191284	15	8560	31,1180573	15	4140	31,3506677	15	3487	24,9074115	15
9085	32,4119028	15	4270	31,1976318	15	9567	31,2990044	15	6876	30,9372101	15	8561	31,1397552	15	4141	31,3506677	15	3488	24,9765625	15
9086	32,4237595	15	4271	31,2120972	15	9568	31,2880478	15	6877	30,9191284	15	8562	31,1072083	15	4142	31,3712387	15	3489	24,9074115	15
9087	32,4273758	15	4272	31,1940079	15	9569	31,2990044	15	6878	30,9191284	15	8563	31,1433716	15	4143	31,364006	15	3490	24,9765625	15
9088	32,4273758	15	4273	31,2120972	15	9570	31,2482681	15	6879	30,9440591	15	8564	31,1180573	15	4144	31,353157	15	3491	24,9729462	15
9089	32,4119028	15	4274	31,2301768	15	9571	31,2916641	15	6880	30,995079	15	8565	31,0999756	15	4145	31,374855	15	3492	24,9693290	15
9090	32,4743958	15	4275	31,2120972	15	9572	31,2844315	15	6881	30,995079	15	8566	31,1433716	15	4146	31,3712387	15	3493	24,9729462	15
9091	32,4671631	15	4276	31,2158455	15	9573	31,3015208	15	6882	31,009552	15	8567	31,0999756	15	4147	31,3567734	15	3494	24,9946510	15
9092	32,4924774	15	4277	31,1976318	15	9574	31,3015208	15	6883	31,0023193	15	8568	31,0529556	15	4148	31,3712387	15	3495	25,0127335	15
9093	32,4852448	15	4278	31,2482681	15	9575	31,2663498	15	6884	30,9966954	15	8569	31,1035919	15	4149	31,3506677	15	3496	25,0235825	15
9094	32,5033264	15	4279	31,1903915	15	9576	31,2808151	15	6885	30,973581	15	8570	31,1542282	15	4150	31,396661	15	3497	25,0344315	15
9095	32,4816284	15	4280	31,237952	15	9577	31,2374115	15	6886	31,0023193	15	8571	31,1650772	15	4151	31,396661	15	3498	25,0235825	15
9096	32,4743958	15	4281	31,1940079	15	9578	31,2699661	15	6887	31,0131663	15	8572	31,1433716	15	4152	31,3025208	15	3499	25,0235825	15
9097	32,4743958	15	4282	31,2265625	15	9579	31,2627335	15	6888	31,0276337	15	8573	31,1542282	15	4153	31,3097534	15	3500	25,0451881	15
9098	32,514103	15	4283	31,2193298	15	9580	31,2916641	15	6889	31,0475153	15	8574	31,1542282	15	4154	31,3242188	15	3501	25,0416641	15
9099	32,4743958	15	4284	31,2374115	15	9581	31,2518845	15	6890	31,009552	15	8575	31,1469955	15	4155	31,3278351	15	3502	25,0235825	15
9100	32,5033264	15	4285	31,2301768	15	9582	31,255008	15	6891	31,0348663	15	8576	31,1361389	15	4156	31,3169861	15	3503	25,0271980	15
9101	32,4563065	15	4286	31,2157135	15	9583	31,2699661	15	6892	31,03125	15	8577	31,1397552	15	4157	31,3169861	15	3504	25,0271980	15
9102	32,4780121	15	4287	31,2193298	15	9584	31,2446518	15	6893	31,0131663	15	8578	31,1433716	15	4158	31,342308	15	3505	25,0308151	15
9103	32,4780121	15	4288	31,2446518	15	9585	31,2501768	15	6894	31,0023193	15	8579	31,1216736	15	4159	31,3169861	15	3506	25,0127335	15
9104	32,4924774	15	4289	31,2265625	15	9586	31,2012482	15	6895	30,9966954	15	8580	31,1614609	15	4160	31,273825	15	3507	24,9982681	15
9105	32,514103	15	4290	31,1940079	15	9587	31,2120972	15	6896	30,995079	15	8581	31,1289063	15	4161	31,3025208	15	3508	25,0091171	15
9106	32,5033264	15	4291	31,1795425	15	9588	31,1831589	15	6897	30,9914627	15	8582	31,1252899	15	4162	31,2482681	15	3509	25,035825	15
9107	32,535881	15	4292	31,1976318	15	9589	31,2193298	15	6898	31,056572	15	8583	31,1180573	15	4163	31,280478	15	3510	25,0235825	15
9108	32,496938	15	4293	31,1723099	15	9590	31,2157135	15	6899	31,0710373	15	8584	31,1108246	15	4164	31,2955008	15	3511	25,0525208	15
9109	32,5503464	15	4294	31,1795425	15	9591	31,2120972	15	6900	31,0818263	15	8585	31,1542282	15	4165	31,273825	15	3512	25,0308151	15
9110	32,514103	15	4295	31,1940079	15	9592	31,2012482	15	6901	31,087441	15	8586	31,1289063	15	4166	31,2916641	15	3513	25,035825	15
9111	32,5033264	15	4296	31,255008	15	9593	31,1976318	15	6902	31,067421	15	8587	31,1289063	15	4167	31,2518845	15	3514	25,0091171	15
9112	32,4635391	15	4297	31,255008	15	9594	31,1831589	15	6903	31,0746536	15	8588	31,1361389	15	4168	31,2955008	15	3515	25,0163498	15
9113	32,4635391	15	4298	31,2482681	15	9595	31,2193298	15	6904	31,0710373	15	8589	31,1361389	15	4169	31,2518845	15	3516	25,0271980	15
9114	32,5033264	15	4299	31,2158455	15	9596	31,2627335	15	6905	31,056572	15	8590	31,1108246	15	4170	31,2193298	15	3517	25,0055008	15
9115	32,496938	15	4300	31,280478	15	9597	31,2120972	15	6906	31,0348663	15	8591	31,1035919	15	4171	31,2627335	15	3518	24,9584808	15
9116	32,4997101	15	4301	31,273825	15	9598	31,273825	15	69											



(continua Anexo U) (parte 6/16)

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 10 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 5TUBOS				PLANTA 4TUBOS				PLANTA 3TUBOS				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 1TUBO							
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
9154	34.5805008	90		4338	33.5052109	90		9636	33.5449982	90		6945	33.1290512	90		6830	33.400322	90		4210	33.5811615	90		3557	27.0128784	90	
9155	34.4094315	90		4340	33.5775452	90		9637	33.6028671	90		6946	33.1069202	90		6831	33.4437156	90		4211	33.5956345	90		3558	27.0960693	90	
9156	34.4745407	90		4341	33.6137161	90		9638	33.6571198	90		6947	33.2230911	90		6832	33.5052109	90		4212	33.6607361	90		3559	27.1105347	90	
9157	34.536026	90		4342	33.6806058	90		9639	33.6932907	90		6948	33.2194748	90		6833	33.5811615	90		4213	33.7122214	90		3560	27.1144151	90	
9158	34.593895	90		4343	33.7330704	90		9640	33.6896744	90		6949	33.2411728	90		6834	33.5847778	90		4214	33.7620087	90		3561	27.1542396	90	
9159	34.6517639	90		4344	33.7439217	90		9641	33.7330704	90		6950	33.3243637	90		6835	33.6607361	90		4215	33.812643	90		3562	27.2371216	90	
9160	34.6807022	90		4345	33.7800903	90		9642	33.7475433	90		6951	33.306282	90		6836	33.7258377	90		4216	33.8379669	90		3563	27.3492500	90	
9161	34.6843185	90		4346	33.7981796	90		9643	33.729454	90		6952	33.3713837	90		6837	33.729454	90		4217	33.8488159	90		3564	27.3420181	90	
9162	34.7421875	90		4347	33.8307266	90		9644	33.7475433	90		6953	33.32798	90		6838	33.7583923	90		4218	33.9030685	90		3565	27.3781815	90	
9163	34.7421875	90		4348	33.8415833	90		9645	33.7837143	90		6954	33.364151	90		6839	33.7583923	90		4219	33.9283829	90		3566	27.4107361	90	
9164	34.8000565	90		4349	33.9030685	90		9646	33.812645	90		6955	33.353302	90		6840	33.8415833	90		4220	33.9609375	90		3567	27.3854141	90	
9165	34.7602768	90		4350	33.8249869	90		9647	33.776474	90		6956	33.4364853	90		6841	33.8524323	90		4221	34.0043411	90		3568	27.4396744	90	
9166	34.8072891	90		4351	33.9320068	90		9648	33.7961796	90		6957	33.4364853	90		6842	33.8198776	90		4222	33.9826431	90		3569	27.493927	90	
9167	34.8181458	90		4352	33.9238219	90		9649	33.7692413	90		6958	33.4548748	90		6843	33.8886032	90		4223	34.0549774	90		3570	27.4868443	90	
9168	34.8470764	90		4353	33.9573212	90		9650	33.7945633	90		6959	33.4798889	90		6844	33.9030685	90		4224	34.0985121	90		3571	27.5120087	90	
9169	34.9049454	90		4354	33.9681702	90		9651	33.7837143	90		6960	33.4871216	90		6845	33.950805	90		4225	34.0947647	90		3572	27.5590286	90	
9170	34.8832474	90		4355	33.9320068	90		9652	33.8379669	90		6961	33.5121502	90		6846	33.9211502	90		4226	34.10623	90		3573	27.5554213	90	
9171	34.9085693	90		4356	34.0043411	90		9653	33.7800903	90		6962	33.5341415	90		6847	34.0043411	90		4227	34.0549774	90		3574	27.562485	90	
9172	34.8651657	90		4357	34.0115738	90		9654	33.7800903	90		6963	33.5269089	90		6848	34.0188065	90		4228	34.1286954	90		3575	27.6348869	90	
9173	34.901329	90		4358	34.0115738	90		9655	33.776474	90		6964	33.5486145	90		6849	33.9934921	90		4229	34.147647	90		3576	27.6098469	90	
9174	34.9519653	90		4359	34.0043411	90		9656	33.7837143	90		6965	33.563798	90		6850	34.0585938	90		4230	34.1381683	90		3577	27.6747665	90	
9175	34.89048	90		4360	34.0549774	90		9657	33.8054123	90		6966	33.5341415	90		6851	34.0007248	90		4231	34.145401	90		3578	27.6388032	90	
9176	34.9049454	90		4361	34.0549774	90		9658	33.8054123	90		6967	33.6317978	90		6852	34.0839157	90		4232	34.1019974	90		3579	27.6132813	90	
9177	34.9519653	90		4362	34.0549774	90		9659	33.812645	90		6968	33.5956345	90		6853	34.0730591	90		4233	34.1960375	90		3580	27.7032122	90	
9178	34.9250347	90		4363	34.077448	90		9660	33.812645	90		6969	33.5775452	90		6854	34.0585938	90		4234	34.167099	90		3581	27.6892395	90	
9179	34.9411163	90		4364	34.0405121	90		9661	33.812645	90		6970	33.5775452	90		6855	34.0585938	90		4235	34.1743393	90		3582	27.6747665	90	
9180	34.9250347	90		4365	34.0007248	90		9662	33.7945633	90		6971	33.6679688	90		6856	34.120079	90		4236	34.1743393	90		3583	27.7434921	90	
9181	34.89048	90		4366	34.0043411	90		9663	33.8415833	90		6972	33.6679688	90		6857	34.1056137	90		4237	34.1634027	90		3584	27.7181702	90	
9182	34.9085693	90		4367	34.0043411	90		9664	33.8379669	90		6973	33.7041397	90		6858	34.1309357	90		4238	34.15625	90		3585	27.7109375	90	
9183	34.8615494	90		4368	34.0115738	90		9665	33.8560486	90		6974	33.7113724	90		6859	34.0947647	90		4239	34.1779556	90		3586	27.7254028	90	
9184	34.8832474	90		4369	34.0296631	90		9666	33.8307266	90		6975	33.7688177	90		6860	34.1019974	90		4240	34.147647	90		3587	27.7434921	90	
9185	34.9250347	90		4370	34.0405121	90		9667	33.8307266	90		6976	33.6607361	90		6861	34.10923	90		4241	34.1273193	90		3588	27.7832794	90	
9186	34.879631	90		4371	34.0115738	90		9668	33.8379669	90		6977	33.6571198	90		6862	34.120079	90		4242	34.1381683	90		3589	27.7615738	90	
9187	34.879631	90		4372	34.0296631	90		9669	33.8488159	90		6978	33.730704	90		6863	34.0911484	90		4243	34.147647	90		3590	27.7434921	90	
9188	34.868637	90		4373	34.0585938	90		9670	33.8343506	90		6979	33.729454	90		6864	34.1128464	90		4244	34.147647	90		3591	27.7796631	90	
9189	34.9049454	90		4374	34.0332794	90		9671	33.8514323	90		6980	33.743927	90		6865	34.1128464	90		4245	34.1273193	90		3592	27.7796631	90	
9190	34.8651657	90		4375	34.0694427	90		9672	33.8379669	90		6981	33.707758	90		6866	34.0549774	90		4246	34.145401	90		3593	27.7977448	90	
9191	34.8509267	90		4376	34.0296631	90		9673	33.7837143	90		6982	33.7403107	90		6867	34.0658264	90		4247	34.1309357	90		3594	27.7724228	90	
9192	34.845294	90		4377	34.0585938	90		9674	33.8586648	90		6983	33.776474	90		6868	34.0658264	90		4248	34.15625	90		3595	27.7579575	90	
9193	34.8723964	90		4378	34.1128464	90		9675	33.8560486	90		6984	33.7837143	90		6869	34.0947647	90		4249	34.1381683	90		3596	27.7724228	90	
9194	34.8543091	90		4379	34.0839157	90		9676	33.8514323	90		6985	33.765625	90		6870	34.0947647	90		4250	34.147647	90		3597	27.826663	90	
9195	34.8651657	90		4380	34.0658264	90		9677	33.8198776	90		6986	33.7222214	90		6871	34.0368958	90		4251	34.147647	90		3598	27.8302994	90	
9196	34.8615494	90		4381	34.077448	90		9678	33.8514323	90		6987	33.765625	90		6872	34.0839157	90		4252	34.1634027	90		3599	27.8556137	90	
9197	34.828948	90		4382	34.0947647	90		9679	33.8																		



