



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
POSTGRADO EN INSTRUMENTACIÓN

**DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y
ADQUISICIÓN DE DATOS PARA UNIDAD DE PRUEBA
DE LEVANTAMIENTO DE CRUDO MEDIANTE
INYECCIÓN DE VAPOR A ESCALA DE LABORATORIO**

Trabajo de Grado de Maestría presentado ante la
ilustre Universidad Central de Venezuela por el
Ingeniero Richard García Méndez para optar al título
de Magister Scientiarum mención Instrumentación
Tutor: Dr. Jesús Pérez

Caracas – Venezuela
Marzo de 2012

Richard García Méndez

**DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS
PARA UNIDAD DE PRUEBA DE LEVANTAMIENTO DE CRUDO MEDIANTE
INYECCIÓN DE VAPOR A ESCALA DE LABORATORIO**

Tutor: Dr. Jesús Pérez

Caracas, U.C.V. Facultad de Ciencias. Postgrado en Instrumentación, Maestría.

Año 2012. 133 pág.

Palabras claves: Control difuso; Petróleo; Factor de recobro; Recuperación mejorada de petróleo; Recuperación térmica de petróleo; Inyección alterna de vapor; Calidad del vapor;

Resumen: En el presente trabajo de grado de maestría se desarrolla un sistema automatizado para el control, monitoreo y registro de las variables en una unidad de laboratorio usada para ejecutar pruebas de un método de recuperación mejorada de petróleo basado en la inyección alterna de vapor. El diseño del sistema comprende la selección de la instrumentación, la identificación de los lazos de control, la definición de la arquitectura del sistema, la selección de los esquemas de control, la obtención de los parámetros de los controladores y la simulación. La selección de los instrumentos de medición se hace según las normas técnicas vigentes, las cuales establecen los criterios para la selección del tipo de instrumento, su precisión y rango para la aplicación específica, considerando además las condiciones ambientales del proceso donde se instalan; se hace la selección de instrumentos de medición de temperatura, presión diferencial, presión manométrica y flujo volumétrico. El diseño del sistema de control comprende la aplicación de técnicas muy útiles para lograr un buen desempeño del sistema. Se desarrolla el sistema de control de la temperatura en diferentes puntos del sistema y la calidad del vapor inyectado en la celda que reproduce las condiciones del yacimiento. Para diseñar el controlador de la temperatura en el evaporador, que genera el vapor sobrecalentado usado para preparar el vapor húmedo a inyectarse en la celda, se obtiene un modelo matemático del mismo mediante la técnica de identificación de sistemas con la herramienta Matlab™; a partir del modelo matemático obtenido se diseña un controlador proporcional-integral que es comparado con un controlador difuso. Para controlar las temperaturas en otros puntos del sistema, que no tienen un modelo matemático fijo debido a modificaciones continuas de la planta, se diseña un controlador difuso que muestra muy buen desempeño, satisfaciendo los requerimientos del proceso. El control de la calidad del vapor húmedo inyectado en la celda de desplazamiento se hace mediante una estrategia de control basada en el balance de masa y energía en un punto de mezcla de vapor sobrecalentado con agua; el algoritmo de control diseñado considera las temperaturas, presiones y densidades de ambas corrientes, así como el flujo de vapor sobrecalentado, para calcular el flujo de agua que garantiza la calidad requerida. El sistema desarrollado, además de controlar las temperaturas y la calidad del vapor, ejecuta de forma automática todas las fases del proceso con la mínima intervención del operador, gestiona las alarmas y registra los datos sobre las diferentes variables en archivos de texto plano, generando históricos de datos para su posterior análisis.

A Celina Méndez, Hebert García,
Jhon García y Michell García

AGRADECIMIENTOS

Esta es otra ocasión para agradecerle a Dios por haberme dotado de virtudes indispensables para alcanzar esta nueva meta que me incentiva a seguir a disposición de quien necesite mi apoyo, ya sea en lo profesional o en lo personal.

Indudablemente, mi agradecimiento a mis padres Celina Méndez y Hebert García, a mis sobrinos Jhon García, Michell García, Yulianni García y Betania García, a mis hermanos Henry García, Orlando García, Javier García y Yuledy García, a Mercedes Merchán y Rosalba Díaz; ustedes han sido mi principal motivo para lograr todo lo propuesto hasta hoy y lo que vendrá en el futuro.

A mi tutor, el Dr. Jesús Pérez, por haberme brindado su invalorable apoyo y por darme la oportunidad de trabajar con él en esta maestría. Gracias Dr. Jesús Pérez por sus enseñanzas tanto en lo profesional como en lo personal. A mi profesor, el Dr. Clemente Herrera, por su gran apoyo y guía para terminar este trabajo de grado de maestría de forma exitosa. A mi profesor coordinador, el Dr. Emery Dunia, por darme la oportunidad de cursar estudios en su programa de maestría y por su guía durante todo el programa. A Karen Zapata por su valioso apoyo durante todo este tiempo; muchas gracias Karen por toda la ayuda prestada y el excelente trabajo realizado para cumplir con todos los requisitos administrativos.

A mi amigo Nelson Rondón por su gran apoyo y dedicación para que este trabajo se culminara exitosamente; gracias Nelson por el invaluable apoyo en lo profesional y en lo personal. A mis amigos Edgar Rivero, Argenis Rey, Edgar Camargo, Antonio Dos Santos y Alida Veliz por su apoyo incondicional para alcanzar esta meta; amigos, gracias por estar siempre conmigo y darme ánimo para seguir adelante. Al compañero Yefrenck Castro por su colaboración durante la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	iii
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
CAPÍTULO I. EI PROBLEMA	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Formulación del Problema.....	3
1.4. Justificación de la investigación	3
1.5. Objetivos de la investigación	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. Delimitación y alcance de la investigación.....	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes de la investigación	6
2.2. Fundamentos teóricos	8
2.2.1. Yacimiento	8
2.2.2. Propiedades del petróleo	8
2.2.3. Clasificación del petróleo.....	9
2.2.4. Recuperación primaria de crudo	10
2.2.5. Recuperación secundaria de crudo	10
2.2.6. Recuperación mejorada de petróleo	10
2.2.6.1. Métodos de recuperación térmicos.....	11
2.2.6.2. Métodos de recuperación químicos	13
2.2.6.3. Métodos de recuperación por inyección de fluidos miscibles.....	13
2.2.6.4. Métodos de recuperación por inyección de microorganismos	13
2.2.7. Conceptos de termodinámica	13
2.2.7.1. Entalpía.....	13
2.2.7.2. Primera ley de la termodinámica.....	14
2.2.7.3. Conceptos importantes en termodinámica.....	14
2.2.7.4. Primera ley de la termodinámica para sistemas abiertos.....	15
2.2.7.5. Propiedades termodinámicas del agua y del vapor.....	16

2.2.7.6. Propiedades independientes.....	18
2.2.7.7. Transferencia de calor y termodinámica	19
2.2.7.8. Calidad de la mezcla líquido-vapor o vapor húmedo	20
2.2.7.9. Aplicación del balance de masa y energía en un punto de mezcla de agua fría y vapor sobrecalentado.....	22
2.2.8. Calidad del vapor usada en la recuperación mejorada de crudo	24
2.2.9. Medición de la calidad del vapor húmedo	24
2.2.10. Lógica difusa	25
2.2.11. Control de procesos y control PID	28
2.2.12. Control difuso.....	29
2.2.13. Identificación de sistemas	30
2.2.13.1. Aplicación de la identificación de sistemas.....	30
2.2.13.2. Diseño del experimento para identificación	31
2.2.14. Respuesta transitoria y respuesta en estado estable	35
2.2.15. Especificaciones de la respuesta transitoria	36
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
3.1. Etapas de la investigación.....	37
3.1.1. Diagnóstico.....	37
3.1.2. Diseño.....	38
3.1.3. Construcción.....	39
3.1.4. Implantación.....	39
3.1.5. Pruebas	40
CAPÍTULO IV. PROPUESTA DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL ..	41
4.1. Descripción general de la unidad de inyección alterna de vapor.....	41
4.2. Descripción del proceso de inyección alterna de vapor.....	44
4.2.1. Preparación de la celda de desplazamiento	44
4.2.2. Preparación del equipo para la prueba de inyección	44
4.2.3. Generación del vapor a condiciones de operación	44
4.2.4. Inyección del vapor	44
4.2.5. Remojo	45
4.2.6. Producción.....	45
4.3. Restricciones y criterios para el diseño del sistema de control y adquisición de datos	45

4.4. Identificación de las variables del proceso	46
4.5. Selección de la instrumentación	47
4.5.1. Instrumentos de medición de temperatura	47
4.5.2. Instrumento de medición de presión diferencial	49
4.5.3. Bombas.....	51
4.5.4. Instrumentos de medición de presión manométrica.....	52
4.5.5. Instrumentos de medición de flujo volumétrico.....	53
4.5.6. Elementos finales de control de temperatura	54
4.5.7. Controlador industrial y módulos de entrada/salida.....	54
4.6. Identificación de lazos de control	56
4.7. Arquitectura del sistema de adquisición de datos y control.....	57
4.8. Sistema de unidades.....	58
4.9. Modelación del sistema de generación de vapor sobrecalentado	58
4.9.1. Descripción del sistema modelado	59
4.9.2. Experimentos realizados	60
4.9.3. Adquisición de datos	63
4.9.4. Preprocesamiento de los datos mediante filtro FIR pasa-bajas.....	64
4.9.5. Identificación del sistema en lazo cerrado	67
4.9.5.1. Datos para estimación y validación del modelo	67
4.9.5.2. Identificación del sistema mediante Matlab™	69
4.9.6. Cálculo de la función de transferencia del sistema en lazo abierto.....	71
4.10. Diseño e implantación del sistema de control de temperatura.....	74
4.10.1. Sistema de control de la temperatura en el evaporador.....	74
4.10.1.1. Sistema de control Proporcional- Integral para TE-02	75
4.10.1.2. Sistema de control difuso para TE-02	81
4.10.2. Sistema de control de temperatura en línea de vapor sobrecalentado (TE-04) .	84
4.10.2.1. Sistema de control difuso para TE-04	84
4.10.3. Sistema de control de temperatura en línea de la mezcla (TE-05).....	86
4.10.3.1. Sistema de control difuso para TE-05	87
4.10.4. Sistema de control de temperatura en la celda (TE-13 y TE-14).....	88
4.10.4.1. Sistema de control difuso para TE-13 y TE-14	90
4.11. Diseño del sistema de control de la calidad del vapor	92
4.11.1. Esquema de control aplicado para la calidad del vapor	92

4.11.2. Estrategia de control aplicada para la calidad del vapor	93
4.11.3. Cálculo de entalpías	96
4.11.4. Puntos de operación	96
4.12. Gestión de alarmas.....	96
4.12.1. Indicadores de alta temperatura.....	97
4.12.2. Indicadores de baja y alta presión	97
CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	98
5.1. Análisis del modelo del sistema de generación de vapor sobrecalentado	98
5.1.4. Estabilidad del sistema en lazo abierto	98
5.2. Pruebas de los sistemas de control de temperaturas	99
5.2.1. Sistemas de control de la temperatura en el evaporador	99
5.2.1.1. Sistema de control proporcional- integral para TE-02	99
5.2.1.2. Sistema de control difuso para TE-02	101
5.2.2. Sistema de control de la temperatura en línea de vapor sobrecalentado (TE-04).....	103
5.2.3. Sistema de control de la temperatura en la línea de la mezcla (TE-05).....	106
5.2.4. Sistema de control de la temperatura en la celda (TE-13 y TE-14).....	108
5.3. Pruebas del sistema de control de la calidad del vapor.....	111
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES	118
BIBLIOGRAFÍA	120
Apéndice A. Medición de la calidad del vapor mediante calorímetro de estrangulación .	123
Apéndice B. Esquema de aterramiento de los termopares	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Proceso de inyección alterna de vapor [3]	12
Figura 2. 2. Variación del volumen específico del agua con la temperatura [13]	17
Figura 2. 3. Relación entre la presión y la variación del volumen específico del agua con la temperatura [13]	18
Figura 2. 4. Tipos de mezcla líquido - vapor seco	20
Figura 2. 5. Punto de mezcla de agua fría y vapor sobrecalentado	22
Figura 2. 6. Funciones de pertenencia más usadas para los conjuntos difusos	26
Figura 2. 7. Mecanismo de inferencia tipo Mamdani aplicado a modelos MISO	28
Figura 2. 8. Sistema de control convencional.....	29
Figura 2. 9. Arquitectura del controlador difuso [20].....	30
Figura 2. 10. Ruido blanco Gaussiano filtrado	32
Figura 2. 11. Señal binaria aleatoria	33
Figura 2. 12. Diagrama de bloques de un sistema retroalimentado típico.....	34
Figura 2. 13. Respuesta transitoria de un sistema y sus especificaciones	36
Figura 4. 1. Esquema del equipo de inyección alterna de vapor	42
Figura 4. 2. Celda de desplazamiento de la unidad de inyección alterna de vapor	43
Figura 4. 3. Arquitectura del sistema de control y adquisición de datos	58
Figura 4. 4. Esquema del sistema de generación de vapor sobrecalentado	59
Figura 4. 5. Señal de referencia usada para la identificación del evaporador	62
Figura 4. 6. Datos de entrada y salida del evaporador.....	63
Figura 4. 7. Datos de entrada y salida del evaporador (zoom)	64
Figura 4. 8. Espectro de magnitud y fase del filtro FIR pasa-bajas.....	66
Figura 4. 9. Temperatura TE-02 original y filtrada con FIR pasa-bajas	66
Figura 4. 10. Datos de entrada y salida usados en la estimación del modelo del evaporador	68
Figura 4. 11. Datos de entrada y salida usados para la validación del modelo del evaporador	68
Figura 4. 12. Interfaz gráfica de herramienta de identificación de Matlab	69
Figura 4. 13. Comparación entre respuesta real y respuesta del modelo estimado del evaporador	70
Figura 4. 14. Comparación entre respuesta real y respuesta del modelo estimado (zoom)..	71
Figura 4. 15. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado usado para identificación .	71
Figura 4. 16. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado para el evaporador.....	72
Figura 4. 17. Comparación entre la respuesta real y la simulada para el evaporador	73
Figura 4. 18. Comparación entre la respuesta real y la simulada para el evaporador (zoom).....	74
Figura 4. 19. Sistema de control Proporcional-Integral para el evaporador.....	75