(continua Anexo U) (parte 7/16)

PRUEBA 17 08 04 2022			PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO			PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO			PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO			PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4		
Identificación			PLANTA 5TUBOS			PLANTA 4TUBOS			PLANTA 3TUBOS			PLANTA 2TUBOS			PLANTA 1TUBO			OK		
X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂
9240	35,0713272	90	4425	33,9139175	90	9722	34,0043411	90	7031	33,6679688	90	8718	33,9428558	90	4296	34,2394409	90	3643	27,7217685	90
9241	35,1581306	90	4426	33,9420558	90	9723	34,0115738	90	7032	33,6317978	90	8717	33,9681702	90	4297	34,20327	90	3644	27,7398758	90
9242	35,1725998	90	4427	33,9420558	90	9724	33,9790168	90	7033	33,5956145	90	8718	33,9320068	90	4298	34,214119	90	3645	27,7254028	90
9243	35,1906853	90	4428	33,9754028	90	9725	34,0043411	90	7034	33,57575452	90	8719	33,9247665	90	4299	34,181572	90	3646	27,7109375	90
9244	35,1943016	90	4429	33,9754028	90	9726	33,9268631	90	7035	33,602671	90	8720	33,9068849	90	4300	34,2285919	90	3647	27,6992395	90
9245	35,2955742	90	4430	33,9247665	90	9727	34,0007248	90	7036	33,5449982	90	8721	33,9247665	90	4301	34,2285919	90	3648	27,7109375	90
9246	35,2449579	90	4431	33,920068	90	9728	34,0224228	90	7037	33,6137161	90	8722	33,9247665	90	4302	34,167099	90	3649	27,6494522	90
9247	35,3020869	90	4432	33,920068	90	9729	33,9934921	90	7038	33,5160599	90	8723	33,9464722	90	4303	34,1960373	90	3650	27,7037040	90
9248	35,270256	90	4433	33,9139175	90	9730	34,0368958	90	7039	33,508272	90	8724	33,9464722	90	4304	34,1996536	90	3651	27,7037040	90
9249	35,2485542	90	4434	33,9068849	90	9731	34,0115738	90	7040	33,5160599	90	8725	33,9320068	90	4305	34,1779556	90	3652	27,6747665	90
9250	35,281105	90	4435	33,9247665	90	9732	34,0368958	90	7041	33,5269089	90	8726	33,8922195	90	4306	34,20327	90	3653	27,6024323	90
9251	35,2847252	90	4436	33,9420558	90	9733	34,0585938	90	7042	33,5052109	90	8727	33,9211502	90	4307	34,2382148	90	3654	27,5771103	90
9252	35,3389776	90	4437	33,9247665	90	9734	34,0007248	90	7043	33,4903899	90	8728	33,9139175	90	4308	34,2322083	90	3655	27,6132813	90
9253	35,3389776	90	4438	33,8849869	90	9735	34,0151901	90	7044	33,4798889	90	8729	33,8958359	90	4309	34,2285919	90	3656	27,6168976	90
9254	35,3245067	90	4439	33,8922195	90	9736	34,0477448	90	7045	33,4798889	90	8730	33,8922195	90	4310	34,2399063	90	3657	27,6131705	90
9255	35,3570595	90	4440	33,9609375	90	9737	34,0368958	90	7046	33,4948619	90	8731	33,9103012	90	4311	34,1834227	90	3658	27,669375	90
9256	35,3679123	90	4441	33,9392395	90	9738	34,0368958	90	7047	33,4798889	90	8732	33,9103012	90	4312	34,192421	90	3659	27,6711502	90
9257	35,3317413	90	4442	33,9754028	90	9739	34,0368958	90	7048	33,4903899	90	8733	33,9103012	90	4313	34,1851083	90	3660	27,6277466	90
9258	35,3317413	90	4443	33,9754028	90	9740	34,0352794	90	7049	33,42202	90	8734	33,8922195	90	4314	34,145401	90	3661	27,6277466	90
9259	35,3570595	90	4444	33,9602595	90	9741	33,9662595	90	7050	33,4256363	90	8735	33,9211502	90	4315	34,15625	90	3662	27,6566849	90
9260	35,3498268	90	4445	33,9211502	90	9742	33,9826431	90	7051	33,4437156	90	8736	33,9247665	90	4316	34,1779556	90	3663	27,6024323	90
9261	35,3570595	90	4446	33,9573212	90	9743	34,0007248	90	7052	33,4948619	90	8737	33,9139175	90	4317	34,2105026	90	3664	27,5915833	90
9262	35,4149323	90	4447	33,9826431	90	9744	33,9320068	90	7053	33,4075546	90	8738	33,8343506	90	4318	34,120079	90	3665	27,5988159	90
9263	35,4330177	90	4448	33,9609375	90	9745	33,9068849	90	7054	33,4346533	90	8739	33,9103012	90	4319	34,1271933	90	3666	27,6494522	90
9264	35,4211649	90	4449	33,9826431	90	9746	33,9500885	90	7055	33,423069	90	8740	33,8415833	90	4320	34,10923	90	3667	27,669375	90
9265	35,3896141	90	4450	33,944722	90	9747	33,9030685	90	7056	33,3967056	90	8741	33,8307266	90	4321	34,054974	90	3668	27,6386032	90
9266	35,4211649	90	4451	33,9420558	90	9748	33,9283829	90	7057	33,4059383	90	8742	33,8488159	90	4322	34,0839157	90	3669	27,6494522	90
9267	35,4293976	90	4452	33,944722	90	9749	33,9320068	90	7058	33,4256363	90	8743	33,9198776	90	4323	34,1019974	90	3670	27,6580685	90
9268	35,4211649	90	4453	33,944722	90	9750	33,9283829	90	7059	33,4401016	90	8744	33,8524323	90	4324	34,10923	90	3671	27,6675339	90
9269	35,4510994	90	4454	33,920068	90	9751	33,9464722	90	7060	33,400322	90	8745	33,8777466	90	4325	34,0477448	90	3672	27,6458359	90
9270	35,3968468	90	4455	33,9247665	90	9752	33,9283829	90	7061	33,3766163	90	8746	33,9211502	90	4326	34,0730581	90	3673	27,6386032	90
9271	35,4438667	90	4456	33,9392395	90	9753	33,9030685	90	7062	33,4075546	90	8747	33,9103012	90	4327	34,076883	90	3674	27,6856232	90
9272	35,4278713	90	4457	33,9392395	90	9754	33,9283829	90	7063	33,32798	90	8748	33,8524323	90	4328	34,067532	90	3675	27,6580685	90
9273	35,4113159	90	4458	33,9500885	90	9755	33,8922195	90	7064	33,3460693	90	8749	33,8741302	90	4329	34,0477448	90	3676	27,6494522	90
9274	35,3932304	90	4459	33,944722	90	9756	33,9211502	90	7065	33,3713837	90	8750	33,801796	90	4330	34,054974	90	3677	27,6458359	90
9275	35,3896141	90	4460	33,9573212	90	9757	33,8741302	90	7066	33,385849	90	8751	33,8524323	90	4331	34,0405121	90	3678	27,6168976	90
9276	35,4402504	90	4461	33,9465538	90	9758	33,8198776	90	7067	33,3822327	90	8752	33,8488159	90	4332	34,0694427	90	3679	27,6168976	90
9277	35,4149323	90	4462	33,9500885	90	9759	33,8596468	90	7068	33,2904494	90	8753	33,8198776	90	4333	34,054974	90	3680	27,6386032	90
9278	35,4402504	90	4463	33,9681702	90	9760	33,823494	90	7069	33,317131	90	8754	33,7945633	90	4334	34,0513611	90	3681	27,6277466	90
9279	35,3932304	90	4464	33,920068	90	9761	33,8668976	90	7070	33,306282	90	8755	33,776474	90	4335	34,0368958	90	3682	27,6458359	90
9280	35,4040794	90	4465	33,920068	90	9762	33,8596468	90	7071	33,3315964	90	8756	33,7475433	90	4336	34,0694427	90	3683	27,6132813	90
9281	35,4474831	90	4466	33,9420558	90	9763	33,8741302	90	7072	33,324637	90	8757	33,7692413	90	4337	34,0043411	90	3684	27,6168976	90
9282	35,4402504	90	4467	33,9283829	90	9764	33,7873306	90	7073	33,239401	90	8758	33,7800903	90	4338	34,0405121	90	3685	27,6458359	90
9283	35,4474831	90	4468	33,9754028	90	9765	33,823494	90	7074	33,2080901	90	8759	33,8054123	90	4339	34,0115738	90	3686	27,6168976	90
9284	35,4211649	90	4469	33,9500885	90	9766	33,7945633	90	7075	33,2701111	90	8760	33,8162613	90	4340	33,9790268	90	3687	27,6131705	90
9285	35,4076996	90	4470	33,9754028	90	9767	33,7511597	90	7076	33,3089844	90	8761	33,765625	90	4341	34,0224228	90	3688	27,6205139	90
9286	35,4149323	90	4471	33,9103012	90	9768	33,7945633	90	7077	33,2773438	90	8762	33,729454	90	4342	34,0368958	90	3689	27,6458359	90
9287	35,4149323	90	4472	33,920068	90	9769	33,7692413	90	7078	33,315147	90	8763	33,7692413	90	4343	34,0115738	90	3690	27,6168976	90
9288	35,4583359	90	4473	33,9573212																



(continua Anexo U) (parte 8/16)

PRUEBA 17 08 04 2022			PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO			PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO			PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO			PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK		
Identificación			PLANTA 3Tubos			PLANTA 4Tubos			PLANTA 3TUBO			PLANTA 2TUBOS			PLANTA 1TUBO					
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz
9326	35,3553615	90	4511	35,7692413	90	9808	35,7981796	90	7117	35,4581909	90	8802	35,7403107	90	4382	35,9428558	90	3729	27,4324341	90
9327	35,3064232	90	4512	35,7583923	90	9809	35,7222214	90	7118	35,4618073	90	8803	35,765625	90	4383	35,9573212	90	3730	27,4396744	90
9328	35,2774887	90	4513	35,765625	90	9810	35,7258377	90	7119	35,459583	90	8804	35,776474	90	4384	35,9645558	90	3731	27,4722214	90
9329	35,270256	90	4514	35,759323	90	9811	35,7692413	90	7120	35,4039383	90	8805	35,7837143	90	4385	35,9030685	90	3732	27,504776	90
9330	35,2883415	90	4515	35,707756	90	9812	35,776474	90	7121	35,3822327	90	8806	35,7511597	90	4386	35,9428558	90	3733	27,4649887	90
9331	35,2991805	90	4516	35,6896744	90	9813	35,743927	90	7122	35,4147873	90	8807	35,776474	90	4387	35,9066449	90	3734	27,4143524	90
9332	35,3027669	90	4517	35,6932907	90	9814	35,6788177	90	7123	35,4798889	90	8808	35,7475433	90	4388	35,9030685	90	3735	27,4324341	90
9333	35,3136597	90	4518	35,7149887	90	9815	35,7113724	90	7124	35,4618073	90	8809	35,812645	90	4389	35,9030685	90	3736	27,4035034	90
9334	35,2485542	90	4519	35,7258377	90	9816	35,7149887	90	7125	35,4907455	90	8810	35,776474	90	4390	35,9247665	90	3737	27,4143524	90
9335	35,2774887	90	4520	35,7149887	90	9817	35,6752014	90	7126	35,5232925	90	8811	35,8307266	90	4391	35,9283829	90	3738	27,4288177	90
9336	35,2630234	90	4521	35,7113724	90	9818	35,696907	90	7127	35,4762726	90	8812	35,7981796	90	4392	35,9862595	90	3739	27,4143524	90
9337	35,2959742	90	4522	35,7113724	90	9819	35,6896744	90	7128	35,5160599	90	8813	35,7583923	90	4393	35,9120068	90	3740	27,4215851	90
9338	35,2232361	90	4523	35,729454	90	9820	35,7113724	90	7129	35,4979782	90	8814	35,7945633	90	4394	35,9681702	90	3741	27,4143524	90
9339	35,2268524	90	4524	35,7258377	90	9821	35,7222214	90	7130	35,5413818	90	8815	35,7258377	90	4395	35,9824431	90	3742	27,4505234	90
9340	35,2304688	90	4525	35,7397074	90	9822	35,7397074	90	7131	35,541415	90	8816	35,7403107	90	4396	35,9824431	90	3743	27,3942708	90
9341	35,2304688	90	4526	35,729454	90	9823	35,7397074	90	7132	35,5494982	90	8817	35,7511597	90	4397	35,973212	90	3744	27,3854141	90
9342	35,2413216	90	4527	35,7258377	90	9824	35,7258377	90	7133	35,541415	90	8818	35,776474	90	4398	35,9645558	90	3745	27,3781015	90
9343	35,2719989	90	4528	35,6530534	90	9825	35,7397074	90	7134	35,5935252	90	8819	35,7873306	90	4399	35,973212	90	3746	27,3745651	90
9344	35,3027669	90	4529	35,6932907	90	9826	35,7222214	90	7135	35,5413818	90	8820	35,765625	90	4400	35,9464732	90	3747	27,3600990	90
9345	35,1762161	90	4530	35,6571198	90	9827	35,7222214	90	7136	35,5413818	90	8821	35,7583923	90	4401	35,9120068	90	3748	27,4035034	90
9346	35,1906833	90	4531	35,6932907	90	9828	35,7397074	90	7137	35,5160599	90	8822	35,7692413	90	4402	35,9283829	90	3749	27,3942708	90
9347	35,2232361	90	4532	35,6896744	90	9829	35,7258377	90	7138	35,5051208	90	8823	35,6932907	90	4403	35,9066449	90	3750	27,3998871	90
9348	35,1906833	90	4533	35,684835	90	9830	35,6807361	90	7139	35,5051208	90	8824	35,6715851	90	4404	35,9247665	90	3751	27,3921654	90
9349	35,161747	90	4534	35,6028671	90	9831	35,6896744	90	7140	35,5935252	90	8825	35,6932907	90	4405	35,9121502	90	3752	27,3982708	90
9350	35,1609833	90	4535	35,6317978	90	9832	35,6715851	90	7141	35,5935252	90	8826	35,686058	90	4406	35,9283829	90	3753	27,3854141	90
9351	35,2087669	90	4536	35,6354141	90	9833	35,6788177	90	7142	35,5935252	90	8827	35,7149887	90	4407	35,9120068	90	3754	27,3423081	90
9352	35,1609833	90	4537	35,6426544	90	9834	35,6879889	90	7143	35,5935252	90	8828	35,6752014	90	4408	35,9030685	90	3755	27,3275452	90
9353	35,2051506	90	4538	35,6498871	90	9835	35,6752014	90	7144	35,5269089	90	8829	35,6788177	90	4409	35,8669776	90	3756	27,3384018	90
9354	35,1725990	90	4539	35,5811615	90	9836	35,686058	90	7145	35,5082172	90	8830	35,6967444	90	4410	35,9283829	90	3757	27,3311615	90
9355	35,140049	90	4540	35,5992500	90	9837	35,6354141	90	7146	35,4545746	90	8831	35,6317978	90	4411	35,958359	90	3758	27,3600990	90
9356	35,1364288	90	4541	35,5884018	90	9838	35,6752014	90	7147	35,4618073	90	8832	35,6530534	90	4412	35,9120068	90	3759	27,3420181	90
9357	35,0894127	90	4542	35,5956345	90	9839	35,6896744	90	7148	35,4762726	90	8833	35,6028671	90	4413	35,922195	90	3760	27,3384018	90
9358	35,1074944	90	4543	35,673325	90	9840	35,693081	90	7149	35,4581909	90	8834	35,6498871	90	4414	35,8564086	90	3761	27,3600990	90
9359	35,1183472	90	4544	35,6028671	90	9841	35,6209488	90	7150	35,4762726	90	8835	35,5775452	90	4415	35,8669776	90	3762	27,3384018	90
9360	35,1257590	90	4545	35,5884018	90	9842	35,5847778	90	7151	35,4798889	90	8836	35,5982508	90	4416	35,8669776	90	3763	27,3492500	90
9361	35,140049	90	4546	35,6084835	90	9843	35,5775452	90	7152	35,4943619	90	8837	35,5956345	90	4417	35,823494	90	3764	27,3456345	90
9362	35,1219635	90	4547	35,6028671	90	9844	35,5956345	90	7153	35,4726545	90	8838	35,5669862	90	4418	35,823494	90	3765	27,3384018	90
9363	35,1257590	90	4548	35,617161	90	9845	35,6028671	90	7154	35,4487236	90	8839	35,6317978	90	4419	35,879669	90	3766	27,3600990	90
9364	35,0894127	90	4549	35,673325	90	9846	35,6028671	90	7155	35,4907455	90	8840	35,6426544	90	4420	35,8198778	90	3767	27,3617978	90
9365	35,0785599	90	4550	35,6084835	90	9847	35,6209488	90	7156	35,4925835	90	8841	35,6498871	90	4421	35,801796	90	3768	27,3456345	90
9366	35,0821762	90	4551	35,6084835	90	9848	35,5124435	90	7157	35,4509583	90	8842	35,6317978	90	4422	35,8307266	90	3769	27,3673325	90
9367	35,1074944	90	4552	35,5994635	90	9849	35,4979782	90	7158	35,42202	90	8843	35,5522308	90	4423	35,776474	90	3770	27,3384018	90
9368	35,0785599	90	4553	35,617161	90	9850	35,5413818	90	7159	35,4546535	90	8844	35,5522308	90	4424	35,7258377	90	3771	27,3600990	90
9369	35,1364288	90	4554	35,5994635	90	9851	35,5413818	90	7160	35,4487236	90	8845	35,5703125	90	4425	35,7403107	90	3772	27,2949982	90
9370	35,1074944	90	4555	35,5884018	90	9852	35,5413818	90	7161	35,414036	90	8846	35,5847778	90	4426	35,7692413	90	3773	27,3311615	90
9371	35,1219635	90	4556	35,617161	90	9853	35,4907455	90	7162	35,4798889	90	8847	35,5847778	90	4427	35,776474	90	3774	27,2896762	90
9372	35,1321215	90	4557	35,5811615	90	9854	35,4979782	90	7163	35,4762726	90	8848	35,5956345	90	4428	35,743927	90	3775	27,2588272	90
9373	35,0857925	90	4558	35,6084835	90	9855	35,5051208	90	7164	35,5051208	90	8849	35,5413818	90	4429	35,7041397	90	3776	27,3456345	90
9374	35,1074944	90	4559	35,617161	90	9856	35,4690399	90	7165	35,476272										



(continua Anexo U) (parte 9/16)

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 3TUBOS				PLANTA 4TUBOS				PLANTA 3TUBO				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 1TUBO							
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
9411	35,1725998	90		4596	33,6173325	90		9893	33,3768163	90		7202	33,364151	90		8887	33,2918091	90		4487	33,6428544	90		3814	27,1792526	90	
9412	35,1436653	90		4597	33,6571198	90		9894	33,3858498	90		7203	33,3677673	90		8888	33,3135147	90		4488	33,6354141	90		3815	27,2371216	90	
9413	35,1762161	90		4598	33,6354141	90		9895	33,3677673	90		7204	33,3822327	90		8889	33,2809601	90		4489	33,6498071	90		3816	27,2552109	90	
9414	35,1545143	90		4599	33,6480871	90		9896	33,3605347	90		7205	33,3677673	90		8890	33,3135147	90		4470	33,6606058	90		3817	27,1973419	90	
9415	35,1943016	90		4600	33,6426544	90		9897	33,3460693	90		7206	33,364151	90		8891	33,32798	90		4471	33,6679688	90		3818	27,1822669	90	
9416	35,1255798	90		4601	33,6571198	90		9898	33,2809601	90		7207	33,3677673	90		8892	33,3243637	90		4472	33,6715051	90		3819	27,1822669	90	
9417	35,1581306	90		4602	33,6209488	90		9899	33,317131	90		7208	33,400322	90		8893	33,2773438	90		4473	33,6571198	90		3820	27,1937256	90	
9418	35,2087669	90		4603	33,6137161	90		9900	33,3713837	90		7209	33,3677673	90		8894	33,2701111	90		4474	33,6607361	90		3821	27,161171	90	
9419	35,2051506	90		4604	33,5956345	90		9901	33,3496857	90		7210	33,3677673	90		8895	33,317131	90		4475	33,6715051	90		3822	27,114151	90	
9420	35,2123871	90		4605	33,5956345	90		9902	33,4184036	90		7211	33,3605347	90		8896	33,3243637	90		4476	33,6571198	90		3823	27,1286163	90	
9421	35,2268524	90		4606	33,5703125	90		9903	33,3822327	90		7212	33,364151	90		8897	33,2773438	90		4477	33,6354141	90		3824	27,1430693	90	
9422	35,1979179	90		4607	33,5269089	90		9904	33,4075546	90		7213	33,3496857	90		8898	33,32798	90		4478	33,6137161	90		3825	27,1575546	90	
9423	35,1908853	90		4608	33,5630798	90		9905	33,4147873	90		7214	33,3424454	90		8899	33,352127	90		4479	33,6715051	90		3826	27,1394653	90	
9424	35,1908853	90		4609	33,552308	90		9906	33,4147873	90		7215	33,353302	90		8900	33,32798	90		4480	33,6209488	90		3827	27,1103347	90	
9425	35,1943016	90		4610	33,5413818	90		9907	33,400322	90		7216	33,352127	90		8901	33,315964	90		4481	33,6607361	90		3828	27,1430693	90	
9426	35,2051506	90		4611	33,5486145	90		9908	33,432869	90		7217	33,317131	90		8902	33,306282	90		4482	33,6535034	90		3829	27,0960693	90	
9427	35,2051506	90		4612	33,5232925	90		9909	33,4147873	90		7218	33,315964	90		8903	33,32798	90		4483	33,6209488	90		3830	27,1103347	90	
9428	35,1147308	90		4613	33,5088272	90		9910	33,4581909	90		7219	33,3424454	90		8904	33,32798	90		4484	33,6607361	90		3831	27,125	90	
9429	35,1074944	90		4614	33,5305252	90		9911	33,4401016	90		7220	33,3460693	90		8905	33,353302	90		4485	33,6679688	90		3832	27,103302	90	
9430	35,1581306	90		4615	33,5344145	90		9912	33,4618073	90		7221	33,315964	90		8906	33,3496857	90		4486	33,6137161	90		3833	27,1394653	90	
9431	35,1255798	90		4616	33,4401016	90		9913	33,4401016	90		7222	33,3424454	90		8907	33,306282	90		4487	33,6245651	90		3834	27,0960693	90	
9432	35,1436653	90		4617	33,432869	90		9914	33,4907455	90		7223	33,352127	90		8908	33,317131	90		4488	33,6317978	90		3835	27,1286163	90	
9433	35,1725998	90		4618	33,4618073	90		9915	33,432869	90		7224	33,315964	90		8909	33,32798	90		4489	33,5992508	90		3836	27,07798	90	
9434	35,1545143	90		4619	33,4437256	90		9916	33,4401016	90		7225	33,315964	90		8910	33,2881927	90		4490	33,5703125	90		3837	27,08829	90	
9435	35,161747	90		4620	33,4725663	90		9917	33,432869	90		7226	33,352127	90		8911	33,3424454	90		4491	33,5773452	90		3838	27,0490494	90	
9436	35,1689835	90		4621	33,4545746	90		9918	33,3858498	90		7227	33,3822327	90		8912	33,3243637	90		4492	33,5773452	90		3839	27,0526657	90	
9437	35,158089	90		4622	33,4907455	90		9919	33,4258163	90		7228	33,367058	90		8913	33,306282	90		4493	33,5840418	90		3840	27,0381927	90	
9438	35,1002617	90		4623	33,4690399	90		9920	33,4147873	90		7229	33,367058	90		8914	33,3135147	90		4494	33,6209488	90		3841	27,0743637	90	
9439	35,0460091	90		4624	33,3894653	90		9921	33,400322	90		7230	33,4039383	90		8915	33,315964	90		4495	33,6245651	90		3842	27,070474	90	
9440	35,0713272	90		4625	33,4039383	90		9922	33,5160599	90		7231	33,3677673	90		8916	33,3135147	90		4496	33,6173325	90		3843	27,0599894	90	
9441	35,0532417	90		4626	33,432869	90		9923	33,4943619	90		7232	33,367058	90		8917	33,2881927	90		4497	33,5992508	90		3844	27,0743637	90	
9442	35,103878	90		4627	33,4258163	90		9924	33,4581909	90		7233	33,364151	90		8918	33,306282	90		4498	33,6209488	90		3845	27,0526657	90	
9443	35,0713272	90		4628	33,414036	90		9925	33,4798889	90		7234	33,432869	90		8919	33,2592621	90		4499	33,5413818	90		3846	27,0164948	90	
9444	35,103878	90		4629	33,405983	90		9926	33,4725663	90		7235	33,42202	90		8920	33,2809601	90		4500	33,5773452	90		3847	27,0020294	90	
9445	35,1147308	90		4630	33,414036	90		9927	33,5124435	90		7236	33,3464853	90		8921	33,317131	90		4501	33,5773452	90		3848	27,0381927	90	
9446	35,1147308	90		4631	33,4258163	90		9928	33,549982	90		7237	33,4364853	90		8922	33,295433	90		4502	33,5773452	90		3849	27,0418091	90	
9447	35,0857925	90		4632	33,432869	90		9929	33,4907455	90		7238	33,437156	90		8923	33,2618784	90		4503	33,5773452	90		3850	27,0164948	90	
9448	35,0755599	90		4633	33,4437256	90		9930	33,5160599	90		7239	33,42202	90		8924	33,3135147	90		4504	33,5773452	90		3851	26,9984131	90	
9449	35,1074944	90		4634	33,3786163	90		9931	33,4581909	90		7240	33,432869	90		8925	33,2809601	90		4505	33,5666962	90		3852	26,9767075	90	
9450	35,1147308	90		4635	33,3894653	90		9932	33,4798889	90		7241	33,4545746	90		8926	33,306282	90		4506	33,552308	90		3853	26,9586258	90	
9451	35,103878	90		4636	33,364151	90		9933	33,4907455	90		7242	33,4581909	90		8927	33,2737274	90		4507	33,4798889	90		3854	26,9803238	90	
9452	35,0755599	90		4637	33,3460693	90		9934	33,5160599	90		7243	33,4364853	90		8928	33,317131	90		4508	33,4907455	90		3855	26,9694748	90	
9453	35,103878	90		4638	33,3786163	90		9935	33,5052109	90		7244	33,4364853	90		8929	33,3243637	90		4509	33,5344145	90		3856	26,9694748		



(continua Anexo U) (parte 10/16)