Figura 4. 20. Ubicación de los polos deseados del evaporador en lazo cerrado según sobrepaso máximo	77
Figura 4. 21. Ubicación de los polos deseados del evaporador en lazo cerrado	77
Figura 4. 22. Respuesta del evaporador con el controlador PI-1 diseñado (simulado)	80
Figura 4. 23. Respuesta del evaporador con el controlador PI-2 diseñado (simulado)	81
Figura 4. 24. Esquema del sistema de control difuso para el evaporador	81
Figura 4. 25. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de entrada y salida para el evaporador	82
Figura 4. 26. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de entrada y salida para la línea 04	85
Figura 4. 27. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos del cambio del error para la línea 05	87
Figura 4. 28. Disposición de mantas térmicas en la celda.....	89
Figura 4. 29. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de entrada y salida para la celda.....	91
Figura 4. 30. Punto de mezcla de agua fría y vapor sobrecalentado para control de la calidad.....	93
Figura 5. 1. Respuesta simulada del evaporador	99
Figura 5. 2. Respuesta del evaporador con el controlador PI	100
Figura 5. 3. Respuesta del evaporador con el controlador difuso (prueba 1).....	101
Figura 5. 4. Señal de control para el evaporador con el controlador difuso (prueba 1)	102
Figura 5. 5. Respuesta del evaporador con el controlador difuso (prueba 2).....	102
Figura 5. 6. Señal de control para el evaporador con el controlador difuso (prueba 2)	103
Figura 5. 7. Respuesta del sistema para TE-04 con el controlador difuso (prueba 1).....	104
Figura 5. 8. Señal de control TC-04 (prueba 1).....	104
Figura 5. 9. Respuesta del sistema para TE-04 con el controlador difuso (prueba 2).....	105
Figura 5. 10. Señal de control TC-04 (prueba 2).....	105
Figura 5. 11. Respuesta del sistema para TE-05 con el controlador difuso (prueba 1).....	106
Figura 5. 12. Señal de control TC-05 (prueba 1).....	107
Figura 5. 13. Respuesta del sistema para TE-05 con el controlador difuso (prueba 2).....	107
Figura 5. 14. Señal de control TC-05 (prueba 2).....	108
Figura 5. 15. Perfil de temperaturas en la celda	109
Figura 5. 16. Respuesta del sistema de control en la celda	110
Figura 5. 17. Señales de control para los controladores en la celda	111
Figura 5. 18. Comportamiento de la presión y la temperatura del vapor sobrecalentado ..	112
Figura 5. 19. Relación entre la presión y la temperatura de saturación.....	113
Figura 5. 20. Respuesta del sistema de control de temperatura para TE-05.....	113
Figura 5. 21. Entalpías del líquido saturado y vapor saturado en la mezcla	114
Figura 5. 22. Relación entre la calidad del vapor y la entalpía.....	115
Figura 5. 23. Respuesta del sistema de control de la calidad para las entalpías.....	116
Figura 5. 24. Relación entre el flujo de agua fría y la calidad del vapor requerida.....	117

Figura A.1. Calorímetro de estrangulación instalado en la unidad IAV	123
Figura A.2. Calorímetro de estrangulación con su instrumentación	124
Figura A.3. Dimensiones de la cámara del calorímetro de estrangulación	124
Figura A.4. Temperatura de saturación de la mezcla de vapor húmedo	126
Figura A.5. Relación entre el flujo de agua fría y la calidad deseada	127
Figura A.6. Calidad del vapor medida mediante el calorímetro en prueba 1	127
Figura A.7. Comportamiento de la presión y la temperatura en el calorímetro en prueba 1	128
Figura A.8. Calidad del vapor medida mediante el calorímetro en prueba 2	129
Figura A.9. Comportamiento de la presión y la temperatura en el calorímetro en prueba 2	130
Figura A.10. Diagrama de simulación del calorímetro realizada en PRO II	131
Figura B.1. Esquema de aterramiento de los termopares	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación del crudo según su gravedad API	9
Tabla 4.1. Variables del proceso a medir y controlar	46
Tabla 4.2. Especificaciones de las mantas térmicas	54
Tabla 4.3. Lazos de control de la unidad de inyección alterna de vapor	56
Tabla A.1. Resultados de simulación del calorímetro de estrangulación	132

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

En este capítulo se expone el problema planteado en este trabajo de grado de maestría, se presenta la justificación y se plantean los objetivos de la investigación. Finalmente, se establece la delimitación y alcance del trabajo realizado.

1.1. Antecedentes

La calidad del vapor utilizado en el proceso de inyección de vapor como método de recuperación térmica de petróleo ha sido una variable estudiada desde hace muchos años con el propósito de optimizar el proceso para lograr un mayor porcentaje de recuperación. La calidad del vapor se define como la relación entre la cantidad de agua en estado gaseoso y la cantidad total de agua en estado líquido y gaseoso, presentes en una mezcla líquido-gas de agua. Dicha calidad generalmente se expresa en porcentaje, y se obtiene al multiplicar la relación anterior por 100. De esta manera, un vapor con una calidad de 0 % estará compuesto sólo por agua líquida, mientras que si su calidad es de 100 %, estará compuesto sólo por agua en estado gaseoso [12].

Varias empresas e investigadores han hecho esfuerzos para, como primer paso, medir la calidad del vapor en línea y, luego, controlarla dentro de los límites requeridos. El control de la calidad del vapor a usarse en el proceso de inyección como método de recuperación mejorada de petróleo, representa un paso clave en la optimización del proceso, ya que permite mejorar el acondicionamiento de las propiedades fisicoquímicas de los fluidos en el yacimiento y, con ello, mejorar su movilidad, lo cual trae consigo un incremento en la tasa de producción de crudo.

1.2. Planteamiento del problema

La industria petrolera, desde hace algunos años, realiza investigaciones sobre los métodos de recuperación mejorada de petróleo, siendo uno de los más estudiados el proceso de inyección alterna de vapor, el cual consiste en un método de recuperación térmica.

Actualmente, se cuenta con una unidad de inyección alterna de vapor, a escala de laboratorio, que se utiliza para la realización de pruebas de recuperación de crudos pesados y extrapesados con el fin de incrementar la producción de petróleo; en dicha unidad se evalúa el vapor con algunos aditivos y se identifican los aditivos más eficientes para la aplicación de dicho método de recuperación mejorada en los campos de crudos pesados y extrapesados.

El equipo de inyección alterna de vapor, usado para las pruebas mencionadas anteriormente, no disponía de un sistema de control y adquisición de datos que permitiera garantizar la calidad del vapor inyectada en las celdas de desplazamiento que simulan con cierta aproximación las condiciones del yacimiento. Por lo anterior, las pruebas se realizaban asumiendo que la calidad del vapor era la deseada, sin ninguna garantía de ello, lo cual podía repercutir enormemente en los resultados de las evaluaciones realizadas en caso de que la calidad del vapor obtenida realmente no fuera la requerida.

Otra desventaja de la ausencia de un sistema que permitiera controlar la calidad del vapor, es la imposibilidad de realizar pruebas con diferentes calidades de vapor y diferentes aditivos con el propósito de determinar los mejores fluidos a inyectar en determinados yacimientos para maximizar el porcentaje de recuperación.

Además de lo mencionado anteriormente, el equipo de inyección de vapor estaba siendo operado manualmente, lo cual traía imprecisión durante la realización de las pruebas, pues es necesario controlar, monitorear y/o registrar muchas variables que afectan el proceso de inyección alterna de vapor, entre éstas la temperatura en diferentes puntos, presión en las líneas, presión diferencial en la celda, flujo volumétrico de agua, volumen de agua y los tiempos de duración de algunas fases del proceso.

1.3. Formulación del Problema

Por lo mencionado anteriormente, surgió el planteamiento del desarrollo de un sistema de adquisición de datos y control que permitiera mejorar y controlar la calidad del vapor del bloque de alimentación del equipo, y la variable temperatura, así como la ejecución automática de todas las fases del proceso de inyección alterna de vapor y el registro de todas las variables involucradas.

El sistema requiere las siguientes funcionalidades:

- La interfaz de usuario debe permitir al operador la monitorización del proceso de inyección alterna de vapor y la ejecución de ciertas acciones sobre el proceso.
- El sistema debe controlar la calidad del vapor generado en el bloque de alimentación del equipo, así como medir y controlar otras variables de interés como las temperaturas en algunas partes del sistema, entre ellas la celda de desplazamiento.
- Este sistema debe ejecutar automáticamente todas las fases de una prueba de inyección alterna de vapor, desde la preparación del vapor de alimentación hasta la fase de remojo, para lo cual debe, además, manejar las bombas de inyección de los diferentes fluidos, entre ellos el agua de inyección usada en el proceso.
- El sistema debe realizar el registro de todas las variables del proceso durante una corrida de inyección alterna de vapor, con el fin de disponer de datos históricos que permitan analizar el comportamiento de las diferentes variables durante las pruebas.

1.4. Justificación de la investigación

Venezuela juega un papel importante a nivel mundial luego de la certificación de la reserva de petróleo pesado y extrapesado más grande del mundo, ubicada en la Faja Petrolífera del Orinoco. Esto ha traído como consecuencia un incremento en la investigación sobre métodos de recuperación mejorada de petróleo pesado y extrapesado con el propósito de maximizar el factor de recobro en los campos de la Faja del Orinoco. Uno de los métodos de recuperación mejorada que se está estudiando actualmente es el método de inyección

alterna de vapor, el cual se está probando junto a algunos aditivos químicos con el objetivo de aumentar el porcentaje de recuperación de crudos pesados y extrapesados y, así, determinar su aplicabilidad en la Faja Petrolífera del Orinoco.

Debido a lo mencionado anteriormente, la industria petrolera nacional juega un papel importante en la determinación de la mejor tecnología a aplicar en los campos de crudos pesados y extrapesados y, por lo tanto, en la construcción del futuro de Venezuela. Para que los investigadores de la industria petrolera puedan cumplir con su objetivo, es preciso que dispongan de los equipos necesarios para realizar las evaluaciones del método de inyección alterna de vapor, con algunos aditivos, con la mayor precisión y de ahí la importancia de desarrollar un sistema de control y adquisición de datos que permita controlar la calidad del vapor y las demás variables involucradas, así como optimizar la ejecución del proceso de inyección, reduciendo las operaciones manuales.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar el sistema de control y adquisición de datos para el proceso de inyección alterna de vapor ejecutado en un equipo a escala de laboratorio.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la recuperación mejorada de petróleo, calidad del vapor, control de procesos, identificación de sistemas y los aspectos de termodinámica que permitan establecer los métodos de estimación y control de la calidad del vapor mediante balance de masa y energía.
- Realizar la modelación del sistema de generación de vapor sobrecalentado de la unidad de inyección alterna de vapor a escala de laboratorio.
- Desarrollar el sistema de control de la calidad del vapor de la unidad de inyección alterna de vapor, así como el sistema de control de la temperatura en diferentes puntos del sistema.

- Desarrollar el sistema de adquisición de datos que registre todas las variables de interés del proceso durante una prueba de inyección de vapor, como son: temperatura, calidad del vapor, presión, presión diferencial, flujo, volumen y los tiempos de duración de algunas fases del proceso.
- Desarrollar la aplicación con interfaz gráfica de usuario que efectúe de forma automática todas las fases de una prueba de inyección de vapor, manejando las bombas y las mantas de calentamiento, y que permita al operador monitorizar el proceso de inyección alterna de vapor y la ejecución de acciones sobre el mismo.
- Integrar los sistemas de control, adquisición de datos y la aplicación con interfaz gráfica de usuario.