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 5Tubos				PLANTA 4Tubos				PLANTA 3TUBO				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 1TUBO				OK			
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
9497	34,9085693	90		4682	33,2773438	90		9979	33,3713837	90		7288	33,3822327	90		8973	33,364151	90		4553	33,4979782	90		3900	27,0924454	90	
9498	34,9013129	90		4683	33,2628704	90		9980	33,364151	90		7289	33,346057	90		8974	33,4256363	90		4554	33,5160599	90		3901	27,0960693	90	
9499	34,8977127	90		4684	33,2881927	90		9981	33,3822327	90		7290	33,3605347	90		8975	33,3894653	90		4555	33,5160599	90		3902	27,161171	90	
9500	34,926651	90		4685	33,2809601	90		9982	33,385849	90		7291	33,364151	90		8976	33,4581909	90		4556	33,5305252	90		3903	27,114151	90	
9501	34,926651	90		4686	33,3098964	90		9983	33,3786163	90		7292	33,385849	90		8977	33,4401016	90		4557	33,5522308	90		3904	27,1758693	90	
9502	34,9375	90		4687	33,3243637	90		9984	33,4726563	90		7293	33,353302	90		8978	33,4726563	90		4558	33,5124435	90		3905	27,1430093	90	
9503	34,9375	90		4688	33,2990494	90		9985	33,4509583	90		7294	33,364151	90		8979	33,4871216	90		4559	33,4979782	90		3906	27,1523237	90	
9504	34,9519653	90		4689	33,3315964	90		9986	33,4762726	90		7295	33,3315964	90		8980	33,4690399	90		4560	33,5052109	90		3907	27,1503212	90	
9505	34,962822	90		4690	33,385849	90		9987	33,4581909	90		7296	33,353302	90		8981	33,4581909	90		4561	33,5305252	90		3908	27,1286163	90	
9506	34,9158002	90		4691	33,3352127	90		9988	33,4256363	90		7297	33,352127	90		8982	33,4871216	90		4562	33,5124435	90		3909	27,1069183	90	
9507	34,9230347	90		4692	33,3496857	90		9989	33,4437256	90		7298	33,352127	90		8983	33,4726563	90		4563	33,5486145	90		3910	27,1575546	90	
9508	34,9447317	90		4693	33,32798	90		9990	33,4147873	90		7299	33,352127	90		8984	33,5124435	90		4564	33,4979782	90		3911	27,1575546	90	
9509	34,89048	90		4694	33,3605347	90		9991	33,4437256	90		7300	33,3424454	90		8985	33,5124435	90		4565	33,5052109	90		3912	27,1064853	90	
9510	34,9049454	90		4695	33,4003122	90		9992	33,4401016	90		7301	33,3315964	90		8986	33,5413818	90		4566	33,5160599	90		3913	27,1684036	90	
9511	33,933837	90		4696	33,4039383	90		9993	33,4545746	90		7302	33,3243637	90		8987	33,5269089	90		4567	33,5486145	90		3914	27,2009583	90	
9512	34,89048	90		4697	33,3967056	90		9994	33,4807455	90		7303	33,353302	90		8988	33,5232925	90		4568	33,5160599	90		3915	27,2045746	90	
9513	34,8543091	90		4698	33,3894653	90		9995	33,4762726	90		7304	33,3315964	90		8989	33,5160599	90		4569	33,5413818	90		3916	27,2009583	90	
9514	34,8651657	90		4699	33,3713837	90		9996	33,5088212	90		7305	33,352127	90		8990	33,5160599	90		4570	33,5486145	90		3917	27,118073	90	
9515	34,8888637	90		4700	33,3713837	90		9997	33,4871216	90		7306	33,3424454	90		8991	33,5305252	90		4571	33,5413818	90		3918	27,1758693	90	
9516	34,879631	90		4701	33,3786163	90		9998	33,4807455	90		7307	33,352127	90		8992	33,5630798	90		4572	33,4979782	90		3919	27,2009583	90	
9517	34,9013129	90		4702	33,353302	90		9999	33,5232925	90		7308	33,32798	90		8993	33,5594635	90		4573	33,5305252	90		3920	27,118073	90	
9518	34,9184183	90		4703	33,4256363	90		10000	33,5341415	90		7309	33,32798	90		8994	33,5305252	90		4574	33,5052109	90		3921	27,1937256	90	
9519	34,9158002	90		4704	33,4184036	90		10001	33,5305252	90		7310	33,3605347	90		8995	33,5269089	90		4575	33,5522308	90		3922	27,161171	90	
9520	34,888762	90		4705	33,4437256	90		10002	33,5486145	90		7311	33,3315964	90		8996	33,5341415	90		4576	33,5305252	90		3923	27,1218387	90	
9521	34,8888637	90		4706	33,4509583	90		10003	33,5232925	90		7312	33,3315964	90		8997	33,5305252	90		4577	33,5486145	90		3924	27,114151	90	
9522	34,8072891	90		4707	33,4437256	90		10004	33,5486145	90		7313	33,352127	90		8998	33,5232925	90		4578	33,5522308	90		3925	27,114151	90	
9523	34,8289948	90		4708	33,4256363	90		10005	33,5486145	90		7314	33,3315964	90		8999	33,5124435	90		4579	33,5413818	90		3926	27,1647873	90	
9524	34,8732964	90		4709	33,4147873	90		10006	33,5486145	90		7315	33,3424454	90		9000	33,4798889	90		4580	33,5449882	90		3927	27,1286163	90	
9525	34,8543091	90		4710	33,4618073	90		10007	33,5775452	90		7316	33,3424454	90		9001	33,5124435	90		4581	33,5341415	90		3928	27,125	90	
9526	34,8732964	90		4711	33,4762726	90		10008	33,5666962	90		7317	33,3786163	90		9002	33,4979782	90		4582	33,5449882	90		3929	27,0852127	90	
9527	34,8651657	90		4712	33,4798889	90		10009	33,5449882	90		7318	33,4039383	90		9003	33,4979782	90		4583	33,5088212	90		3930	27,1069183	90	
9528	34,8326111	90		4713	33,4401016	90		10010	33,5522308	90		7319	33,3967056	90		9004	33,4798889	90		4584	33,5305252	90		3931	27,088829	90	
9529	34,8145294	90		4714	33,4943619	90		10011	33,5341415	90		7320	33,3894653	90		9005	33,4401016	90		4585	33,5269089	90		3932	27,0490494	90	
9530	34,8181458	90		4715	33,4545746	90		10012	33,4807455	90		7321	33,3417873	90		9006	33,4871216	90		4586	33,5232925	90		3933	27,0969183	90	
9531	34,8072891	90		4716	33,4762726	90		10013	33,5052109	90		7322	33,3786163	90		9007	33,4871216	90		4587	33,4979782	90		3934	27,0969183	90	
9532	34,7568528	90		4717	33,4871216	90		10014	33,5847778	90		7323	33,3822327	90		9008	33,4807455	90		4588	33,5088212	90		3935	27,103302	90	
9533	34,7277222	90		4718	33,4979782	90		10015	33,5956345	90		7324	33,3967056	90		9009	33,4509583	90		4589	33,4807455	90		3936	27,088829	90	
9534	34,7349548	90		4719	33,4762726	90		10016	33,5703125	90		7325	33,432869	90		9010	33,4943619	90		4590	33,4907455	90		3937	27,1069183	90	
9535	34,7204895	90		4720	33,4690399	90		10017	33,6064835	90		7326	33,4437256	90		9011	33,4798889	90		4591	33,4943619	90		3938	27,114151	90	
9536	34,7568528	90		4721	33,3967056	90		10018	33,5811615	90		7327	33,4437256	90		9012	33,5160599	90		4592	33,4979782	90		3939	27,1069183	90	
9537	34,7349548	90		4722	33,42202	90		10019	33,5775452	90		7328	33,4437256	90		9013	33,4907455	90		4593	33,4871216	90		3940	27,1286163	90	
9538	34,7530365	90		4723	33,4401016	90		10020	33,5775452	90		7329	33,4545746	90		9014	33,4690399	90		4594	33,4907455	90		3941	27,1218387	90	
9539	34,7747421	90		4724	33,4401016	90		10021	33,5630798	90		7330	33,4437256	90		9015	33,4726563	90		4595	33,51605						



(continua Anexo U) (parte 11/16)

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 10 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 5Tubos				PLANTA 4Tubos				PLANTA 3TUBO				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 1TUBO							
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
5583	34.7530365	90	4768	33.400322	90	10085	33.508272	90	7374	33.385849	90	9059	33.32798	90	4639	33.5630798	90	3988	27.0960693	90							
5584	34.8000565	90	4769	33.385849	90	10086	33.5413818	90	7375	33.400322	90	9060	33.3496857	90	4640	33.5341415	90	3987	27.1105347	90							
5585	34.7530365	90	4770	33.3967056	90	10087	33.5486145	90	7376	33.3967056	90	9061	33.3823237	90	4641	33.5847778	90	3988	27.0960693	90							
5586	34.7241058	90	4771	33.3788163	90	10088	33.5449882	90	7377	33.400322	90	9062	33.335302	90	4642	33.5522308	90	3989	27.088829	90							
5587	34.7349548	90	4772	33.3496857	90	10089	33.5486145	90	7378	33.4039383	90	9063	33.3243637	90	4643	33.5232925	90	3990	27.132327	90							
5588	34.7204895	90	4773	33.3677673	90	10070	33.5522308	90	7379	33.3823237	90	9064	33.3315964	90	4644	33.5341415	90	3991	27.1394653	90							
5589	34.7566528	90	4774	33.3496857	90	10071	33.5630798	90	7380	33.3713837	90	9065	33.3460693	90	4645	33.5847778	90	3992	27.1467056	90							
5590	34.7385712	90	4775	33.3677673	90	10072	33.5341415	90	7381	33.3823237	90	9066	33.3496857	90	4646	33.5413818	90	3993	27.1937526	90							
5591	34.7602768	90	4776	33.3677673	90	10073	33.5594635	90	7382	33.3713837	90	9067	33.364151	90	4647	33.5666962	90	3994	27.1973419	90							
5592	34.7349548	90	4777	33.364151	90	10074	33.5160599	90	7383	33.4147873	90	9068	33.3098984	90	4648	33.5703125	90	3995	27.1973419	90							
5593	34.7241058	90	4778	33.3823237	90	10075	33.5124435	90	7384	33.3713837	90	9069	33.3098984	90	4649	33.5703125	90	3996	27.182869	90							
5594	34.7711258	90	4779	33.3788163	90	10076	33.4807455	90	7385	33.4039383	90	9070	33.3352127	90	4650	33.5703125	90	3997	27.182869	90							
5595	34.8148294	90	4780	33.3967056	90	10077	33.5124435	90	7386	33.3605347	90	9071	33.3243637	90	4651	33.5522308	90	3998	27.1864853	90							
5596	34.8072891	90	4781	33.4039383	90	10078	33.5269089	90	7387	33.3967056	90	9072	33.317131	90	4652	33.5666962	90	3999	27.1937526	90							
5597	34.8326111	90	4782	33.3967056	90	10079	33.5124435	90	7388	33.385849	90	9073	33.3062182	90	4653	33.5775452	90	4000	27.118073	90							
5598	34.8072891	90	4783	33.3823237	90	10080	33.5341415	90	7389	33.385849	90	9074	33.2773438	90	4654	33.5666962	90	4001	27.258272	90							
5599	34.8868637	90	4784	33.3894653	90	10081	33.5305252	90	7390	33.3823237	90	9075	33.2990494	90	4655	33.5811615	90	4002	27.1864853	90							
5600	34.8543091	90	4785	33.3788163	90	10082	33.5232925	90	7391	33.3823237	90	9076	33.2806901	90	4656	33.5775452	90	4003	27.1973419	90							
5601	34.8723964	90	4786	33.400322	90	10083	33.5160599	90	7392	33.3788163	90	9077	33.2881927	90	4657	33.6064835	90	4004	27.2009583	90							
5602	34.851657	90	4787	33.400322	90	10084	33.5305252	90	7393	33.385849	90	9078	33.2447891	90	4658	33.5666962	90	4005	27.150322	90							
5603	34.868782	90	4788	33.3677673	90	10085	33.5232925	90	7394	33.437256	90	9079	33.2806901	90	4659	33.5811615	90	4006	27.1758363	90							
5604	34.8615494	90	4789	33.3894653	90	10086	33.5522308	90	7395	33.4075546	90	9080	33.317131	90	4660	33.5847778	90	4007	27.1973419	90							
5605	34.8615494	90	4790	33.3967056	90	10087	33.5305252	90	7396	33.4364853	90	9081	33.2806901	90	4661	33.5811615	90	4008	27.2335052	90							
5606	34.850927	90	4791	33.400322	90	10088	33.4843619	90	7397	33.4401016	90	9082	33.32798	90	4662	33.5703125	90	4009	27.2154236	90							
5607	34.8289948	90	4792	33.3788163	90	10089	33.4762726	90	7398	33.4256363	90	9083	33.3155147	90	4663	33.5666962	90	4010	27.1647873	90							
5608	34.8289948	90	4793	33.3605347	90	10090	33.508272	90	7399	33.4618073	90	9084	33.3243637	90	4664	33.6064835	90	4011	27.2045746	90							
5609	34.8049454	90	4794	33.3605347	90	10091	33.4771216	90	7400	33.4364853	90	9085	33.3098984	90	4665	33.5449982	90	4012	27.226863	90							
5610	34.915802	90	4795	33.400322	90	10092	33.5052109	90	7401	33.3967056	90	9086	33.32798	90	4666	33.5449982	90	4013	27.1973419	90							
5611	34.9194183	90	4796	33.4147873	90	10093	33.4807455	90	7402	33.3967056	90	9087	33.3677673	90	4667	33.5522308	90	4014	27.1973419	90							
5612	34.8723964	90	4797	33.4001016	90	10094	33.4879782	90	7403	33.414036	90	9088	33.3823237	90	4668	33.5522308	90	4015	27.182869	90							
5613	34.8049454	90	4798	33.4364853	90	10095	33.5160599	90	7404	33.414036	90	9089	33.364151	90	4669	33.5232925	90	4016	27.1758363	90							
5614	34.8049454	90	4799	33.4147873	90	10096	33.5703125	90	7405	33.4147873	90	9090	33.315964	90	4670	33.5630798	90	4017	27.1864853	90							
5615	34.962822	90	4800	33.4256363	90	10097	33.5811615	90	7406	33.4075546	90	9091	33.3677673	90	4671	33.5666962	90	4018	27.2154236	90							
5616	34.962822	90	4801	33.4798889	90	10098	33.5775452	90	7407	33.4762726	90	9092	33.3352127	90	4672	33.5160599	90	4019	27.1973419	90							
5617	34.9194183	90	4802	33.4726563	90	10099	33.5341415	90	7408	33.4843619	90	9093	33.32798	90	4673	33.5703125	90	4020	27.2335052	90							
5618	34.9056953	90	4803	33.4845746	90	10100	33.5884018	90	7409	33.4943619	90	9094	33.3677673	90	4674	33.5594835	90	4021	27.1973419	90							
5619	34.8049454	90	4804	33.4690399	90	10101	33.5449982	90	7410	33.4979782	90	9095	33.3967056	90	4675	33.5449982	90	4022	27.2154236	90							
5620	34.9230347	90	4805	33.4798889	90	10102	33.5413818	90	7411	33.4618073	90	9096	33.385849	90	4676	33.5594835	90	4023	27.2605999	90							
5621	34.926651	90	4806	33.4256363	90	10103	33.5522308	90	7412	33.4581909	90	9097	33.3823237	90	4677	33.5630798	90	4024	27.2190399	90							
5622	34.962822	90	4807	33.4437256	90	10104	33.5232925	90	7413	33.4871216	90	9098	33.3823237	90	4678	33.5630798	90	4025	27.1973419	90							
5623	34.995369	90	4808	33.4256363	90	10105	33.5666962	90	7414	33.5341415	90	9099	33.3713837	90	4679	33.5630798	90	4026	27.2154236	90							
5624	34.9090936	90	4809	33.4001016	90	10106	33.5522308	90	7415	33.5269089	90	9100	33.385849	90	4680	33.5666962	90	4027	27.2045746	90							
5625	34.9270056	90	4810	33.4364853	90	10107	33.5341415	90	7416	33.5232925	90	9101	33.414036	90	4681	33.5666962	90	4028	27.2045746	90							
5626	35.0062218	90	4811	33.4581909																							