1.6. Delimitación y alcance de la investigación

La investigación contempló el diseño y construcción de los sistemas de control de la calidad del vapor y de la temperatura, el diseño y construcción del sistema de adquisición de datos que permite registrar los datos sobre las variables temperatura, presión y presión diferencial en algunas líneas, además de los volúmenes y flujos manejados por las bombas, el diseño y construcción del sistema con interfaz gráfica de usuario que permite monitorizar y ejecutar automáticamente, en secuencia, todas las fases de una prueba de inyección alterna de vapor. Además, se implantó el sistema, se llevó a punto mediante el ajuste de los controladores y se elaboraron el diagrama de tuberías e instrumentación, el diagrama de conexiones y el manual de usuario.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los antecedentes de la investigación y una serie de conceptos teóricos que son necesarios para entender todos los aspectos relacionados con el desarrollo de este trabajo de grado. Se presentan las definiciones de yacimiento y de las propiedades de los medios porosos, se describen las propiedades y clasificación del petróleo y se definen los métodos de recuperación de petróleo y su clasificación. También se describe el método de recuperación por Inyección Alternada de Vapor (IAV) y se presentan conceptos de termodinámica como son entalpía, propiedades termodinámicas del agua y del vapor, transferencia de calor y calidad del vapor húmedo. Finalmente, se presentan conceptos fundamentales de control de procesos, lógica difusa y control difuso, y se describe la técnica de identificación de sistemas.

2.1. Antecedentes de la investigación

En lo que respecta al control de la temperatura del vapor, se han realizado varios trabajos de investigación. En 2000, se hizo un trabajo de implementación de un algoritmo de control predictivo-adaptativo tipo MUSMAR (*multivariable multistep adaptive regulator*) para controlar la temperatura del vapor sobrecalentado generado por una caldera. Se hizo la comparación con un controlador PID en cascada. La variable manipulada fue la apertura de la válvula rociadora de agua. Cuando dicha válvula estaba abierta, disminuía la temperatura del vapor [24].

En 2000, un grupo de investigadores desarrollaron un controlador difuso de temperatura para hornos industriales de refinerías, combinando sistemas de cascada *multivariable feedforward/feedback*. En este trabajo, desarrollaron el modelo del sistema, determinando que los hornos estudiados son sistemas MIMO y que hay interacciones recíprocas entre las diferentes variables de entrada y salida [1].

En 1994, se patentó un sensor de calidad de vapor en el cual se proporciona o retira calor de una muestra de vapor hasta lograr un punto de sobrecalentamiento o subenfriamiento. La cantidad de energía requerida para sobrecalentar o subenfriar el vapor, junto con otras variables como flujo, presión y temperatura, se usa para determinar la calidad del vapor mediante algunas ecuaciones [12].

En 1997, se patentó un método para determinar la calidad del vapor mediante el uso de una aproximación de la correlación matemática desarrollada por James junto con la inyección de una cantidad medida de agua dentro de la línea del flujo de vapor y la medición de la caída de presión a lo largo de una placa orificio existente en la línea, con y sin la inyección del agua medida, así como de la temperatura de la mezcla y del agua. Beer afirma que el control sobre la calidad del vapor es importante para balancear la cantidad de energía inyectada en una formación en particular, con el objetivo de controlar la producción de crudo y la eficiencia del proceso de estimulación. La ventaja del método diseñado está en que no requiere la modificación de las líneas ni la instalación de equipos adicionales [9].

En 2004, se patentó un método y aparato para medir la calidad del vapor basado en principios ópticos, en el cual se hace pasar un rayo a través del vapor y se determina la absorbancia del mismo. Esta absorbancia permite determinar la calidad del vapor [11].

En 2008, un grupo de investigadores patentó un método y aparato para medir la calidad del vapor mediante espectrometría, a partir de la absorbancia de la mezcla vapor-agua, medida al hacer pasar un rayo láser a través de la misma. A partir de la absorbancia determinan el número de moléculas de agua y vapor y, luego, el volumen de cada componente (líquido y vapor) [7].

2.2. Fundamentos teóricos

2.2.1. Yacimiento

Un yacimiento de petróleo se define como un volumen poroso conformado por petróleo, agua y, en muchas ocasiones, gas. Dicho volumen se encuentra dentro de un medio poroso o roca que es de tipo sedimentario de tipo arenisca o caliza. El diámetro del poro de la roca es microscópico, variando desde algunas fracciones de milímetros hasta algunos micrómetros [22].

2.2.2. Propiedades del petróleo

Los petróleos livianos, medianos, pesados y extrapesados, llamados comúnmente crudos, tienen características y propiedades físicas que nos permiten distinguirlos [8]. A continuación se describen las propiedades físicas más importantes.

Color: el crudo es de varios colores. Por transmisión de la luz, los crudos pueden ser de color amarillo pálido, tonos de rojo y marrón hasta llegar a negro. Los crudos pesados y extrapesados son de color negro [8].

Olor: el olor de los crudos es aromático como el de la gasolina y otros derivados. Si el crudo contiene azufre tiene un olor fuerte y hasta repugnante.

Densidad: Los crudos livianos y medianos pesan menos que el agua, mientras que los crudos pesados y extrapesados pesan tanto o más que el agua. La gravedad específica del crudo varía entre 0,75 y 1,1, lo cual equivale a una variación entre 57,2 °API y - 2,9 °API. La densidad del crudo generalmente se expresa en grados API (de la abreviatura de *American Petroleum Institute*) [8].

Viscosidad: la viscosidad es una de las características más importantes del petróleo en los aspectos operacionales de extracción, transporte y refinación. El poise se define como la fuerza requerida en dinas para mover un plano de un centímetro cuadrado de área, sobre otro de igual área situado a un centímetro y con el espacio relleno del líquido en cuestión, para lograr un desplazamiento de un centímetro en un segundo. Una unidad comúnmente

usada es el centipoise, equivalente a 0,01 poise. La viscosidad de los crudos puede variar de 0,2 centipoise hasta más de 1000 centipoise [8].

2.2.3. Clasificación del petróleo

El crudo se clasifica, universalmente, según su gravedad API. Para realizar la clasificación, se mide la densidad o gravedad específica a 60 °F (15,56 °C) [8]. La relación entre la densidad o gravedad específica de un crudo y la gravedad API está dada por la siguiente expresión:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{Gravedad_específica[a_60^{\circ}F]} - 131,5 \quad (2.1)$$

Según la gravedad API el crudo se clasifica como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación del crudo según su gravedad API

Tipo de crudo	°API
Liviano	30 o mayor
Mediano	22 – 29,9
Pesado	10 – 21,9
Extrapesado	10 o menor

Los crudos más atractivos para la industria son los crudos livianos, y esto se debe a que son más fáciles de extraer, transportar y procesar. Sin embargo, la mayoría de las reservas mundiales de petróleo consisten en crudos pesados y extrapesados [21].

Existe otra clasificación del crudo, basada en su composición. Los tipos de crudo según su composición son: nafténicos, parafínicos, aromáticos y sulfurados [21].

2.2.4. Recuperación primaria de crudo

La recuperación primaria se refiere al período durante el cual el petróleo fluye naturalmente hacia los pozos, por efecto del diferencial de presión existente entre el fondo de los pozos y el seno del yacimiento [22].

La duración de la recuperación primaria es variable; ésta termina cuando la presión del yacimiento ha bajado significativamente. Durante este período se adquiere información importante sobre el comportamiento del yacimiento para determinar los métodos de recuperación a usar posteriormente [22].

El porcentaje de recuperación primaria de crudo originalmente en sitio está, generalmente, entre 10 % y 15 %. En algunos casos puede ser muy bajo, de hasta 5 %, en yacimientos sin gas disuelto [22].

2.2.5. Recuperación secundaria de crudo

Los métodos de recuperación secundaria se aplican cuando la presión del yacimiento ha bajado significativamente y consisten en la inyección de fluidos dentro del yacimiento con el objetivo de recuperar el gradiente de presión [22]. La inyección (inundación) de agua es el método de recuperación secundaria más común [8]. En este método, los fluidos se inyectan al yacimiento a través de pozos conocidos como inyectoras y desplazan parte del crudo hacia otros pozos conocidos como productores [22].

2.2.6. Recuperación mejorada de petróleo

La recuperación mejorada de petróleo fue definida por la industria petrolera venezolana en 1998, durante el primer Congreso de Recuperación Mejorada, como sigue: “La recuperación mejorada de petróleo involucra a todos los procesos que incrementen económicamente el recobro de hidrocarburos, mediante la inyección de fluidos y energía al yacimiento” [21].

Los métodos de recuperación mejorada de petróleo se clasifican de la siguiente forma [19]:

2.2.6.1. Métodos de recuperación térmicos

Los métodos de recuperación térmicos consisten en suministrar energía térmica al yacimiento con el objetivo de reducir la viscosidad del crudo y provocar su expansión, facilitando de esta manera su desplazamiento hacia los pozos [19]. Estos métodos de recuperación se aplican necesariamente para la extracción de crudos pesados y extrapesados [22].

Entre los métodos de recuperación térmicos se tienen los siguientes [19]:

- Inyección alterna de vapor
- Inyección continua de vapor
- Combustión en sitio
- Inyección de agua caliente

2.2.6.1.1. Método de recuperación por inyección alterna de vapor

Como se mencionó anteriormente, la inyección alterna de vapor es uno de los métodos de recuperación térmicos. La inyección alterna de vapor se realiza básicamente en tres etapas, las cuales son: inyección de vapor, remojo y producción. Este método se conoce como inyección alterna debido a que las tres etapas mencionadas se efectúan varias veces hasta lograr extraer la mayor cantidad posible de petróleo. A continuación se describen las tres etapas del proceso de inyección alterna de vapor, las cuales constituyen un “ciclo” [6].

Etapas de inyección de vapor

Durante la primera etapa, se inyecta vapor al yacimiento a través de los pozos que luego se usarán para la producción.

Etapas de remojo o impregnación

Durante esta etapa, que puede durar días, se espera que el vapor transfiera su energía al yacimiento en forma de calor.

Etapa de producción

Durante la última etapa, se realiza la producción del petróleo a través de los mismos pozos por donde se efectuó la inyección de vapor.

En la Figura 2.1 se puede apreciar el esquema del proceso de inyección alterna de vapor sobre un pozo.

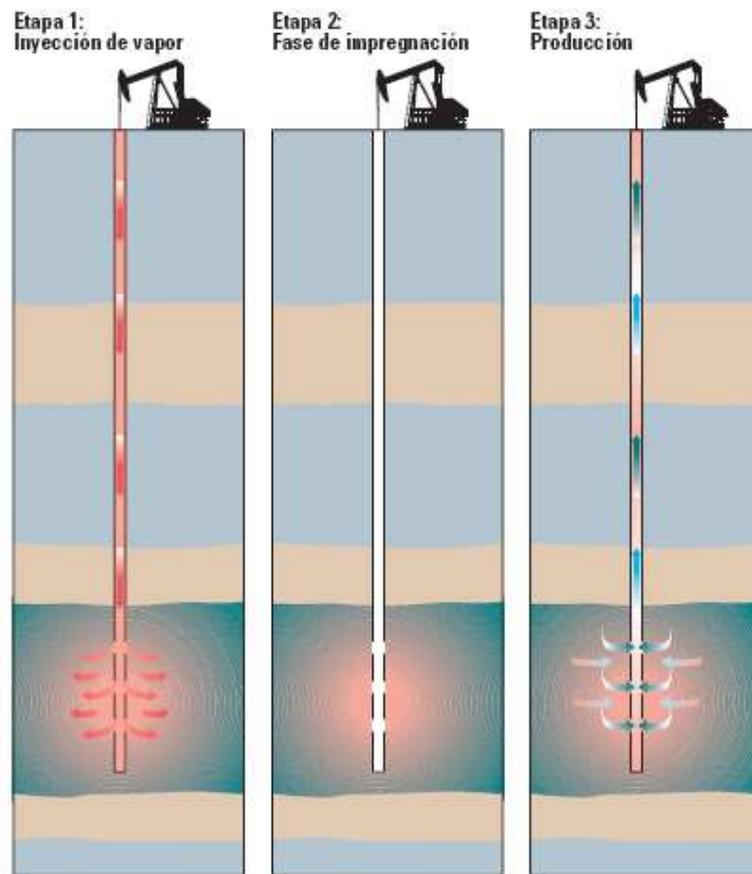


Figura 2. 1. Proceso de inyección alterna de vapor [3]

Al aplicar el método de inyección alterna de vapor la tasa de producción aumentará, pero luego disminuirá hasta alcanzar la tasa de producción original. El número de ciclos de inyección de vapor comercialmente atractivos es, generalmente, tres o menos [4].

2.2.6.2. Métodos de recuperación químicos

Los métodos de recuperación químicos consisten en inyectar químicos al yacimiento con el objetivo de cambiar las propiedades fisicoquímicas del fluido desplazante y desplazado, y, de esta manera, mejorar la relación de movilidad. Los productos químicos inyectados, generalmente, son surfactantes, polímeros y soluciones cáusticas [6].

2.2.6.3. Métodos de recuperación por inyección de fluidos miscibles

Los métodos de recuperación por inyección de fluidos miscibles consisten en la inyección al yacimiento de fluidos con alta solubilidad en el petróleo. Estos fluidos miscibles crean una zona de mezclado con baja tensión interfacial y generan una mayor eficiencia de desplazamiento. Los fluidos generalmente usados en este método de recuperación son hidrocarburos, CO_2 y gases inertes como N_2 [6].

2.2.6.4. Métodos de recuperación por inyección de microorganismos

Los métodos de recuperación por inyección de microorganismos consisten en inyección de bacterias o nutrientes al yacimiento, generando gases, polímeros y surfactantes en sitio [6].

2.2.7. Conceptos de termodinámica

2.2.7.1. Entalpía

La entalpía es una propiedad de una sustancia consistente en la suma de la energía interna, denotada por U , y el producto de la presión, denotada por p , y el volumen de la sustancia, denotado por V [13]. La entalpía se define como la cantidad de energía que posee un sistema termodinámico y que puede intercambiar con su entorno. La entalpía se denota por H , por lo cual se expresa de la siguiente manera:

$$H = U + pV \quad (2.2)$$

Las unidades de la entalpía, H , son BTUs en el sistema inglés y joules en el Sistema Internacional (SI).

2.2.7.2. Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica establece el principio de conservación de la energía en los sistemas termodinámicos: al producirse una transformación de energía, la misma energía total debe estar presente antes y después de la transformación. De esta manera, el principio de conservación de la energía establece que la energía no se puede crear ni destruir, sino que sólo se puede transmitir o transformar. Según la primera ley, todos los tipos de energía deben considerarse y deben balancearse cuando ocurre una transformación de energía [13].

Para aplicar la primera ley de la termodinámica es importante conocer el tipo de sistema termodinámico en estudio. Existen tres tipos de sistemas termodinámicos: cerrado, abierto y aislado. Un sistema cerrado es aquel en el que ninguna masa atraviesa las fronteras del sistema. Un ejemplo de un sistema cerrado es un líquido o vapor dentro de una cámara rígida, sin entradas ni salidas para que fluya dicho líquido o vapor. Un sistema abierto es aquel en el cual la masa sí atraviesa las fronteras del sistema, es decir, es aquel que tiene entradas y salidas a través de las cuales fluyen ciertos fluidos. Un sistema aislado es aquel que permanece completamente aislado de sus alrededores y, por lo tanto, no hay energía cruzando sus fronteras [13].

2.2.7.3. Conceptos importantes en termodinámica

A continuación se presentan algunos conceptos importantes para la realización del balance de energía de sistemas, como son el calor, el trabajo y la energía interna. El calor se define como la energía térmica transferida a través de las fronteras de un sistema debido a la diferencia de temperaturas entre el sistema y sus alrededores. El calor se transfiere de un sistema de mayor temperatura a otro sistema de menor temperatura. El calor se denota como Q .

El principio que relaciona el trabajo (W) y la energía establece que el trabajo realizado sobre un cuerpo por todas las fuerzas es igual a la suma de las energías potencial (E_p) y cinética (E_c). Un sistema termodinámico puede poseer energías cinética y potencial originadas por el movimiento o por la posición del fluido de trabajo o sistema como un todo [13].

La energía interna se refiere a la suma de la energía cinética que poseen las moléculas que conforman al sistema, por su movimiento traslacional, rotacional y vibracional, y la energía potencial debida a las fuerzas intermoleculares. La energía interna del sistema se denota por U y la energía interna por unidad de masa se denota por u [13].

2.2.7.4. Primera ley de la termodinámica para sistemas abiertos

Los sistemas abiertos son aquellos en los cuales hay un flujo de masa a través de las fronteras. En un sistema abierto no sólo se agrega o extrae energía en forma de trabajo o calor, sino que también se agrega o extrae por la masa que fluye, entrando o saliendo del sistema [13].

En un sistema abierto, además de la conservación de la energía, debe tomarse en cuenta la conservación de la masa [13], la cual se expresa de la siguiente, manera:

$$m_i + m_{entr} - m_{sal} = m_f \quad (2.3)$$

donde m_i es la masa inicial dentro del sistema, m_{entr} es la masa entrando al sistema, m_{sal} es la masa saliendo del sistema y m_f es la masa dentro del sistema en el estado final. Cuando se tiene un sistema que opera de forma continua, con entrada y salida continua de un fluido, es necesario expresar la Ecuación (2.3) en forma de tasa de cambio, como se muestra en la Ecuación (2.4) y Ecuación (2.5).

$$\dot{m}_{entr} - \dot{m}_{sal} = \dot{m}_f - \dot{m}_i \quad (2.4)$$

$$\text{ó } \dot{m}_{entr} - \dot{m}_{sal} = \dot{m}_{acum} \quad (2.5)$$

donde \dot{m}_{entr} es la tasa de entrada de masa, \dot{m}_{sal} es la tasa de salida de masa y \dot{m}_{acum} es la tasa de acumulación de masa dentro del sistema.

Para un sistema termodinámico abierto con flujo estacionario, definido como el flujo para el cual no cambian con el tiempo las propiedades del sistema y en las fronteras, la ecuación de balance de energía está dada por la Ecuación (2.6).

$$Q_{entr} - W'_{sal} = H_{sal} - H_{entr} + Ec_{sal} - Ec_{entr} + Ep_{sal} - Ep_{entr} \quad (2.6)$$

donde Q_{entr} es el calor entrante al sistema, W'_{sal} es el trabajo saliente, H_{sal} es la entalpía de la masa saliendo del sistema y H_{entr} es la entalpía de la masa entrando al sistema. La entalpía, H , está dada por la Ecuación (2.2).

Como lo indica la Ecuación (2.2), la entalpía consiste en la suma de la energía interna, U , y el producto de la presión, p , por el volumen de la sustancia, V . La entalpía por unidad de masa se expresa mediante la Ecuación (2.7).

$$h = u + pv \quad (2.7)$$

donde v es el volumen específico y consiste en el volumen que ocupa cada unidad de masa de la sustancia.

2.2.7.5. Propiedades termodinámicas del agua y del vapor

La temperatura de ebullición del agua depende de la presión ejercida sobre la misma. A una presión de 1 atmósfera, la temperatura de ebullición del agua es de 100 °C. Si la presión constante sobre el agua se mantiene por debajo de la presión atmosférica, entonces la temperatura de ebullición del agua estará por debajo de los 100 °C [13].

Como se aprecia en la Figura 2.2, el agua se mantiene en estado líquido hasta que alcanza la temperatura de ebullición en el punto A. Durante el proceso de ebullición del agua coexisten las fases líquida y gaseosa en equilibrio, manteniéndose la temperatura constante. Al suministrar suficiente calor al agua, ésta pasará de líquido saturado puro a la temperatura de ebullición (punto A) a vapor saturado puro a la misma temperatura de ebullición (punto B) [13].

Al calentar más el vapor saturado puro a la temperatura de ebullición (punto B), la temperatura del agua aumenta por encima de la temperatura de saturación, generándose un vapor sobrecalentado; esto se puede observar en la Figura 2.2, a la derecha del punto B. Se llama vapor sobrecalentado al vapor que ha alcanzado una temperatura superior a la temperatura de saturación, también conocida como temperatura de ebullición. En la región sobrecalentada, el volumen específico es solamente función de la temperatura a una presión dada [13].

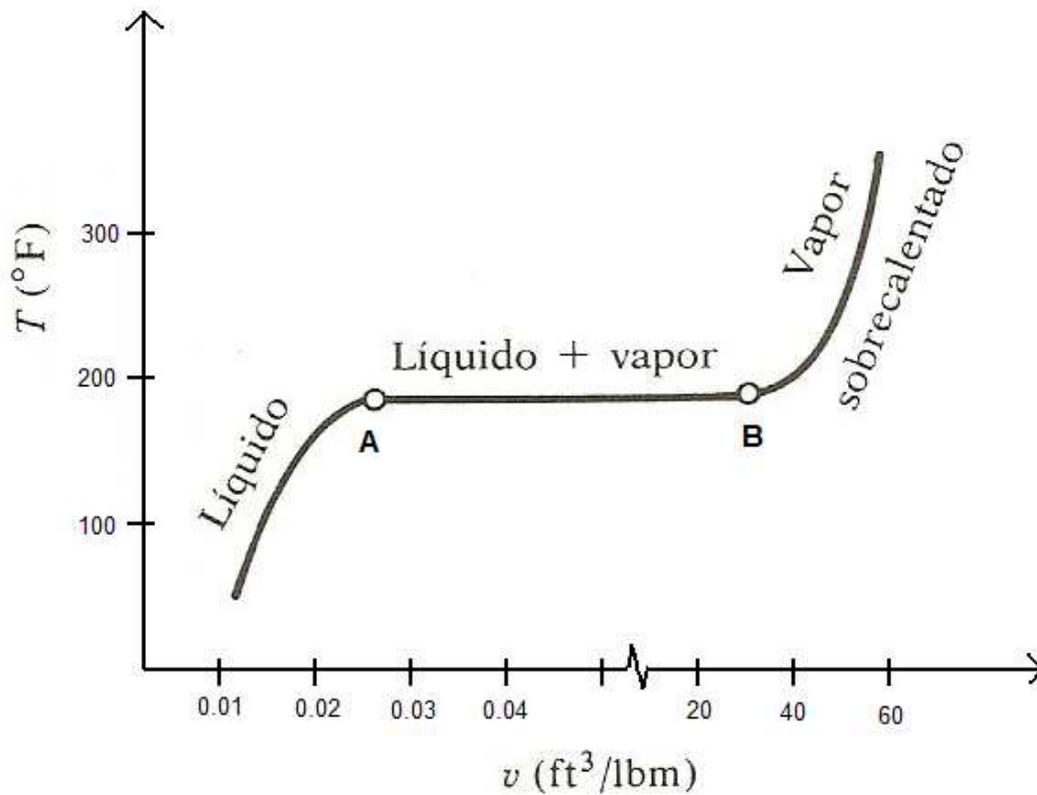


Figura 2. 2. Variación del volumen específico del agua con la temperatura [13]

En la Figura 2.3 se aprecia el cambio en la curva volumen específico – temperatura al variar la presión. Como se puede apreciar, mientras menor es la presión constante a la que se mantiene el agua, menor es la temperatura de ebullición o de saturación. En los puntos A, B y C el agua está en el estado de líquido saturado; en los puntos a, b y c el agua está en el estado de vapor saturado. A la derecha de los puntos a, b y c está la región del vapor sobrecalentado [13].

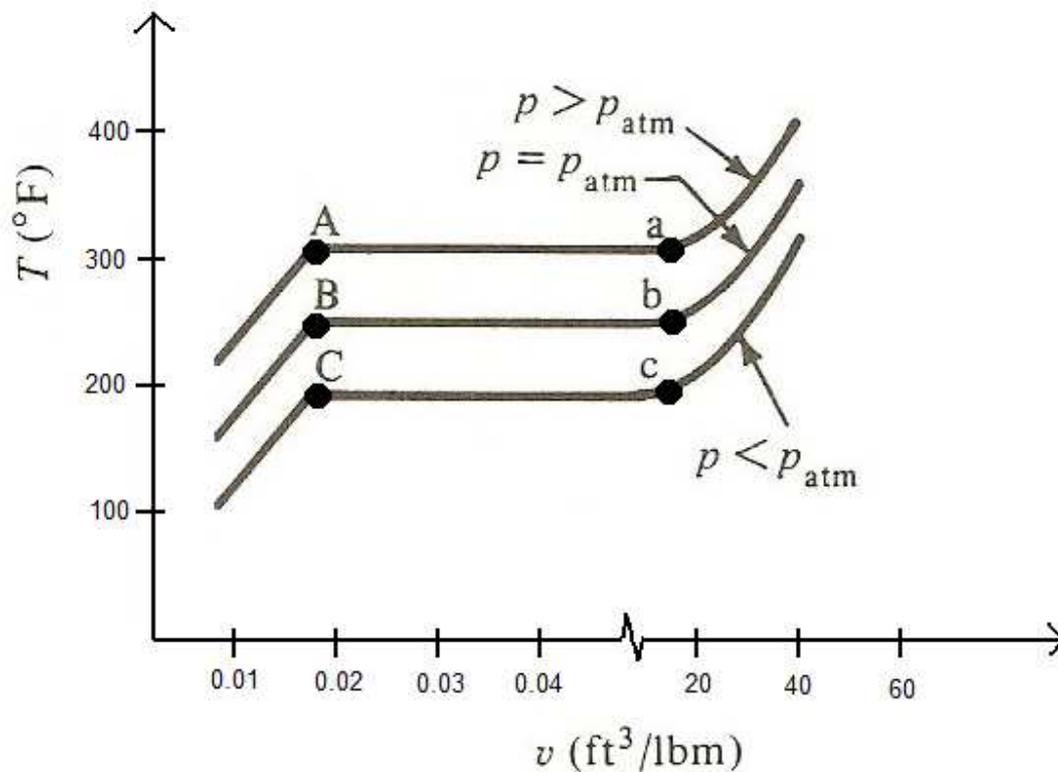


Figura 2. 3. Relación entre la presión y la variación del volumen específico del agua con la temperatura [13]

2.2.7.6. Propiedades independientes

Una sustancia pura es aquella que es homogénea e invariante en composición química. De esta manera, una mezcla de agua líquida y de vapor de agua es considerada una sustancia pura, lo que significa que toda es H_2O [13].