(continua Anexo U) (parte 12/16)

PRUEBA 17 08 04 2022			PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO			PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO			PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO			PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK		
Identificación			PLANTA 5TUBOS			PLANTA 4TUBOS			PLANTA 3TUBO			PLANTA 2TUBOS			PLANTA 1TUBO					
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz
9669	35,006218	90	4854	35,525295	90	10151	35,4401018	90	7480	35,2797274	90	9145	35,4147873	90	4725	35,4509583	90	4072	27,0960693	90
9670	34,995369	90	4855	35,5594635	90	10152	35,3677673	90	7461	35,275565	90	9146	35,3822327	90	4726	35,4437256	90	4073	27,1213837	90
9671	35,0243073	90	4856	35,5269089	90	10153	35,4075546	90	7462	35,2267075	90	9147	35,4184036	90	4727	35,4256363	90	4074	27,0960693	90
9672	34,9917526	90	4857	35,5449982	90	10154	35,385649	90	7463	35,2447891	90	9148	35,400532	90	4728	35,4147873	90	4075	27,1065183	90
9673	34,9989853	90	4858	35,5486145	90	10155	35,4184036	90	7464	35,2230911	90	9149	35,4364853	90	4729	35,3967056	90	4076	27,103302	90
9674	34,9881363	90	4859	35,5305252	90	10156	35,32798	90	7465	35,2520294	90	9150	35,42202	90	4730	35,385649	90	4077	27,1213837	90
9675	34,995369	90	4860	35,5650798	90	10157	35,317131	90	7466	35,2592621	90	9151	35,4364853	90	4731	35,364151	90	4078	27,088829	90
9676	35,006218	90	4861	35,5523308	90	10158	35,3677673	90	7467	35,275565	90	9152	35,4401016	90	4732	35,42202	90	4079	27,1213837	90
9677	35,0351563	90	4862	35,5486145	90	10159	35,364151	90	7468	35,2628784	90	9153	35,4401016	90	4733	35,42202	90	4080	27,0924454	90
9678	35,0496154	90	4863	35,4762726	90	10160	35,3605347	90	7469	35,275565	90	9154	35,4364853	90	4734	35,4039383	90	4081	27,150322	90
9679	35,0604744	90	4864	35,5052109	90	10161	35,364151	90	7470	35,2592621	90	9155	35,4401016	90	4735	35,4039383	90	4082	27,103302	90
9680	35,0315399	90	4865	35,4581909	90	10162	35,3822327	90	7471	35,256458	90	9156	35,4184036	90	4736	35,3894653	90	4083	27,114151	90
9681	35,0170746	90	4866	35,4907455	90	10163	35,4039383	90	7472	35,2267075	90	9157	35,4147873	90	4737	35,3315964	90	4084	27,125	90
9682	35,0423927	90	4867	35,4907455	90	10164	35,3496857	90	7473	35,239401	90	9158	35,4256363	90	4738	35,32798	90	4085	27,1430693	90
9683	35,0423927	90	4868	35,4712116	90	10165	35,3967056	90	7474	35,2628784	90	9159	35,42202	90	4739	35,3496857	90	4086	27,192526	90
9684	35,0279236	90	4869	35,4690399	90	10166	35,385649	90	7475	35,2411728	90	9160	35,42202	90	4740	35,317131	90	4087	27,1684036	90
9685	35,0170746	90	4870	35,4364853	90	10167	35,3967056	90	7476	35,2080911	90	9161	35,4509583	90	4741	35,352127	90	4088	27,1684036	90
9686	35,0351563	90	4871	35,4256363	90	10168	35,364151	90	7477	35,2701111	90	9162	35,432869	90	4742	35,3424454	90	4089	27,157546	90
9687	34,9909036	90	4872	35,42202	90	10169	35,3713837	90	7478	35,3098984	90	9163	35,4437256	90	4743	35,3822327	90	4090	27,1213837	90
9688	34,995369	90	4873	35,4581909	90	10170	35,3786163	90	7479	35,273438	90	9164	35,4509583	90	4744	35,4039383	90	4091	27,1973419	90
9689	35,0098381	90	4874	35,4364853	90	10171	35,3605347	90	7480	35,3135147	90	9165	35,4401016	90	4745	35,4039383	90	4092	27,150322	90
9690	35,0098381	90	4875	35,432869	90	10172	35,3496857	90	7481	35,352127	90	9166	35,432869	90	4746	35,3894653	90	4093	27,1430693	90
9691	35,006218	90	4876	35,4509583	90	10173	35,3496857	90	7482	35,3243637	90	9167	35,4509583	90	4747	35,4039383	90	4094	27,156363	90
9692	35,0496154	90	4877	35,42202	90	10174	35,3496857	90	7483	35,3243637	90	9168	35,3894653	90	4748	35,3967056	90	4095	27,1430693	90
9693	35,0423927	90	4878	35,3822327	90	10175	35,3135147	90	7484	35,3243637	90	9169	35,3822327	90	4749	35,42202	90	4096	27,156363	90
9694	35,0423927	90	4879	35,3822327	90	10176	35,353302	90	7485	35,340695	90	9170	35,4075546	90	4750	35,3967056	90	4097	27,1594653	90
9695	35,0315399	90	4880	35,3713837	90	10177	35,385649	90	7486	35,3243637	90	9171	35,400532	90	4751	35,4401016	90	4098	27,1647873	90
9696	35,0243073	90	4881	35,3967056	90	10178	35,4147873	90	7487	35,306282	90	9172	35,4039383	90	4752	35,432869	90	4099	27,1647873	90
9697	35,0279236	90	4882	35,364151	90	10179	35,4364853	90	7488	35,3424454	90	9173	35,385649	90	4753	35,4581909	90	4100	27,1684036	90
9698	34,9881363	90	4883	35,3786163	90	10180	35,42202	90	7489	35,281927	90	9174	35,385649	90	4754	35,4184036	90	4101	27,1973419	90
9699	35,0134544	90	4884	35,3894653	90	10181	35,4039383	90	7490	35,3243637	90	9175	35,4437256	90	4755	35,4075546	90	4102	27,1523227	90
9700	35,019653	90	4885	35,3894653	90	10182	35,4039383	90	7491	35,352127	90	9176	35,4401016	90	4756	35,385649	90	4103	27,186453	90
9701	35,0315399	90	4886	35,3967056	90	10183	35,3677673	90	7492	35,3243637	90	9177	35,4184036	90	4757	35,4075546	90	4104	27,1810873	90
9702	35,0351563	90	4887	35,4184036	90	10184	35,4509583	90	7493	35,315964	90	9178	35,4184036	90	4758	35,4184036	90	4105	27,1647873	90
9703	35,006218	90	4888	35,42202	90	10185	35,4798889	90	7494	35,32798	90	9179	35,353302	90	4759	35,4545746	90	4106	27,1810873	90
9704	34,995369	90	4889	35,4039383	90	10186	35,4618073	90	7495	35,3135147	90	9180	35,3822327	90	4760	35,4726563	90	4107	27,1973419	90
9705	34,995369	90	4890	35,4581909	90	10187	35,3894653	90	7496	35,306282	90	9181	35,3713837	90	4761	35,4509583	90	4108	27,192526	90
9706	34,9592056	90	4891	35,4147873	90	10188	35,4256363	90	7497	35,315964	90	9182	35,385649	90	4762	35,4401016	90	4109	27,1973419	90
9707	34,9772873	90	4892	35,364151	90	10189	35,432869	90	7498	35,3098984	90	9183	35,3713837	90	4763	35,4437256	90	4110	27,2045746	90
9708	34,9772873	90	4893	35,3605347	90	10190	35,432869	90	7499	35,281927	90	9184	35,3894653	90	4764	35,4581909	90	4111	27,1065183	90
9709	34,9772873	90	4894	35,3677673	90	10191	35,4762726	90	7500	35,317131	90	9185	35,385649	90	4765	35,4581909	90	4112	27,157546	90
9710	34,973671	90	4895	35,3677673	90	10192	35,4843619	90	7501	35,3605347	90	9186	35,400532	90	4766	35,4364853	90	4113	27,1430693	90
9711	34,9338837	90	4896	35,3713837	90	10193	35,5052109	90	7502	35,353302	90	9187	35,353302	90	4767	35,4545746	90	4114	27,161171	90
9712	34,962822	90	4897	35,3894653	90	10194	35,4726563	90	7503	35,352127	90	9188	35,315964	90	4768	35,5124454	90	4115	27,1594653	90
9713	34,9592056	90	4898	35,3894653	90	10195	35,4798889	90	7504	35,315964	90	9189	35,317131	90	4769	35,4762726	90	4116	27,0960693	90
9714	34,9772873	90	4899	35,3677673	90	10196	35,4807455	90	7505	35,317131	90	9190	35,3786163	90	4770	35,497982	90	4117	27,1323227	90
9715	34,9917526	90	4900	35,353302	90	10197	35,4807455	90	7506	35,340695	90	9191	35,3243637	90	4771	35,5088272	90	4118	27,1467056	90
9716	34,9909036	90	4901	35,400322	90	10198	35,5124454	90	7507	35,317131	90	9192	35,352127	90	4772	35,498089	90	4119	27,186453	90
9717	34,9989853	90	4902	35,3605347	90	10199	35,5341415	90	7508	35,3894653	90									



(continua Anexo U) (parte 13/16)

PRUEBA 17 08 04 2022			PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO			PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO			PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO			PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK		
Identificación			PLANTA 5TUBOS			PLANTA 4TUBOS			PLANTA 3TUBO			PLANTA 2TUBOS			PLANTA 1TUBO					
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	X(ms)	T4 °C	VDF_Hz
9755	34,8615494	90	4940	33,4618073	90	10237	33,5775452	90	7546	33,5269089	90	9231	33,400522	90	4811	33,5160599	90	4158	26,9658585	90
9756	34,8509927	90	4941	33,4401016	90	10238	33,5703125	90	7547	33,5088272	90	9232	33,4147873	90	4812	33,4798889	90	4159	26,9405365	90
9757	34,868782	90	4942	33,432669	90	10239	33,5884018	90	7548	33,4545746	90	9233	33,4437256	90	4813	33,4943619	90	4160	26,9694740	90
9758	34,8470764	90	4943	33,4401016	90	10240	33,6064835	90	7549	33,4618073	90	9234	33,4762726	90	4814	33,4907455	90	4161	26,9152222	90
9759	34,8615494	90	4944	33,4184036	90	10241	33,5630798	90	7550	33,4762726	90	9235	33,4798889	90	4815	33,5088272	90	4162	26,9079695	90
9760	34,7892075	90	4945	33,4762726	90	10242	33,5449882	90	7551	33,4581909	90	9236	33,4907455	90	4816	33,4943619	90	4163	26,8754349	90
9761	34,7747211	90	4946	33,4690399	90	10243	33,5269089	90	7552	33,4762726	90	9237	33,4545746	90	4817	33,4979782	90	4164	26,9296675	90
9762	34,7747211	90	4947	33,5052109	90	10244	33,5486145	90	7553	33,4798889	90	9238	33,4726563	90	4818	33,5124435	90	4165	26,9296675	90
9763	34,7530365	90	4948	33,5160599	90	10245	33,5512308	90	7554	33,4943619	90	9239	33,4256363	90	4819	33,5160599	90	4166	26,9116058	90
9764	34,7602768	90	4949	33,4979782	90	10246	33,5341415	90	7555	33,4726563	90	9240	33,4798889	90	4820	33,5088272	90	4167	26,9296675	90
9765	34,7349548	90	4950	33,5305252	90	10247	33,5630798	90	7556	33,4437256	90	9241	33,4871216	90	4821	33,5341415	90	4168	26,9152222	90
9766	34,7277222	90	4951	33,5232915	90	10248	33,5088272	90	7557	33,4907455	90	9242	33,5269089	90	4822	33,5305252	90	4169	26,9333030	90
9767	34,7421875	90	4952	33,5160599	90	10249	33,5269089	90	7558	33,4256363	90	9243	33,5449882	90	4823	33,5160599	90	4170	26,9586250	90
9768	34,7602768	90	4953	33,4871216	90	10250	33,5052109	90	7559	33,4509583	90	9244	33,5341415	90	4824	33,5413818	90	4171	26,9694740	90
9769	34,7024002	90	4954	33,4979782	90	10251	33,4726563	90	7560	33,42202	90	9245	33,5269089	90	4825	33,5666962	90	4172	26,9333030	90
9770	34,6987839	90	4955	33,4871216	90	10252	33,4581909	90	7561	33,4364853	90	9246	33,5124435	90	4826	33,5703125	90	4173	26,9441520	90
9771	34,7024002	90	4956	33,5305252	90	10253	33,4618073	90	7562	33,437256	90	9247	33,5449882	90	4827	33,5811615	90	4174	26,9658585	90
9772	34,7024002	90	4957	33,4690399	90	10254	33,4907455	90	7563	33,4140364	90	9248	33,5269089	90	4828	33,5269089	90	4175	26,9224540	90
9773	34,7168732	90	4958	33,4726563	90	10255	33,4690399	90	7564	33,4798889	90	9249	33,5269089	90	4829	33,4943619	90	4176	26,9152222	90
9774	34,7349548	90	4959	33,3894653	90	10256	33,4798889	90	7565	33,4762726	90	9250	33,5413818	90	4830	33,5232308	90	4177	26,9152222	90
9775	34,7060165	90	4960	33,432669	90	10257	33,4907455	90	7566	33,5052109	90	9251	33,5124435	90	4831	33,5666962	90	4178	26,9260712	90
9776	34,7024002	90	4961	33,4364853	90	10258	33,4545746	90	7567	33,4762726	90	9252	33,5052109	90	4832	33,5775452	90	4179	26,9586250	90
9777	34,7277222	90	4962	33,432669	90	10259	33,4871216	90	7568	33,4690399	90	9253	33,4871216	90	4833	33,6028671	90	4180	26,9405365	90
9778	34,6987839	90	4963	33,3967056	90	10260	33,4798889	90	7569	33,5124435	90	9254	33,4798889	90	4834	33,6317978	90	4181	26,9947691	90
9779	34,6626205	90	4964	33,432669	90	10261	33,4726563	90	7570	33,4943619	90	9255	33,5052109	90	4835	33,5847778	90	4182	26,9586250	90
9780	34,6662369	90	4965	33,4039383	90	10262	33,5052109	90	7571	33,4979782	90	9256	33,4726563	90	4836	33,6173525	90	4183	26,9224540	90
9781	34,7024002	90	4966	33,4075546	90	10263	33,4762726	90	7572	33,5160599	90	9257	33,5052109	90	4837	33,5703125	90	4184	26,9477760	90
9782	34,6626205	90	4967	33,4075546	90	10264	33,4726563	90	7573	33,5305252	90	9258	33,4943619	90	4838	33,5840184	90	4185	26,9658585	90
9783	34,7349548	90	4968	33,432669	90	10265	33,4871216	90	7574	33,5232915	90	9259	33,4726563	90	4839	33,6245651	90	4186	26,9513931	90
9784	34,7241058	90	4969	33,42202	90	10266	33,4509583	90	7575	33,5305252	90	9260	33,4798889	90	4840	33,5992508	90	4187	26,9586250	90
9785	34,7385712	90	4970	33,4618073	90	10267	33,4798889	90	7576	33,5088272	90	9261	33,4581909	90	4841	33,5992508	90	4188	26,9513931	90
9786	34,7060165	90	4971	33,432669	90	10268	33,4726563	90	7577	33,5160599	90	9262	33,4581909	90	4842	33,5992508	90	4189	26,9296675	90
9787	34,7096329	90	4972	33,3894653	90	10269	33,4943619	90	7578	33,432669	90	9263	33,4401016	90	4843	33,5811615	90	4190	26,9043732	90
9788	34,7711258	90	4973	33,4147873	90	10270	33,4979782	90	7579	33,4943619	90	9264	33,42202	90	4844	33,5775452	90	4191	26,8790512	90
9789	34,7602768	90	4974	33,4364853	90	10271	33,5449882	90	7580	33,4798889	90	9265	33,42202	90	4845	33,5811615	90	4192	26,9694740	90
9790	34,7530365	90	4975	33,4545746	90	10272	33,5630798	90	7581	33,4581909	90	9266	33,4581909	90	4846	33,5775452	90	4193	26,9513931	90
9791	34,7204895	90	4976	33,4059583	90	10273	33,5703125	90	7582	33,4798889	90	9267	33,4437256	90	4847	33,5775452	90	4194	26,9441520	90
9792	34,7421875	90	4977	33,4059583	90	10274	33,5305252	90	7583	33,4907455	90	9268	33,4437256	90	4848	33,5522308	90	4195	26,9586250	90
9793	34,7819748	90	4978	33,432669	90	10275	33,4798889	90	7584	33,4979782	90	9269	33,3713837	90	4849	33,5341415	90	4196	26,9296675	90
9794	34,8253764	90	4979	33,4437256	90	10276	33,4943619	90	7585	33,4943619	90	9270	33,3713837	90	4850	33,5992508	90	4197	26,9296675	90
9795	34,8072891	90	4980	33,432669	90	10277	33,4907455	90	7586	33,4401016	90	9271	33,3822327	90	4851	33,5630798	90	4198	26,9441520	90
9796	34,8072891	90	4981	33,4437256	90	10278	33,5088272	90	7587	33,4075546	90	9272	33,4147873	90	4852	33,5269089	90	4199	26,9296675	90
9797	34,879631	90	4982	33,4003122	90	10279	33,5449882	90	7588	33,3677673	90	9273	33,3967056	90	4853	33,5522308	90	4200	26,9296675	90
9798	34,8615494	90	4983	33,3894653	90	10280	33,5124435	90	7589	33,4075546	90	9274	33,3894653	90	4854	33,5486145	90	4201	26,9477760	90
9799	34,8470764	90	4984	33,385849	90	10281	33,5269089	90	7590	33,4003122	90	9275	33,42202	90	4855	33,5269089	90	4202	26,9947691	90
9800	34,8470764	90	4985	33,385849	90	10282	33,5413818	90	7591	33,3822327	90	9276	33,4003122	90	4856	33,5269089	90	4203	27,0327274	90
9801	34,8509927	90	4986	33,3786163	90	10283	33,5341415	90	7592	33,3822327	90	9277	33,4039383	90	4857	33,5232915	90	4204	27,0345764	90
9802	34,915802	90	4987	33,3677673	90	10284	33,5486145	90	7593	33,385849	90	9278	33,4003122	90	4858	33,5341415	90	4205	27,0128784	90
9803	34,901																			



(continua Anexo U) (parte 14/16)

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 5Tubos				PLANTA 4Tubos				PLANTA 5TUBO				PLANTA 2TUBOS				PLANTA 1TUBO			
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
9841 35.1147308	90	5026 33.432869	90	10323 33.6498871	90	7632 33.4039383	90	9317 33.3967056	90	4897 33.5956345	90	4244 27.0345764	90										
9842 35.0894127	90	5027 33.4509583	90	10324 33.6788177	90	7633 33.3677673	90	9318 33.3967056	90	4898 33.5522308	90	4245 27.0743637	90										
9843 35.1147308	90	5028 33.3822327	90	10325 33.6932907	90	7634 33.3967056	90	9319 33.432869	90	4899 33.5160599	90	4246 27.0201111	90										
9844 35.0894127	90	5029 33.4256363	90	10326 33.7041397	90	7635 33.364151	90	9320 33.35849	90	4900 33.5666962	90	4247 27.0381927	90										
9845 35.150898	90	5030 33.4184036	90	10327 33.6209488	90	7636 33.432869	90	9321 33.4039383	90	4901 33.5522308	90	4248 27.0237274	90										
9846 35.1147308	90	5031 33.4184036	90	10328 33.6354141	90	7637 33.42202	90	9322 33.3894453	90	4902 33.4979782	90	4249 27.0381927	90										
9847 35.103878	90	5032 33.3677673	90	10329 33.6426544	90	7638 33.4364053	90	9323 33.400322	90	4903 33.5413818	90	4250 27.0164948	90										
9848 35.103878	90	5033 33.3967056	90	10330 33.6498871	90	7639 33.4364053	90	9324 33.400322	90	4904 33.5486145	90	4251 27.0237274	90										
9849 35.0857925	90	5034 33.3894453	90	10331 33.6679688	90	7640 33.4437256	90	9325 33.4184036	90	4905 33.5522308	90	4252 27.0164948	90										
9850 35.1147308	90	5035 33.4184036	90	10332 33.6173325	90	7641 33.42202	90	9326 33.3706163	90	4906 33.5811615	90	4253 27.0381927	90										
9851 35.1147308	90	5036 33.385849	90	10333 33.5956345	90	7642 33.432869	90	9327 33.3822327	90	4907 33.5666962	90	4254 27.0526657	90										
9852 35.1147308	90	5037 33.385849	90	10334 33.6571198	90	7643 33.4545746	90	9328 33.3424454	90	4908 33.5669798	90	4255 27.0201111	90										
9853 35.0966454	90	5038 33.3822327	90	10335 33.5666962	90	7644 33.4581909	90	9329 33.42202	90	4909 33.5413818	90	4256 27.0526657	90										
9854 35.1074944	90	5039 33.385849	90	10336 33.5804018	90	7645 33.4364053	90	9330 33.4364053	90	4910 33.5630798	90	4257 27.0201111	90										
9855 35.1002617	90	5040 33.400322	90	10337 33.5703125	90	7646 33.4364053	90	9331 33.4184036	90	4911 33.5847778	90	4258 27.0526657	90										
9856 35.0857925	90	5041 33.400322	90	10338 33.5413818	90	7647 33.4147873	90	9332 33.4184036	90	4912 33.5956345	90	4259 27.0418091	90										
9857 35.1147308	90	5042 33.385849	90	10339 33.5160599	90	7648 33.3967056	90	9333 33.4147873	90	4913 33.5630798	90	4260 27.0418091	90										
9858 35.0713272	90	5043 33.3894453	90	10340 33.5160599	90	7649 33.3713837	90	9334 33.4364053	90	4914 33.5804018	90	4261 27.0345764	90										
9859 35.1183472	90	5044 33.3822327	90	10341 33.5269089	90	7650 33.4039383	90	9335 33.4075546	90	4915 33.5811615	90	4262 27.0526657	90										
9860 35.0713272	90	5045 33.3605347	90	10342 33.5052109	90	7651 33.4147873	90	9336 33.385849	90	4916 33.5522308	90	4263 27.0345764	90										
9861 35.0894127	90	5046 33.385849	90	10343 33.4762726	90	7652 33.3822327	90	9337 33.4256363	90	4917 33.5811615	90	4264 27.0164948	90										
9862 35.0604744	90	5047 33.3822327	90	10344 33.4979782	90	7653 33.3822327	90	9338 33.4364053	90	4918 33.5449982	90	4265 27.0237274	90										
9863 35.0604744	90	5048 33.385849	90	10345 33.4979782	90	7654 33.3460693	90	9339 33.4798089	90	4919 33.5703125	90	4266 27.0020294	90										
9864 35.046254	90	5049 33.3822327	90	10346 33.4907455	90	7655 33.352127	90	9340 33.4581909	90	4920 33.5703125	90	4267 27.0056458	90										
9865 35.0677109	90	5050 33.4147873	90	10347 33.4364053	90	7656 33.3460693	90	9341 33.4726563	90	4921 33.5486145	90	4268 26.9839401	90										
9866 35.0490907	90	5051 33.3677673	90	10348 33.4147873	90	7657 33.3713837	90	9342 33.4907455	90	4922 33.5956345	90	4269 27.0237274	90										
9867 35.0604744	90	5052 33.385849	90	10349 33.42202	90	7658 33.3460693	90	9343 33.4943619	90	4923 33.5305252	90	4270 27.0056458	90										
9868 35.0532417	90	5053 33.385849	90	10350 33.4401016	90	7659 33.3766163	90	9344 33.4762726	90	4924 33.5305252	90	4271 27.0418091	90										
9869 35.0821762	90	5054 33.3822327	90	10351 33.432869	90	7660 33.385849	90	9345 33.4762726	90	4925 33.4871216	90	4272 26.9513931	90										
9870 35.0532417	90	5055 33.3822327	90	10352 33.4603983	90	7661 33.317131	90	9346 33.4603983	90	4926 33.4871216	90	4273 27.0128784	90										
9871 35.0490907	90	5056 33.4039383	90	10353 33.4437256	90	7662 33.3243637	90	9347 33.4943619	90	4927 33.4798089	90	4274 26.9075565	90										
9872 35.0490907	90	5057 33.3967056	90	10354 33.4039383	90	7663 33.295433	90	9348 33.4907455	90	4928 33.5269089	90	4275 26.9803138	90										
9873 35.0532417	90	5058 33.4039383	90	10355 33.4256363	90	7664 33.353302	90	9349 33.4762726	90	4929 33.5160599	90	4276 26.9984131	90										
9874 35.0713272	90	5059 33.3894453	90	10356 33.4184036	90	7665 33.2910911	90	9350 33.5052109	90	4930 33.5052109	90	4277 27.0237274	90										
9875 35.0604744	90	5060 33.4039383	90	10357 33.3677673	90	7666 33.2701111	90	9351 33.5052109	90	4931 33.5413818	90	4278 26.9947691	90										
9876 35.0677109	90	5061 33.3894453	90	10358 33.3894453	90	7667 33.315147	90	9352 33.5232925	90	4932 33.5160599	90	4279 26.9839401	90										
9877 35.0604744	90	5062 33.4256363	90	10359 33.4147873	90	7668 33.3244454	90	9353 33.5630798	90	4933 33.5269089	90	4280 27.0128784	90										
9878 35.0677109	90	5063 33.3766163	90	10360 33.4039383	90	7669 33.32798	90	9354 33.5052109	90	4934 33.5305252	90	4281 26.976705	90										
9879 35.0604744	90	5064 33.3822327	90	10361 33.4184036	90	7670 33.315964	90	9355 33.5305252	90	4935 33.5269089	90	4282 26.9875565	90										
9880 34.9917526	90	5065 33.3894453	90	10362 33.3822327	90	7671 33.2909404	90	9356 33.5232925	90	4936 33.5269089	90	4283 27.0056458	90										
9881 34.9917526	90	5066 33.3967056	90	10363 33.3894453	90	7672 33.315147	90	9357 33.5341415	90	4937 33.4581909	90	4284 26.9822421	90										
9882 34.995369	90	5067 33.4075546	90	10364 33.3967056	90	7673 33.306212	90	9358 33.5486145	90	4938 33.5052109	90	4285 27.0418091	90										
9883 34.9917526	90	5068 33.42202	90	10365 33.3894453	90	7674 33.315147	90	9359 33.5341415	90	4939 33.4798089	90	4286 27.0056458	90										
9884 34.995369	90	5069 33.4147873	90	10366 33.3894453	90	7675 33.3460693	90	9360 33.4979782	90	4940 33.4871216	90	4287 27.0164948	90										
9885 34.998953	90	5070 33.3894453	90	10367 33.4437256	90	7676 33.3822327	90	9361 33.5341415	90	4941 33.5052109	90	4288 27.0201111	90										
9886 35.013399	90	5071 33.3894453	90	10368 33.3460693	90	7677 33.3766163	90	9362 33.4726563	90	4942 33.4798089	90	4289 27.0201111	90										
9887 34.995369	90	5072 33.4401016	90	10369 33.3460693	90	7678 33.364151	90	9363 33.4798089	90	4943 33.4603983	90	4290 27.											