En las regiones del líquido subenfriado o del vapor sobrecalentado, la especificación de la presión y la temperatura permiten determinar todas las otras propiedades de la sustancia, entre éstas el volumen específico, la densidad y la entalpía. De esta manera, la especificación de un par de cualquiera de las variables anteriores, permite determinar del estado en las dos regiones [13].

Lo mencionado anteriormente no aplica completamente en la región de saturación, ya que la presión y la temperatura no son independientes. En la región de saturación los pares de propiedades independientes son: calidad de la mezcla y temperatura, calidad de la mezcla y presión, volumen específico y presión, y volumen específico y temperatura [13]. Cada par

independiente mencionado permite determinar las otras propiedades de la sustancia en la región de saturación; además, la presión o la temperatura, por sí solas, permiten determinar las otras propiedades del vapor saturado puro y del líquido saturado puro.

2.2.7.7. Transferencia de calor y termodinámica

La energía puede existir en varias formas y entre ellas tenemos la energía térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear. La energía térmica se conoce como calor y es la forma de energía que puede transferirse de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura [10].

La termodinámica estudia la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso que lo lleva de un estado de equilibrio a otro [10]. La transferencia de energía siempre se produce de un medio con temperatura mayor hacia otro medio con temperatura menor y dicha transferencia se detiene cuando ambos medios alcanzan la misma temperatura.

La cantidad de calor transferido durante un proceso se denota por Q y su unidad internacional es el joule (J) o el kilojoule (kJ), donde 1 kJ es igual a 1000 J. La cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama velocidad de transferencia de calor y se denota por \dot{Q} , siendo su unidad J/s, lo cual es equivalente a W [10].

Existen tres modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Todos estos modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos estos ocurren de un medio con temperatura mayor hacia uno con temperatura menor.

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de las interacciones entre esas partículas. La conducción puede darse entre sólidos, líquidos o gases [10].

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de

la conducción y el movimiento de fluidos. Mientras el movimiento del fluido es más rápido, mayor es la transferencia de calor por convección [10].

La radiación es el modo de transferencia en el cual la energía se emite por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones). A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto [10].

2.2.7.8. Calidad de la mezcla líquido-vapor o vapor húmedo

A la mezcla de líquido y vapor seco de agua, coexistentes a la temperatura de saturación, se le conoce como vapor húmedo y se caracteriza por su calidad, que es una medida de la cantidad de vapor seco presente en la mezcla. El líquido y el vapor seco pueden estar separados dentro del recipiente, como se muestra en la Figura 2.4-A, o pueden estar entremezclados en la forma de vapor con gotas de líquido, formando una niebla, como se muestra en la Figura 2.4-B [13].

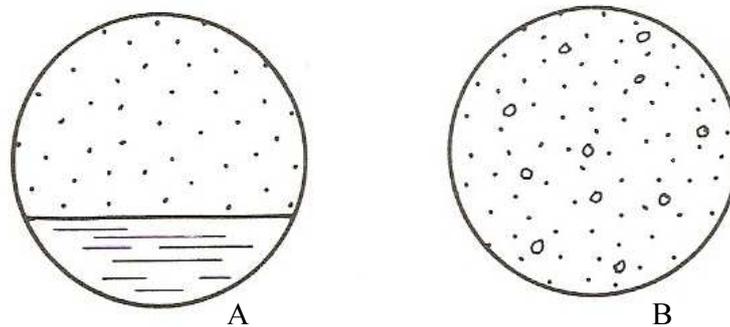


Figura 2. 4. Tipos de mezcla líquido - vapor seco

El volumen específico se define como el volumen de una sustancia por unidad de masa. En una mezcla de líquido-vapor seco o vapor húmedo el volumen específico de la mezcla está dado por la siguiente expresión [13]:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{V_l + V_g}{m_l + m_g} = \frac{m_l v_l + m_g v_g}{m_l + m_g} \quad (2. 8)$$

donde el subíndice l corresponde al líquido saturado y g al vapor saturado o seco. V es el volumen de la mezcla líquido-vapor seco, m es la masa de la mezcla líquido-vapor seco, V_l es el volumen del líquido en la mezcla, V_g es el volumen del vapor en la mezcla, m_l es la masa del líquido en la mezcla, m_g es la masa del vapor en la mezcla, v_l es el volumen específico del líquido y v_g es el volumen específico del vapor.

La calidad del vapor húmedo es la razón de la masa del vapor saturado a la masa total de la mezcla líquido-vapor. Ésta se denota por x y está dada por la Ecuación (2.9) [13]:

$$x = \frac{m_g}{m_l + m_g} \quad (2.9)$$

Cuando sólo se tiene líquido saturado, la calidad de la mezcla es cero (0), mientras que cuando sólo se tiene vapor saturado, la calidad de la mezcla es uno (1). La calidad del vapor húmedo también suele expresarse en porcentaje.

Como se conoce que $1 - x = \frac{m_l}{m_l + m_g}$, entonces se tiene que:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m_l v_l + m_g v_g}{m_l + m_g} = (1 - x)v_l + xv_g \quad (2.10)$$

$$v = v_l + x(v_g - v_l) \quad (2.11)$$

En la zona de saturación también es posible obtener el valor de la entalpía por unidad de masa, h , siguiendo el procedimiento anterior, obteniéndose la Ecuación (2.13).

$$h = \frac{H}{m} = \frac{H_l + H_g}{m_l + m_g} = \frac{m_l h_l + m_g h_g}{m_l + m_g} \quad (2.12)$$

$$h = h_l + x(h_g - h_l) \quad (2.13)$$

2.2.7.9. Aplicación del balance de masa y energía en un punto de mezcla de agua fría y vapor sobrecalentado

Considerando el punto de mezcla de agua fría y vapor sobrecalentado, mostrado en la Figura 2.5, a continuación se realizará el balance de masa y energía.

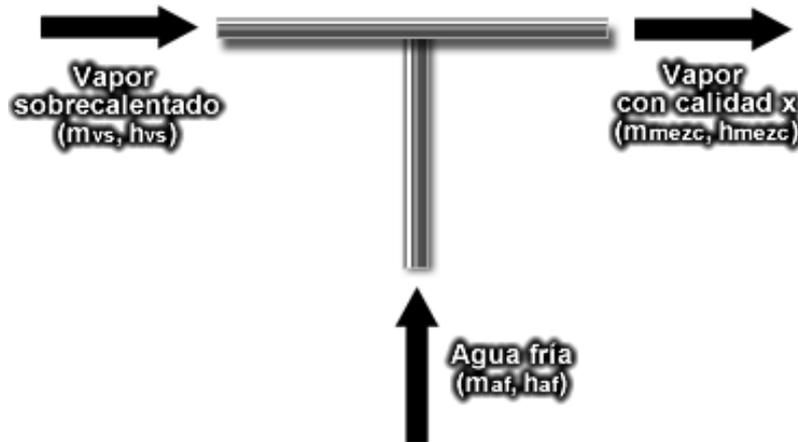


Figura 2. 5. Punto de mezcla de agua fría y vapor sobrecalentado

Debido a que los cambios de energías cinéticas y potenciales entre las entradas y la salida son pequeños respecto a los cambios de entalpía, y no existe trabajo realizado por el punto de mezcla, la ecuación de balance de energía para el sistema termodinámico abierto se reduce a la Ecuación (2.14).

$$Q_{entr} = m_{sal} h_{sal} - m_{entr} h_{entr} \quad (2.14)$$

donde Q_{entr} es el calor transferido del exterior, m_{sal} es la masa saliendo del punto de mezcla, h_{sal} es la entalpía por unidad de masa del fluido que sale del sistema, m_{entr} es la masa entrando al punto de mezcla y h_{entr} es la entalpía por unidad de masa del fluido entrante.

Considerando que el punto de mezcla está bien aislado, de tal manera que no hay transferencia de calor del exterior, se tiene que $Q_{entr} = 0$ y la ecuación de balance de energía queda como la Ecuación (2.15).

$$m_{vs} h_{vs} + m_{af} h_{af} = m_{mez} h_{mez} \quad (2.15)$$

donde m_{vs} es la masa de vapor sobrecalentado, h_{vs} es la entalpía por unidad de masa del vapor sobrecalentado, m_{af} es la masa de agua fría, h_{af} es la entalpía por unidad de masa del agua fría, m_{mez} es la masa de la mezcla líquido-vapor saturado y h_{mez} es la entalpía por unidad de masa de la mezcla líquido-vapor saturado o vapor húmedo.

Al aplicar el balance de masas se obtiene lo siguiente:

$$m_{mez} = m_{vs} + m_{af} \quad (2.16)$$

$$m_{vs} h_{vs} + m_{af} h_{af} = (m_{vs} + m_{af}) h_{mez} \quad (2.17)$$

Por otro lado, la relación entre las entalpías y la calidad de la mezcla líquido-vapor está dada por la Ecuación (2.13), por lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$h_{mez} = h_l + x(h_g - h_l) \quad (2.18)$$

A partir de la Ecuación (2.17) y la Ecuación (2.18) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{m_{af}}{m_{vs}} = \frac{h_{vs} - x(h_g - h_l) - h_l}{h_l + x(h_g - h_l) - h_{af}} \quad (2.19)$$

La Ecuación (2.19) relaciona la calidad del vapor húmedo (x) con la masa del vapor sobrecalentado (m_{vs}) y la masa del agua fría (m_{af}), lo cual resulta de gran utilidad si es de interés obtener una calidad determinada del vapor, pues al variar el flujo másico de alguno de los fluidos de entrada (vapor sobrecalentado o agua fría) puede determinarse el flujo másico del otro fluido necesario para obtener la calidad deseada.

2.2.8. Calidad del vapor usada en la recuperación mejorada de crudo

Un aspecto importante a considerar en los métodos de inyección de vapor para la recuperación de crudo, corresponde al control de la calidad y del flujo de vapor inyectado en el yacimiento, lo cual es útil para predecir la tasa de recuperación de crudo y estimar la eficiencia en el uso de la energía suministrada al yacimiento.

A pesar de que la inyección de vapor seco o sobrecalentado permite la transferencia de una mayor cantidad de calor al yacimiento, los costos operativos y las limitaciones operacionales sólo permiten la inyección de vapor con menores calidades, generalmente iguales o menores a 80 %. La calidad del vapor puede estimarse a la salida del generador de vapor usado, sin embargo, a medida que el vapor fluye a través de largas líneas de flujo hacia el campo, y se divide hacia múltiples líneas de distribución, su calidad varía y a este fenómeno se conoce como división o separación de fases [15].

El vapor saturado es el tipo de vapor más ampliamente utilizado en la recuperación de crudos pesados, aproximadamente en el 98 % de los casos. El campo Duri Field en Indonesia corresponde al más grande del mundo donde se lleva a cabo la producción de crudo pesado mediante la inyección de vapor saturado, produciendo 300 MBPD [23].

2.2.9. Medición de la calidad del vapor húmedo

El vapor que se inyecta en los yacimientos tiene las dos fases consistentes en agua en estado líquido y en estado gaseoso, y esto hace difícil la medición y control tanto de su flujo como de su calidad. Para lograr optimizar el proceso de inyección de vapor, es necesario medir y controlar el flujo de vapor y su calidad [14].

La empresa Chevron ha desarrollado soluciones para medir tanto el flujo de vapor como su calidad. Para el control y medición del flujo de vapor Chevron desarrolló un método consistente en un estrangulador de orificio fijo en flujo crítico y se resuelven un conjunto de ecuaciones para determinar simultáneamente el flujo y la calidad del vapor [14].

Un método también usado para medir la calidad del vapor es el empleo del calorímetro de estrangulación, en el cual se produce una disminución de la presión reduciendo el área de

flujo por medio de una válvula. Si la disminución de la presión es suficiente, entonces el vapor se sobrecalienta a la salida de la válvula. Si no hay pérdida de calor, las entalpías antes y después de la válvula son iguales y puede aplicarse balance de energía para conocer la calidad del vapor antes de la válvula de estrangulación [25].

Otra tecnología desarrollada para la medición de la calidad del vapor consiste en el uso de la fibra óptica como sensor, basado en el principio de modulación de la refractividad. Al hacer pasar la luz a través de una mezcla de líquido y vapor de agua, la intensidad de la luz reflejada está relacionada con el porcentaje de vapor presente en la mezcla [16].

2.2.10. Lógica difusa

El hombre por naturaleza no concibe al mundo desde el punto de vista cuantitativo, sino entiende mejor las características y comportamientos desde un punto de vista cualitativo. Así, la mente humana maneja de mejor forma la información imprecisa que la información exacta expresada con valores numéricos y de aquí surgen las definiciones de las características de los objetos como “grande”, “mediano” y “pequeño”, “caliente” y “frío” entre otras, las cuales no están limitadas entre ellas por una medida exacta, sino son definidas de manera subjetiva [2].

Con el objetivo de manejar información imprecisa, llamada también borrosa o difusa, surgió el concepto del “conjunto difuso” como una extensión de los conjuntos ordinarios, el cual fue introducido por L. Zadeh en un trabajo presentado en 1965 [2].