(continua Anexo U) (parte 15/16)

PRUEBA 17 08 04 2022				PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO				PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO				PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO				PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO				PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK			
Identificación				PLANTA 5TUBOS				PLANTA 4TUBOS				PLANTA 5TUBO				PLANTA 5TUBOS				PLANTA 5TUBO				OK			
X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz		X(ms)	T4 °C	VDF_Hz	
9927	34.9049454	90	5112	33.4401018	90	10409	33.4818073	90	7718	33.3424454	90	9403	33.3352127	90	4983	33.5052109	90	4330	27.1154136	90							
9928	34.9013129	90	5113	33.4328669	90	10410	33.4798089	90	7719	33.3786163	90	9404	33.32798	90	4984	33.5160599	90	4331	27.1973419	90							
9929	34.9411163	90	5114	33.4364853	90	10411	33.4798089	90	7720	33.4039383	90	9405	33.3315964	90	4985	33.5449982	90	4332	27.2298889	90							
9930	34.9447327	90	5115	33.4328669	90	10412	33.4690399	90	7721	33.3967056	90	9406	33.3496857	90	4986	33.4726583	90	4333	27.2371216	90							
9931	34.9519653	90	5116	33.4401018	90	10413	33.5052109	90	7722	33.3894653	90	9407	33.3315964	90	4987	33.4907455	90	4334	27.2698762	90							
9932	34.9375	90	5117	33.4184036	90	10414	33.5088272	90	7723	33.4147873	90	9408	33.364151	90	4988	33.5413818	90	4335	27.2407455	90							
9933	34.9592056	90	5118	33.4437256	90	10415	33.4943619	90	7724	33.3786163	90	9409	33.3460693	90	4989	33.5594635	90	4336	27.2154136	90							
9934	34.9411163	90	5119	33.4039383	90	10416	33.4726583	90	7725	33.3823237	90	9410	33.3315964	90	4990	33.5269089	90	4337	27.2479782	90							
9935	34.9049454	90	5120	33.4003122	90	10417	33.5088272	90	7726	33.3967056	90	9411	33.32798	90	4991	33.5269089	90	4338	27.2190599	90							
9936	34.9058693	90	5121	33.4364853	90	10418	33.4979782	90	7727	33.4328669	90	9412	33.3424454	90	4992	33.5341415	90	4339	27.2552109	90							
9937	34.9194183	90	5122	33.4871216	90	10419	33.5232925	90	7728	33.4437256	90	9413	33.3677673	90	4993	33.5160599	90	4340	27.2190599	90							
9938	34.9555893	90	5123	33.5305252	90	10420	33.5413818	90	7729	33.4437256	90	9414	33.3713837	90	4994	33.4943619	90	4341	27.1864653	90							
9939	34.962822	90	5124	33.5124435	90	10421	33.5160599	90	7730	33.4437256	90	9415	33.3460693	90	4995	33.5160599	90	4342	27.1864653	90							
9940	34.9555893	90	5125	33.4907455	90	10422	33.5341415	90	7731	33.454748	90	9416	33.3894653	90	4996	33.4943619	90	4343	27.1647673	90							
9941	34.926651	90	5126	33.4618073	90	10423	33.5703125	90	7732	33.4437256	90	9417	33.3786163	90	4997	33.5269089	90	4344	27.1575546	90							
9942	34.9519653	90	5127	33.5088272	90	10424	33.5124435	90	7733	33.4509583	90	9418	33.364151	90	4998	33.5232925	90	4345	27.1864653	90							
9943	34.9447327	90	5128	33.4979782	90	10425	33.5413818	90	7734	33.4437256	90	9419	33.3496857	90	4999	33.5305252	90	4346	27.2226563	90							
9944	34.9411163	90	5129	33.4437256	90	10426	33.5773452	90	7735	33.4437256	90	9420	33.3786163	90	5000	33.5341415	90	4347	27.1828669	90							
9945	34.89048	90	5130	33.4979782	90	10427	33.5341415	90	7736	33.4256363	90	9421	33.353302	90	5001	33.5305252	90	4348	27.192526	90							
9946	34.9555893	90	5131	33.5305252	90	10428	33.6137161	90	7737	33.3967056	90	9422	33.3098984	90	5002	33.4943619	90	4349	27.1756363	90							
9947	34.9519653	90	5132	33.5341415	90	10429	33.5047778	90	7738	33.3677673	90	9423	33.3315964	90	5003	33.4979782	90	4350	27.1937263	90							
9948	34.9592056	90	5133	33.5124435	90	10430	33.6173325	90	7739	33.3894653	90	9424	33.295433	90	5004	33.5232925	90	4351	27.1575546	90							
9949	34.9592056	90	5134	33.5413818	90	10431	33.5811615	90	7740	33.4039383	90	9425	33.3605347	90	5005	33.5052109	90	4352	27.1394653	90							
9950	34.979631	90	5135	33.5088272	90	10432	33.5666962	90	7741	33.3967056	90	9426	33.3713837	90	5006	33.4618073	90	4353	27.1286163	90							
9951	34.9058693	90	5136	33.552308	90	10433	33.5703125	90	7742	33.3967056	90	9427	33.385849	90	5007	33.5269089	90	4354	27.0924454	90							
9952	34.9230347	90	5137	33.5449982	90	10434	33.4871216	90	7743	33.3894653	90	9428	33.3352127	90	5008	33.5232925	90	4355	27.088269	90							
9953	34.9338837	90	5138	33.5305252	90	10435	33.5052109	90	7744	33.4039383	90	9429	33.364151	90	5009	33.4871216	90	4356	27.0960693	90							
9954	34.9375	90	5139	33.5449982	90	10436	33.5341415	90	7745	33.400322	90	9430	33.400322	90	5010	33.4943619	90	4357	27.0852127	90							
9955	34.9555893	90	5140	33.5052109	90	10437	33.5486145	90	7746	33.385849	90	9431	33.4075546	90	5011	33.5124435	90	4358	27.1286163	90							
9956	34.926651	90	5141	33.4907455	90	10438	33.5413818	90	7747	33.4039383	90	9432	33.3823237	90	5012	33.5160599	90	4359	27.103302	90							
9957	34.926651	90	5142	33.5305252	90	10439	33.4907455	90	7748	33.3605347	90	9433	33.3713837	90	5013	33.4943619	90	4360	27.1213837	90							
9958	34.8968637	90	5143	33.5052109	90	10440	33.5232925	90	7749	33.385849	90	9434	33.3424454	90	5014	33.4618073	90	4361	27.1069183	90							
9959	34.915802	90	5144	33.5088272	90	10441	33.4907455	90	7750	33.3823237	90	9435	33.3424454	90	5015	33.4943619	90	4362	27.1213837	90							
9960	34.915802	90	5145	33.5486145	90	10442	33.4690399	90	7751	33.3786163	90	9436	33.317131	90	5016	33.5413818	90	4363	27.125	90							
9961	34.9049454	90	5146	33.5341415	90	10443	33.4943619	90	7752	33.3713837	90	9437	33.3352127	90	5017	33.5449982	90	4364	27.1286163	90							
9962	34.9592056	90	5147	33.5305252	90	10444	33.5052109	90	7753	33.385849	90	9438	33.3605347	90	5018	33.5305252	90	4365	27.1069183	90							
9963	34.9230347	90	5148	33.5449982	90	10445	33.4907455	90	7754	33.385849	90	9439	33.3894653	90	5019	33.5269089	90	4366	27.1394653	90							
9964	34.9230347	90	5149	33.5052109	90	10446	33.5160599	90	7755	33.385849	90	9440	33.385849	90	5020	33.5413818	90	4367	27.1213837	90							
9965	34.9230347	90	5150	33.5341415	90	10447	33.4437256	90	7756	33.3967056	90	9441	33.364151	90	5021	33.5305252	90	4368	27.088269	90							
9966	34.9411163	90	5151	33.5486145	90	10448	33.4907455	90	7757	33.3894653	90	9442	33.3894653	90	5022	33.5305252	90	4369	27.114511	90							
9967	34.9447327	90	5152	33.5232925	90	10449	33.4364853	90	7758	33.4075546	90	9443	33.3713837	90	5023	33.5449982	90	4370	27.0743637	90							
9968	34.926651	90	5153	33.4501909	90	10450	33.400322	90	7759	33.3786163	90	9444	33.3823237	90	5024	33.5341415	90	4371	27.0526653	90							
9969	34.9194183	90	5154	33.4726583	90	10451	33.3967056	90	7760	33.3713837	90	9445	33.4075546	90	5025	33.4943619	90	4372	27.067131	90							
9970	34.962822	90	5155	3																							



(continua Anexo U) (parte 16/16)