En la teoría sobre conjuntos difusos, la pertenencia de un elemento determinado a un conjunto es representada por un valor dentro del intervalo $[0,1]$ llamado “grado de pertenencia”; si el elemento no pertenece al conjunto, el grado de pertenencia es cero (0) y si pertenece totalmente a éste, el grado de pertenencia es uno (1). Una variable que sea descrita de manera imprecisa puede ser dividida en conjuntos difusos, donde el cambio de pertenencia de un conjunto a otro es contrario, siendo representada por un crecimiento o decrecimiento del grado de pertenencia en el intervalo $[0,1]$. Un ejemplo de una variable difusa es la variable temperatura, la cual puede dividirse en cuatro conjuntos difusos etiquetados como “frío”, “templado”, “caliente” y “muy caliente”.

En la Figura 2.6 se muestran dos tipos de funciones de pertenencia de conjuntos difusos muy usadas, que son las trapezoidales y las triangulares.

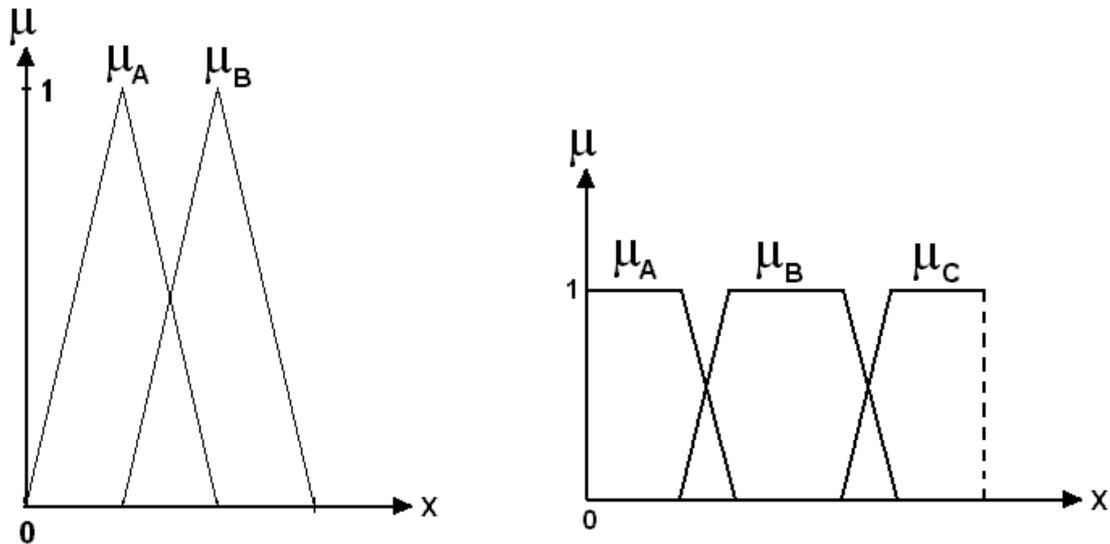


Figura 2. 6. Funciones de pertenencia más usadas para los conjuntos difusos

Debido a la predominancia del manejo de información en ambientes imprecisos o inciertos, surgió la necesidad de construir un marco conceptual que permitiera la representación flexible del conocimiento y este es el motivo del desarrollo de la lógica difusa. La lógica difusa es una técnica de razonamiento aproximado, la cual tiene como concepto central el conjunto difuso y permite hacer un razonamiento explícito con información imprecisa o borrosa [2].

Un modelo lógico - difuso, también llamado “modelo basado en reglas”, “modelo basado en conocimientos” o “modelo difuso”, consta fundamentalmente de una base de conocimientos, conformada por un conjunto de reglas del tipo Si-Entonces con proposiciones imprecisas expresadas en lenguaje natural, y de un mecanismo de inferencia que permite obtener una conclusión a partir de una entrada determinada. Las reglas permiten establecer las relaciones entre las diferentes variables llamadas entradas, para generar ciertas conclusiones [2]. El conocimiento codificado en la base de reglas se deriva de la experiencia y de la intuición humana, además del conocimiento práctico y teórico que se disponga del sistema.

Cada una de las reglas de la base de conocimientos está caracterizada por una parte “Si” llamada el antecedente y una parte “Entonces” llamada el consecuente. El antecedente de una regla contiene un conjunto de condiciones y el consecuente contiene una conclusión. Cada regla opera de la siguiente forma: si las condiciones del antecedente son satisfechas, entonces la conclusión del consecuente es aplicada. Para un modelo difuso las variables incluidas en el antecedente corresponden a las entradas del sistema y las variables incluidas en el consecuente corresponden a las salidas del sistema. Las condiciones contenidas en el antecedente y las conclusiones del consecuente de las reglas consisten en proposiciones de la forma $F \text{ es } X_0$, donde F es una variable y X_0 es un conjunto difuso definido sobre el universo de discurso de la variable F . La relación entre las diferentes variables de entrada y de salida se establece mediante el uso de conectores lógicos de la forma Y, O entre las proposiciones, los cuales comprenderán operaciones lógicas sobre conjuntos difusos en el mecanismo de inferencia [2].

Un mecanismo de razonamiento o inferencia se define como el proceso de obtener un conjunto de valores difusos para las variables de salida de un sistema, a partir de un conjunto de valores difusos de las variables de entrada. Este proceso de inferencia es aplicado sobre la base de conocimientos del sistema difuso, el cual explica el comportamiento del sistema real [2]. El mecanismo de inferencia más usado es el mecanismo tipo Mamdani. La aplicación del algoritmo de inferencia tipo Mamdani (con difusificación) a modelos MISO (*Multiple Input-Single Output*) se ilustra en la Figura 2.7.

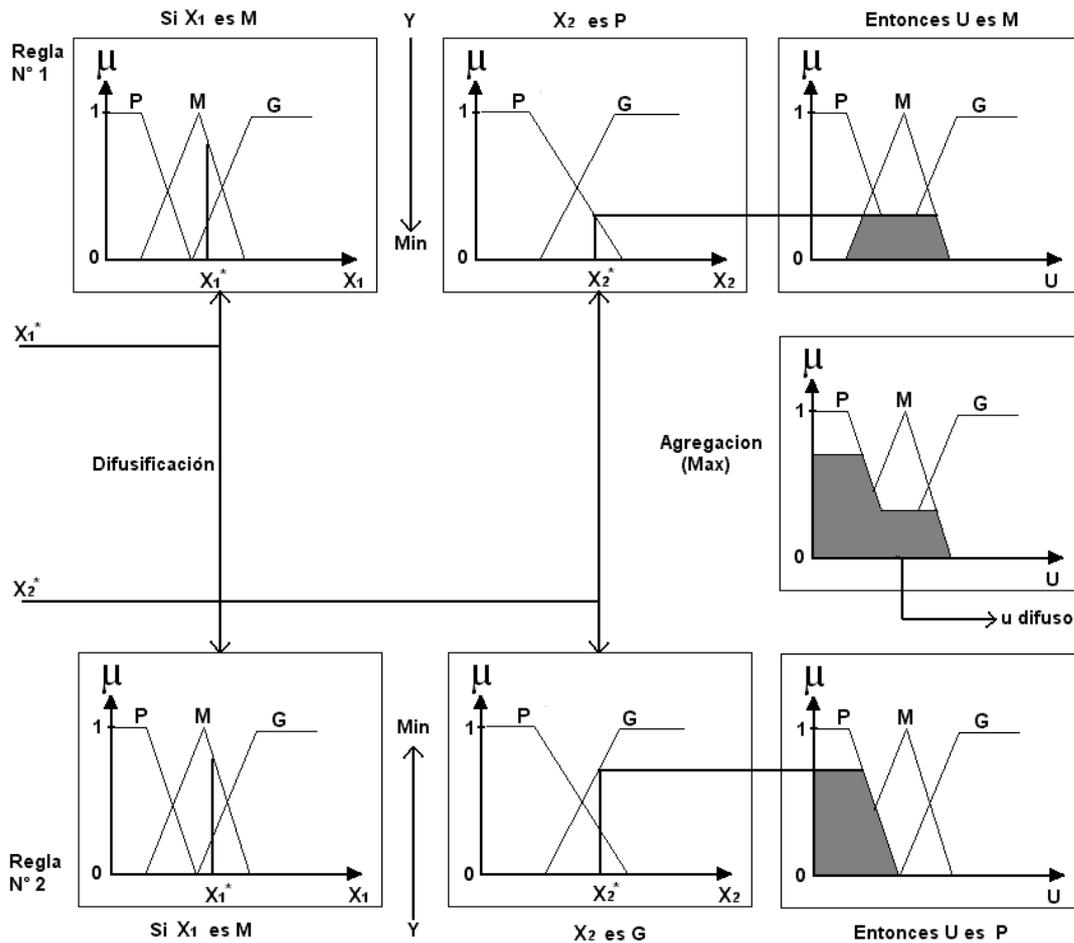


Figura 2. 7. Mecanismo de inferencia tipo Mamdani aplicado a modelos MISO

Generalmente, la salida difusa de un modelo lingüístico no puede usarse directamente en la práctica o en el mundo real, por lo cual es necesario someter a dicha salida difusa a un proceso que permita obtener un valor puntual de la variable de salida; a éste proceso se le llama desdifusificación. En la Figura 2.7 se puede observar la salida difusa U , la cual debe convertirse en un valor puntual u mediante alguna técnica como el promedio ponderado.

2.2.11. Control de procesos y control PID

Un sistema de control básico se muestra en la Figura 2.8. El proceso o planta es el objeto a controlar. La entrada del controlador es el error, $E(s)$, y su salida es el control, $U(s)$. La entrada de la planta es $U(s)$, su salida es $Y(s)$ y la referencia o consigna es $R(s)$.

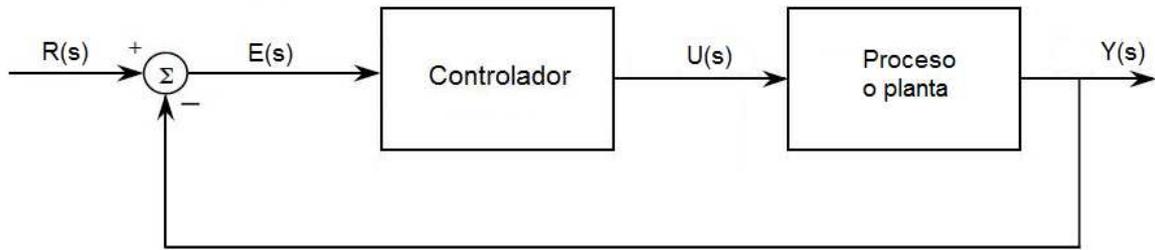


Figura 2. 8. Sistema de control convencional

Un controlador muy usado en la industria es el controlador con acción proporcional, integral y derivativa, conocido como controlador PID. Para un PID, la relación entre la salida del controlador y la señal de error está dada por la siguiente función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.20)$$

El proceso de establecer los parámetros del controlador PID que permitan satisfacer las especificaciones de desempeño deseadas se conoce como sintonización del controlador; esto es obtener los valores de K_p , T_i y T_d [18].

2.2.12. Control difuso

El control difuso provee una metodología formal para representar, manipular e implementar el conocimiento heurístico de un humano sobre cómo controlar un sistema [20]. En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control difuso.

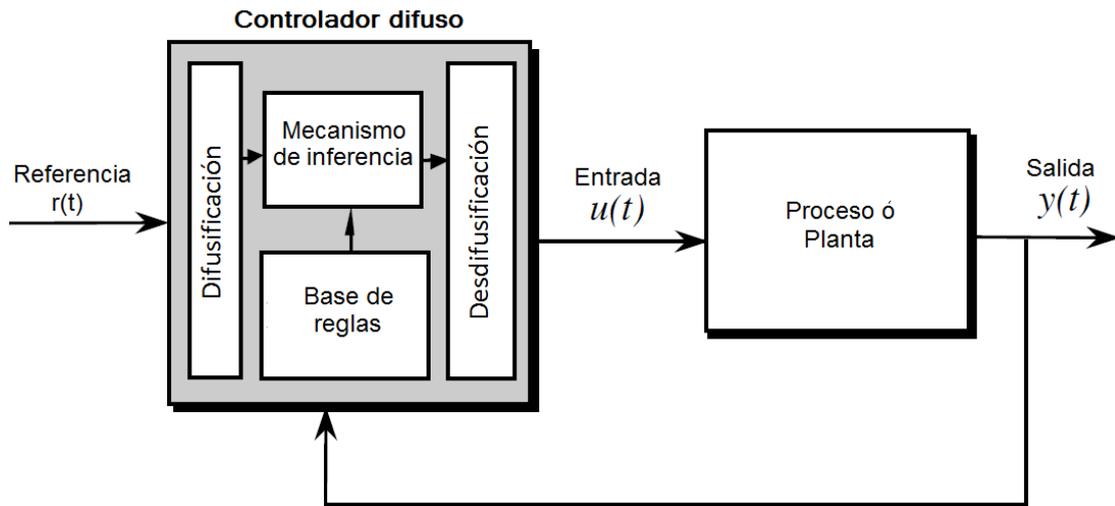


Figura 2. 9. Arquitectura del controlador difuso [20]

El controlador difuso tiene cuatro componentes principales que son los siguientes [20]:

- 1) La base de reglas, la cual contiene el conocimiento, en forma de un conjunto de reglas, sobre cómo controlar el sistema.
- 2) El mecanismo de inferencia, que evalúa cuáles reglas de control son relevantes en el instante actual y luego determina cuál debería ser la entrada difusa de la planta.
- 3) La interfase de difusificación, la cual convierte los valores reales de la referencia en valores difusos que pueden interpretarse y procesarse con la base de reglas.
- 4) La interfase de desdifusificación, que convierte las conclusiones obtenidas por el mecanismo de inferencia, consistentes en valores difusos, en valores reales de entrada a la planta.

2.2.13. Identificación de sistemas

2.2.13.1. Aplicación de la identificación de sistemas

El control de procesos se ha convertido en un área de gran interés en la actualidad debido a las necesidades existentes en la industria. Esto ha hecho necesario el desarrollo de herramientas y técnicas que permiten el análisis de sistemas y el diseño de los sistemas de control.

Conocido el modelo matemático riguroso de un sistema, pueden aplicarse varias técnicas como, por ejemplo, la transformada de Laplace para obtener su función de transferencia y así realizar simulaciones para observar el comportamiento del mismo bajo ciertas condiciones de interés. Además, a partir del modelo matemático es posible diseñar el sistema de control que cumpla con los requerimientos del proceso, al aplicar técnicas conocidas. Sin embargo, para algunos sistemas no es fácil obtener un modelo matemático riguroso, aplicando las leyes físicas y/o químicas. En dichos casos, es posible aplicar alguna técnica de identificación de sistemas, que permiten obtener un modelo matemático aproximado a partir de los datos de entrada y salida del proceso real.

Matlab™ es una herramienta poderosa que ofrece un ToolBox de identificación de sistemas que proporciona grandes ventajas en cuanto al tiempo de estimación de los modelos; además, permite estimar modelos con diferentes estructuras, por lo cual es posible probar con diferentes modelos, variando el orden y otros parámetros. Matlab™ y simulink son herramientas muy poderosas que también permiten simular un sistema a partir de su diagrama de bloques.

2.2.13.2. Diseño del experimento para identificación

En el diseño del experimento para la identificación de un sistema deben tomarse en cuenta cuatro aspectos muy importantes, descritos a continuación.

1- Selección de variables de entrada y salida

El diseño de la identificación incluye varias decisiones, tales como qué señales deben medirse, cuándo deben medirse, qué señales deben manipularse, así como también cómo deben manipularse. Antes de iniciar el proceso de adquisición de datos debe decidirse cuáles señales van a considerarse como salidas y cuáles como entradas. Esto permitirá determinar en qué parte del sistema deben colocarse los sensores para medir las salidas y cuáles señales van a manipularse como entradas para excitar el sistema durante el experimento [17].

Una vez que se ha decidido dónde y qué medir, es necesario definir cada cuánto tiempo se va a medir, y esto se conoce como la determinación del período de muestreo, que frecuentemente es un intervalo de muestreo constante [17].

2- Selección de la forma de la señal de entrada

Otro aspecto que hay que decidir es qué forma debe tener la señal de entrada, pues podrían tenerse como entradas la suma de sinusoides, ruido blanco filtrado, señales pseudo-aleatorias o señales binarias (asumiendo sólo dos valores) [17].

El requerimiento para la identificación de un sistema es que los datos de entrada salida deben ser informativos, y esto significa que la entrada debe ser continuamente excitante, es decir, debe tener un amplio contenido frecuencial (debe contener muchas frecuencias distintas). Para lograr lo anterior, la entrada debe limitarse en amplitud. Señales periódicas podrían tener ciertas ventajas, sin embargo, las señales no periódicas inyectan más excitación dentro del sistema en una ventana de tiempo dada [17].

Las señales de entrada más comunes son: el ruido blanco Gaussiano filtrado, la señal binaria aleatoria, la señal binaria pseudo-aleatoria y la señal senoide de barrido [17]. Dos de estas señales se muestran en la Figura 2.10 y Figura 2.11.

Una simple opción al elegir la entrada es obtener un ruido blanco Gaussiano y luego filtrarlo mediante un filtro lineal. Con esto se podría lograr virtualmente cualquier espectro en la señal de entrada, con la selección apropiada de los filtros [17].

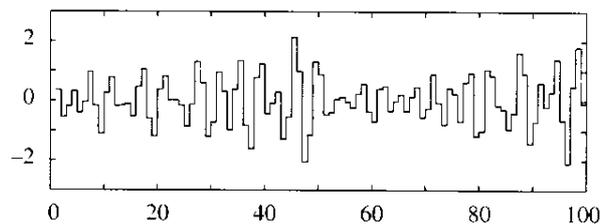


Figura 2. 10. Ruido blanco Gaussiano filtrado

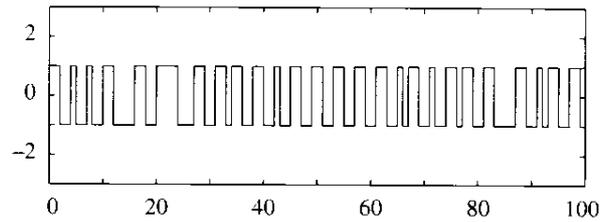


Figura 2. 11. Señal binaria aleatoria

3- Adquisición y mezcla de datos de diferentes experimentos

Para aplicar cualquiera de las técnicas de identificación de sistemas es necesario obtener datos de entrada y salida del sistema real, mediante algún sistema de adquisición de datos. Para lo anterior, pueden realizarse varios experimentos según la disponibilidad del sistema real. Es posible eliminar datos de los experimentos y seleccionar sólo los segmentos de interés. Además, es posible mezclar datos de diferentes experimentos, tomando en consideración que los puntos de conexión de dos grupos de datos no deben generar transitorios irreales, pues éstos pueden introducir errores en el modelo a estimar [17].

4- Identificación en lazo cerrado

Algunas veces es necesario realizar el experimento de identificación sobre sistemas con retroalimentación de la salida, es decir en lazo cerrado, como el mostrado en la Figura 2.12. La razón puede ser que la planta es inestable o que ésta debe controlarse por razones de seguridad o de producción, o que la misma contiene mecanismos de retroalimentación intrínsecos [17].

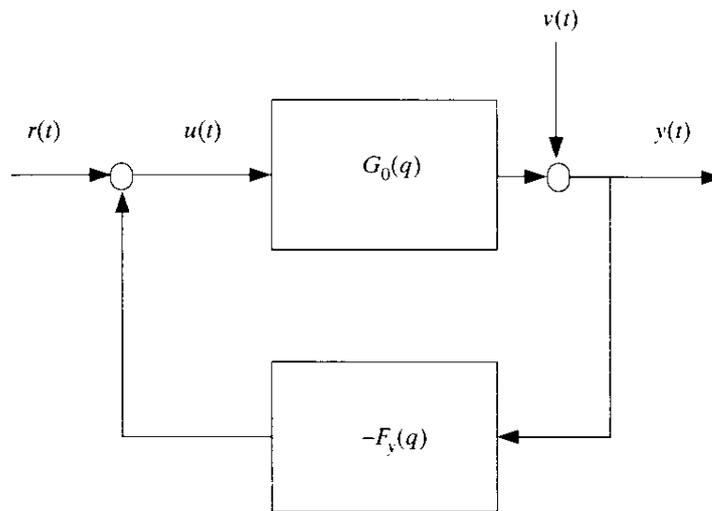


Figura 2. 12. Diagrama de bloques de un sistema retroalimentado típico

Para obtener un buen modelo mediante la identificación es necesario que el experimento en lazo cerrado sea informativo. Un teorema afirma que un experimento de lazo cerrado es informativo si y solo si la señal de referencia r es continuamente excitante [17]. De esta manera, para que el experimento de lazo cerrado sea informativo, debe cumplirse que la señal r posea un amplio contenido frecuencial (debe contener muchas frecuencias distintas).

Debido a lo anterior, para la identificación de un sistema en lazo cerrado, la señal de referencia r debe ser de alguno de los siguientes tipos: ruido blanco Gaussiano filtrado, señal binaria aleatoria, señal binaria pseudo-aleatoria o señal senoide de barrido.

Debido a las no linealidades de los sistemas reales, el experimento debe conducirse alrededor de la situación sobre la cual el modelo se usará. Cuando se sospeche que el sistema real es no lineal y se busca estimar un modelo lineal, entonces se recomienda que el experimento se realice alrededor del punto de operación nominal de la planta [17].

Métodos de identificación en lazo cerrado

Existen diferentes métodos de identificación en lazo cerrado que:

- 1- Asumen que no se conoce el mecanismo de retroalimentación y no usan la señal de referencia r aun si es conocida.

- 2- Asumen que la señal r y el controlador son conocidos y típicamente que son lineales.
- 3- Asumen que el controlador es desconocido y usan la señal r para inferir información acerca de él, y usan el controlador estimado para obtener el modelo del sistema.

Si el controlador es lineal el proceso de identificación es simple para cualquiera de los casos anteriores. A continuación se presentan los tres métodos correspondientes a los tres casos anteriores [17]:

1. Identificación directa: aplica el método de predicción del error básico en una forma directa, usando la salida y del proceso y la señal de control u de la misma forma que para la operación en lazo abierto, ignorando cualquier posible retroalimentación y sin usar la señal de referencia r .

2. Identificación indirecta: identifica el sistema en lazo cerrado desde la entrada de referencia r hasta la salida y , y obtiene a partir de dicho modelo el modelo del sistema en lazo abierto, haciendo uso del controlador conocido.

3. Identificación de entrada-salida conjunta: considera y y u como salidas del sistema excitado por r y el ruido. Obtiene el modelo del sistema y del controlador de este modelo conjunto.

2.2.14. Respuesta transitoria y respuesta en estado estable

La respuesta temporal de un sistema de control se divide en dos partes llamadas respuesta transitoria y respuesta en estado estable. La respuesta transitoria se refiere al comportamiento de la salida que va desde el estado inicial hasta el estado final del sistema. La respuesta en estado estable se refiere al comportamiento de la salida del sistema luego de alcanzar el estado final, en la medida en que el tiempo tiende a infinito [18].

2.2.15. Especificaciones de la respuesta transitoria

Frecuentemente, las características de desempeño deseadas para los sistemas de control se especifican a través algunas cantidades en el dominio del tiempo relativas a la respuesta transitoria para una entrada escalón unitario. Dichas especificaciones de la respuesta transitoria se muestran en la Figura 2.13 y se definen como sigue [18]:

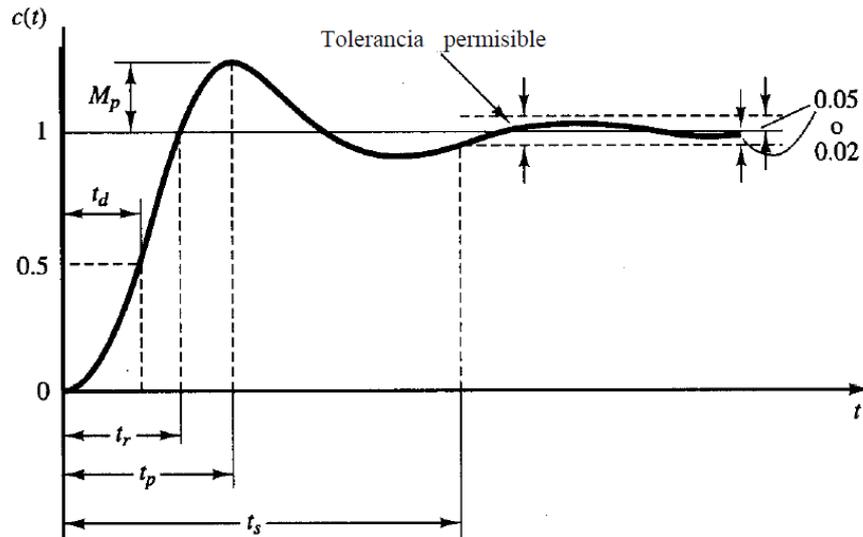


Figura 2. 13. Respuesta transitoria de un sistema y sus especificaciones

- *Tiempo de retardo (t_d)*: es el tiempo que se requiere para que la respuesta del sistema alcance por primera vez la mitad de su valor final.
- *Tiempo de levantamiento (t_r)*: es el tiempo que se requiere para que la respuesta del sistema vaya del 10 % al 90 % (en sistemas sobreamortiguados), del 5 % al 95 % o del 0 % al 100 % (en sistemas subamortiguados) del valor final de la salida.
- *Tiempo pico (t_p)*: es el tiempo que se requiere para que la respuesta del sistema alcance el primer pico.
- *Sobrepaso máximo (M_p)*: es el valor del pico máximo de la respuesta del sistema, medido a partir del valor final de la salida en el estado estable. Éste se expresa en porcentaje.
- *Tiempo de asentamiento (t_s)*: es el tiempo requerido para que la respuesta del sistema alcance un rango con una variación pequeña alrededor del valor final y se mantenga dentro del mismo. El rango se especifica en porcentaje absoluto del valor final y va de 2 % a 5 %.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describen, en forma general, los pasos seguidos para alcanzar el objetivo propuesto, que fue desarrollar el sistema de control y adquisición de datos para el proceso de inyección alterna de vapor llevado a cabo en un equipo a escala de laboratorio, comprendiendo el control de la calidad del vapor y el control de la temperatura en el sistema, así como el desarrollo de una aplicación que efectúa de forma automática todas las fases de una prueba de inyección alterna de vapor. Este trabajo comprendió la investigación y desarrollo de un sistema para solucionar un problema específico del área de recuperación mejorada de petróleo.