PRUEBA 17 08 04 2022			PRUEBA 20 18 05 2022 FALLO			PRUEBA 21 02 06 2022 FALLO			PRUEBA 22 08 06 2022 FALLO			PRUEBA 23 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 24 09 06 2022 FALLO			PRUEBA 27 24 06 2022 FALLO T4 OK		
Identificación			PLANTA 5TUBOS			PLANTA 4TUBOS			PLANTA 3TUBOS			PLANTA 2TUBOS			PLANTA 1TUBO					
X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂	X(ms)	T4 °C	VDF H ₂
10013	35,0804744	90	5198	33,32798	90	10495	33,5124435	90	7804	33,3967058	90	9489	33,4798809	90	5069	33,6715851	90	4418	27,0345764	90
10014	35,0857925	90	5199	33,3786163	90	10496	33,5232925	90	7805	33,4184036	90	9490	33,4798809	90	5070	33,6426544	90	4417	27,0381927	90
10015	35,0677109	90	5200	33,364151	90	10497	33,5088272	90	7806	33,4184036	90	9491	33,4871216	90	5071	33,7149887	90	4418	26,9984131	90
10016	35,0677109	90	5201	33,317131	90	10498	33,4943619	90	7807	33,4147873	90	9492	33,4907455	90	5072	33,7113724	90	4419	27,0345764	90
10017	35,0713272	90	5202	33,3552127	90	10499	33,5232925	90	7808	33,4075546	90	9493	33,4147873	90	5073	33,6932907	90	4420	27,056282	90
10018	35,0677109	90	5203	33,3496857	90	10500	33,5449982	90	7809	33,4762726	90	9494	33,4437256	90	5074	33,696907	90	4421	27,0128784	90
10019	35,0604744	90	5204	33,32798	90	10501	33,5703125	90	7810	33,4943619	90	9495	33,4401016	90	5075	33,7149887	90	4422	27,0526657	90
10020	35,0315399	90	5205	33,2990494	90	10502	33,5956345	90	7811	33,4943619	90	9496	33,432869	90	5076	33,7149887	90	4423	27,07790	90
10021	35,0423927	90	5206	33,364151	90	10503	33,6137161	90	7812	33,4979782	90	9497	33,432869	90	5077	33,696907	90	4424	27,067131	90
10022	35,0351563	90	5207	33,3713837	90	10504	33,5804018	90	7813	33,4618073	90	9498	33,400322	90	5078	33,6969744	90	4425	27,0490494	90
10023	35,0640907	90	5208	33,3786163	90	10505	33,5522308	90	7814	33,4581909	90	9499	33,4147873	90	5079	33,707756	90	4426	27,056282	90
10024	35,0640907	90	5209	33,3713837	90	10506	33,5804018	90	7815	33,4871216	90	9500	33,432869	90	5080	33,696907	90	4427	27,0599604	90
10025	35,0532417	90	5210	33,3677673	90	10507	33,6064835	90	7816	33,5341415	90	9501	33,400322	90	5081	33,7041397	90	4428	27,0309601	90
10026	35,1183472	90	5211	33,3713837	90	10508	33,5847778	90	7817	33,5269009	90	9502	33,432869	90	5082	33,707756	90	4429	27,0020294	90
10027	35,1074944	90	5212	33,353302	90	10509	33,6064835	90	7818	33,5232925	90	9503	33,4545746	90	5083	33,7113724	90	4430	26,9875565	90
10028	35,1183472	90	5213	33,3713837	90	10510	33,5992508	90	7819	33,5449982	90	9504	33,4364853	90	5084	33,696907	90	4431	26,9947591	90
10029	35,1219635	90	5214	33,400322	90	10511	33,5804018	90	7820	33,5269009	90	9505	33,4618073	90	5085	33,6752014	90	4432	27,0056458	90
10030	35,1147308	90	5215	33,3786163	90	10512	33,6209488	90	7821	33,5449982	90	9506	33,4364853	90	5086	33,6752014	90	4433	27,0490494	90
10031	35,1074944	90	5216	33,3677673	90	10513	33,6173325	90	7822	33,5088272	90	9507	33,4364853	90	5087	33,6932907	90	4434	27,0020294	90
10032	35,1321251	90	5217	33,3713837	90	10514	33,5956345	90	7823	33,5269009	90	9508	33,4364853	90	5088	33,6788177	90	4435	27,0201111	90
10033	35,1074944	90	5218	33,3677673	90	10515	33,5847778	90	7824	33,5341415	90	9509	33,4401016	90	5089	33,686058	90	4436	27,0164948	90
10034	35,103878	90	5219	33,3786163	90	10516	33,5666962	90	7825	33,4907455	90	9510	33,4437256	90	5090	33,686058	90	4437	27,0418091	90
10035	35,103878	90	5220	33,3786163	90	10517	33,5594635	90	7826	33,4690398	90	9511	33,4581909	90	5091	33,6607361	90	4438	27,0418091	90
10036	35,0749444	90	5221	33,364151	90	10518	33,5804018	90	7827	33,4690398	90	9512	33,4618073	90	5092	33,696907	90	4439	26,9767075	90
10037	35,0966454	90	5222	33,353302	90	10519	33,5811615	90	7828	33,4907455	90	9513	33,4437256	90	5093	33,7149887	90	4440	26,9947591	90
10038	35,0966454	90	5223	33,317131	90	10520	33,5449982	90	7829	33,4618073	90	9514	33,4690398	90	5094	33,7149887	90	4441	26,9441528	90
10039	35,0713272	90	5224	33,3496857	90	10521	33,5847778	90	7830	33,4545746	90	9515	33,4437256	90	5095	33,6209488	90	4442	26,9658585	90
10040	35,0857925	90	5225	33,315964	90	10522	33,5804018	90	7831	33,4039383	90	9516	33,4364853	90	5096	33,6498871	90	4443	26,9658585	90
10041	35,0857925	90	5226	33,3552127	90	10523	33,6317978	90	7832	33,4437256	90	9517	33,4184036	90	5097	33,6930381	90	4444	26,9405365	90
10042	35,0243073	90	5227	33,3823237	90	10524	33,5992508	90	7833	33,4618073	90	9518	33,42202	90	5098	33,6245651	90	4445	26,9586250	90
10043	35,0496254	90	5228	33,32798	90	10525	33,5703125	90	7834	33,3713837	90	9519	33,4184036	90	5099	33,6930381	90	4446	26,9658585	90
10044	35,1147308	90	5229	33,3894653	90	10526	33,6028671	90	7835	33,4184036	90	9520	33,4184036	90	5100	33,6535034	90	4447	26,9767075	90
10045	35,0496254	90	5230	33,385049	90	10527	33,5956345	90	7836	33,4364853	90	9521	33,364151	90	5101	33,6607361	90	4448	26,9405365	90
10046	35,0640907	90	5231	33,400322	90	10528	33,5775452	90	7837	33,315964	90	9522	33,3823237	90	5102	33,6607361	90	4449	26,9333038	90
10047	35,0640907	90	5232	33,4147873	90	10529	33,5775452	90	7838	33,3496857	90	9523	33,364151	90	5103	33,6571198	90	4450	26,9441528	90
10048	35,0677109	90	5233	33,4039383	90	10530	33,5847778	90	7839	33,35302	90	9524	33,3823237	90	5104	33,6173325	90	4451	26,9333038	90
10049	35,0640907	90	5234	33,3967056	90	10531	33,5775452	90	7840	33,3503437	90	9525	33,400322	90	5105	33,5594635	90	4452	26,9260712	90
10050	35,0604744	90	5235	33,3894653	90	10532	33,5992508	90	7841	33,35302	90	9526	33,400322	90	5106	33,5703125	90	4453	26,9043732	90
10051	35,0604744	90	5236	33,3786163	90	10533	33,6173325	90	7842	33,3786163	90	9527	33,4075546	90	5107	33,5666962	90	4454	26,9242448	90
10052	35,0640907	90	5237	33,4039383	90	10534	33,5956345	90	7843	33,32798	90	9528	33,3823237	90	5108	33,5703125	90	4455	26,9196675	90
10053	35,0677109	90	5238	33,4147873	90	10535	33,6064835	90	7844	33,3243637	90	9529	33,4075546	90	5109	33,6137161	90	4456	26,8999002	90
10054	35,0134544	90	5239	33,385049	90	10536	33,5630798	90	7845	33,3552127	90	9530	33,4184036	90	5110	33,6245651	90	4457	26,9260712	90
10055	34,9989853	90	5240	33,364151	90	10537	33,5630798	90	7846	33,2990494	90	9531	33,3967056	90	5111	33,6064853	90	4458	26,9260712	90
10056	34,9917526	90	5241	33,3605347	90	10538	33,5449982	90	7847	33,2918091	90	9532	33,4039383	90	5112	33,5703125	90	4459	26,9586250	90
10057	34,995369	90	5242	33,4039383	90	10539	33,594635	90	7848	33,2773438	90	9533	33,3786163	90	5113	33,5775452	90	4460	26,9333038	90
10058	34,9917526	90	5243	33,4075546	90	10540	33,5703125	90	7849	33,295433	90	9534	33,400322	90	5114	33,5341415	90	4461	26,9196675	90
10059	34,9917526	90	5244	33,3967056	90	10541	33,5804018	90	7850	33,2918091	90	9535	33,364151	90	5115	33,5703125	90	4462	26,9196675	90
10060	34,9917526	90	5245	33,3713837	90	10542	33,5630798	90	7851	33,2881927	90	9536	33,4184036	90	5116	33,5305252	90	4463	26,9242448	90
10061	34,9989853	90	5246	33,364151	90	10543	33,5847778	90	7852	33,306282	90	9537	33,3894653	90	5117	33,5413818	90	4464		

Anexo V. Tabla de valores de temperatura para las termorresistencias RTD PT100 (fragmento de la TABLA 6-5 del Libro de Creus Sole 2010)

Valores de resistencia según la temperatura en °C para las sondas de resistencia Pt100, con coeficiente de variación de resistencia 0,00385 según DIN 43.760 (ITS-68)										
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100,000	100,391	100,781	101,172	101,562	101,952	102,343	102,733	103,123	103,512
10	103,902	104,292	104,681	105,070	105,460	105,894	106,238	106,627	107,015	107,404
20	107,793	108,181	108,569	108,957	109,345	109,733	110,121	110,509	110,897	111,284
30	111,671	112,059	112,446	112,833	113,220	113,607	113,993	114,380	114,766	115,153
40	115,539	115,925	116,311	116,697	117,083	117,468	117,854	118,239	118,624	119,010
50	119,395	119,780	120,164	120,549	120,934	121,318	121,702	122,087	122,471	122,855

Anexo W. Lista de variables del programa

Nombre	Tipo de datos	Dirección	Remanencia	Visible en HMI	Accesible desde HMI	Comentario
AI0	Word	%IW64	False	True	True	Presion (P1)
AI1	Word	%IW66	False	True	True	Disponible
AI2	Word	%IW68	False	True	True	Temperatura (T1)
AI3	Word	%IW70	False	True	True	Temperatura (T2)
AI4	Word	%IW72	False	True	True	Temperatura (T3)
AI5	Word	%IW74	False	True	True	Temperatura (T4)
AQ0	Word	%QW68	False	True	True	POSICIONADOR
AQ1	Word	%QW70	False	True	True	VDF VELOCIDAD
DIO.0	Bool	%IO.0	False	True	True	Switch nivel alto
DIO.1	Bool	%IO.1	False	True	True	Switch nivel bajo
DIO.2	Bool	%IO.2	False	True	True	VDF Falla
DIO.3	Bool	%IO.3	False	True	True	Disponible
DIO.4	Bool	%IO.4	False	True	True	Disponible
DIO.5	Bool	%IO.5	False	True	True	Disponible
DIO.6	Bool	%IO.6	False	True	True	Disponible
DIO.7	Bool	%IO.7	False	True	True	Disponible
DI1.0	Bool	%I1.0	False	True	True	Disponible
DI1.1	Bool	%I1.1	False	True	True	Disponible
DI1.2	Bool	%I1.2	False	True	True	Disponible
DI1.3	Bool	%I1.3	False	True	True	Disponible
DI1.4	Bool	%I1.4	False	True	True	Disponible
DI1.5	Bool	%I1.5	False	True	True	Disponible
DQ0.0	Bool	%Q0.0	False	True	True	R1- VDF ENERGIZA
DQ0.1	Bool	%Q0.1	False	True	True	R2- VDF ON/OFF1
DQ0.2	Bool	%Q0.2	False	True	True	R3- VDF ACK
DQ0.3	Bool	%Q0.3	False	True	True	R4 - RESISTENCIA
DQ0.4	Bool	%Q0.4	False	True	True	DISPONIBLE
DQ0.5	Bool	%Q0.5	False	True	True	DISPONIBLE
DQ0.6	Bool	%Q0.6	False	True	True	DISPONIBLE
DQ0.7	Bool	%Q0.7	False	True	True	DISPONIBLE
DQ1.0	Bool	%Q1.0	False	True	True	DISPONIBLE
DQ1.1	Bool	%Q1.1	False	True	True	DISPONIBLE
FLIP FLOP CONTROL ON OFF	Bool	%M100.0	False	True	True	
Tag_2	DInt	%MD101	False	True	True	
System_Byte	Byte	%MB1	False	True	True	
FirstScan	Bool	%M1.0	False	True	True	
DiagStatusUpdate	Bool	%M1.1	False	True	True	
AlwaysTRUE	Bool	%M1.2	False	True	True	
AlwaysFALSE	Bool	%M1.3	False	True	True	
P_UP_Modo_T1	Bool	%M2.0	False	True	True	
Tag_1	Word	%MW100	False	True	True	
Tag_3	Bool	%M0.7	False	True	True	
Clock_Byte	Byte	%MB0	False	True	True	
Clock_10Hz	Bool	%M0.0	False	True	True	
Clock_5Hz	Bool	%M0.1	False	True	True	
Clock_2.5Hz	Bool	%M0.2	False	True	True	
Clock_2Hz	Bool	%M0.3	False	True	True	
Clock_1.25Hz	Bool	%M0.4	False	True	True	
Clock_1Hz	Bool	%M0.5	False	True	True	
Clock_0.625Hz	Bool	%M0.6	False	True	True	
Tag_4	Bool	%M200.0	False	True	True	

Anexo X. Recursos utilizados en el proyecto y beneficios proyectados.

No	Rubros	Clasificación	Monto	Fuente
1	Honorarios por servicios profesionales de Dirección	Gastos de personal	2000000	Universidad
2	Honorarios por servicios profesionales de Co-Dirección	Gastos de personal	1000000	Universidad
3	Honorarios por servicios profesionales de Asesoría en automatización	Gastos de personal	1500000	Universidad
4	Sostenimiento del autor del proyecto	Gastos de personal	23040000	Universidad
5	Alquiler del banco de control de temperatura	Infraestructura	15000000	Universidad
6	Servicio de Luz	Infraestructura	250000	Universidad
7	Servicio de Agua	Infraestructura	100000	Universidad
8	Tuberías y accesorios	Infraestructura	250000	Propios
9	Equipos técnicos electrónicos	Infraestructura	350000	Propios
10	Computador portátil	Infraestructura	250000	Propios
11	Almacenamiento de los datos	Servicios profesionales	120000	Propios
12	Adecuaciones de infraestructura	Servicios profesionales	80000	Propios
13	Redacción del documento	Servicios profesionales	96000	Propios
14	Software y licencia del Tia Portal	Servicios profesionales	1200000	Universidad
15	Equipos a adquirir	Servicios profesionales	90000	Propios
16	Servicios técnicos y tecnológicos	Servicios profesionales	600000	Propios
17	Mantenimiento de equipos y Reparaciones	Servicios profesionales	350000	Propios
18	Desplazamientos y viáticos	Viajes y viáticos	1500000	Propios
19	Participación en eventos científicos	Publicaciones y divulgación	800000	Universidad
20	Materiales y suministros	suministros	150000	Propios
21	Otros	Contingencias	1200000	Propios
TOTAL (\$)			49926000	