3.1. Etapas de la investigación

La ejecución del proyecto se realizó en cinco etapas: diagnóstico, diseño, construcción, implantación y pruebas.

3.1.1. Diagnóstico

El diagnóstico comprendió las siguientes actividades:

- Revisión bibliográfica sobre aspectos de termodinámica relacionados con la calidad del vapor, su estimación, su control y las variables asociadas.
- Revisión bibliográfica sobre las técnicas de control que se pueden aplicar a la calidad del vapor y la temperatura.
- Entrevista con los profesionales y técnicos que manejan la unidad de prueba de levantamiento de crudo mediante la inyección alterna de vapor.
- Revisión de la documentación sobre la unidad de inyección alterna de vapor del laboratorio.

- Determinación de las restricciones y criterios para el diseño del sistema de control y adquisición de datos.

3.1.2. Diseño

En la etapa de diseño se ejecutaron las siguientes actividades:

- Modelación y simulación del sistema de generación de vapor, constituido por el evaporador y un punto de mezcla con agua fría; se validó el modelo mediante la comparación de las respuestas del sistema real y las obtenidas a través de la simulación.
- Identificación de los lazos de control del sistema, que abarcan el control de la calidad del vapor y la temperatura en los puntos del sistema requeridos.
- Determinación de los posibles esquemas de control para los diferentes lazos, basándose en la bibliografía y en experiencias previas.
- Diseño de los algoritmos de control de la calidad del vapor y la temperatura, basados en los esquemas antes seleccionados.
- Evaluación de los distintos esquemas de control diseñados, mediante la simulación a través de la herramienta Matlab™.
- Selección de los esquemas de control más adecuados para las distintas variables.
- Identificación de las variables del proceso a medir y diseño de los algoritmos para la adquisición de los datos.
- Selección de los instrumentos de medición para medir las diferentes variables del proceso, así como los elementos finales de control más adecuados.
- Identificación de las alarmas del proceso que fueron configuradas para garantizar la seguridad de los operadores y del equipo.

- Diseño del sistema de automatización que efectúa todas las fases del proceso de inyección alterna de vapor, con la mínima intervención del operador, desde la adecuación del vapor hasta la fase de remojo.
- Diseño de la interfaz gráfica de usuario que será usada por el operador para la monitorización del proceso.

3.1.3. Construcción

La construcción comprendió las siguientes actividades:

- Codificación de los algoritmos para la adquisición de los datos sobre las diferentes variables del proceso de interés.
- Codificación de los algoritmos de control de la calidad del vapor y la temperatura.
- Codificación de las alarmas del proceso.
- Codificación del sistema de automatización que efectúa todas las fases del proceso de inyección alterna de vapor, desde la adecuación del vapor hasta la fase de remojo.
- Codificación de la interfaz gráfica de usuario.
- Integración de los diferentes módulos del sistema codificados.

3.1.4. Implantación

La implantación consistió en lo siguiente:

- Instalación y/o configuración de los sensores y/o transmisores de temperatura, presión y presión diferencial.
- Instalación de los actuadores necesarios para el control de las diferentes variables del proceso y la ejecución automática de todas las fases del proceso.

- Instalación y configuración de las tarjetas o módulos de adquisición de datos y control.
- Instalación y configuración de la aplicación de control y adquisición de datos.

3.1.5. Pruebas

Las pruebas contemplaron lo siguiente:

- Realización de pruebas de los sensores y transmisores.
- Realización de pruebas del sistema de adquisición de datos para determinar la consistencia de los datos registrados.
- Realización de pruebas de los distintos lazos de control, con los esquemas de control seleccionados.
- Realización de pruebas de activación de las diferentes alarmas.
- Realización de una corrida completa del sistema para verificar la ejecución correcta de todas las fases del proceso.

CAPÍTULO IV

PROPUESTA DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL

En este capítulo se presenta en forma detallada el diseño del sistema de control y adquisición de datos para la unidad de inyección alterna de vapor. Se describe la unidad de inyección alterna de vapor y el proceso que se lleva a cabo en la misma, se presentan las restricciones y criterios del diseño, se identifican las variables del proceso, se presenta la selección de la instrumentación y se identifican los lazos de control. Además, se presenta la arquitectura del sistema desarrollado, la modelación del sistema de generación de vapor, el sistema de control de temperaturas y el sistema de control de la calidad del vapor.

4.1. Descripción general de la unidad de inyección alterna de vapor

El equipo de inyección alterna de vapor está constituido por un conjunto de elementos que pueden agruparse de acuerdo a su función en tres bloques: el bloque de preparación y acondicionamiento de la alimentación, el bloque principal o núcleo del proceso, que está conformado por una celda de desplazamiento, y el bloque de producción y separación. El esquema de la unidad de inyección alterna de vapor se muestra en la Figura 4.1.

Bloque de preparación de la alimentación

El bloque de preparación de la alimentación tiene como función adecuar el vapor a inyectarse en la celda de desplazamiento. Como se aprecia en la Figura 4.1, este bloque está constituido por dos bombas, un evaporador y un punto de mezcla; una de las bombas suministra el agua de inyección a un evaporador, en el cual se sobrecalienta, para luego mezclarse con una corriente de agua fría proveniente de la otra bomba. La mezcla de dichas corrientes constituye el vapor a inyectarse en la celda de desplazamiento y es su calidad la que se controla mediante el sistema desarrollado. Todas las líneas se mantienen a una presión casi constante mediante una válvula de contrapresión que se calibra mediante una línea proveniente de una bombona de nitrógeno.

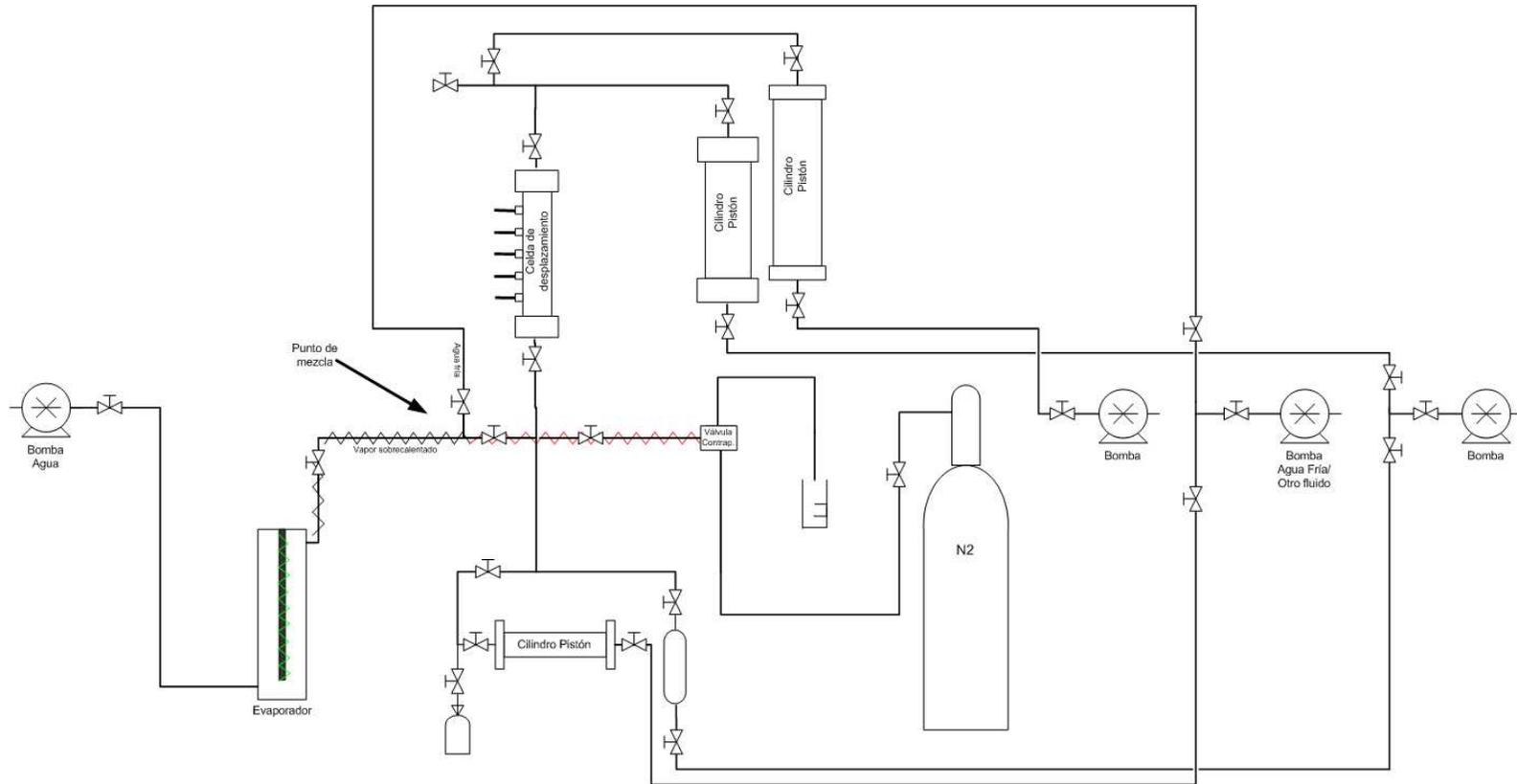


Figura 4. 1. Esquema del equipo de inyección alterna de vapor

Con el objetivo de reducir las pérdidas de calor en las líneas que conducen el vapor sobrecalentado (proveniente del evaporador) y el vapor húmedo (que sale del punto de mezcla), alrededor de éstas están dispuestas mantas térmicas y, en la parte más externa, un material aislante del calor.

Bloque principal o núcleo del proceso

El bloque principal o núcleo del proceso está conformado por una celda de desplazamiento, la cual está conectada a un cilindro pistón que se encarga de mantener la presión en la celda con fluidos del yacimiento (petróleo vivo), mediante la acción de una bomba. Durante la inyección de vapor, en la celda debe medirse el diferencial de presión, que corresponde a la caída de presión en la misma, así como la temperatura en diferentes puntos.

La celda de desplazamiento usada en la unidad de inyección alterna de vapor consiste en un cilindro con dos tapas. Las tapas tienen un orificio por donde circula el fluido; este orificio está protegido por una malla de acero inoxidable que contiene el empaque, impidiendo que los sólidos salgan de la celda. Como se muestra en la Figura 4.2, las celdas tienen 5 orificios equidistantes, en los cuales se instalan termopares para medir las temperaturas internas.



Figura 4. 2. Celda de desplazamiento de la unidad de inyección alterna de vapor

Bloque de producción y separación

El bloque de producción y separación está constituido básicamente por un cilindro pistón y una bomba; en dicho cilindro se almacenan los fluidos producidos (petróleo, gas y agua) para su posterior separación.

4.2. Descripción del proceso de inyección alterna de vapor

El proceso de ejecutado en la unidad de inyección alterna de vapor consta de 6 etapas, descritas a continuación:

4.2.1. Preparación de la celda de desplazamiento

Esta primera etapa consiste en reproducir las condiciones del yacimiento en la celda, mediante la disposición adecuada de arena de formación, crudo pesado o extrapesado y gas.

4.2.2. Preparación del equipo para la prueba de inyección

La segunda etapa consiste en suministrar el agua de formación a las dos bombas que inyectarán el fluido en la celda. También se enciende el horno a temperatura de operación y se calibra y acondiciona la válvula de contrapresión. Además, se verifica que la celda de desplazamiento y el cilindro de contrapresión estén a presión de operación.

4.2.3. Generación del vapor a condiciones de operación

En la tercera etapa se genera el vapor con la calidad requerida para la prueba. Para esto, se fijan los caudales de las corrientes de agua fría y del agua que alimenta al evaporador, y se encienden las dos bombas. Luego, se encienden las mantas de calentamiento a través de los controladores de temperatura, tanto del evaporador como de las líneas que conducen el vapor sobrecalentado y el vapor húmedo.

Una vez que las temperaturas han estabilizado, ya se tienen el vapor con la calidad requerida para ser inyectado en la celda.

4.2.4. Inyección del vapor

La cuarta etapa consiste en hacer pasar el vapor a través de la celda de desplazamiento, para lo cual se ajustan las válvulas correspondientes. Durante esta etapa se encienden dos mantas térmicas dispuestas alrededor de la celda para reducir las pérdidas de calor. Durante la inyección del vapor, se miden y registran las temperaturas en el interior de la celda y la presión diferencial en la misma.

4.2.5. Remojo

Esta etapa consiste en esperar un tiempo determinado para que el calor del vapor se propague en toda la celda, calentando el petróleo. Durante la etapa de remojo se apagan todas las mantas térmicas, a excepción de las mantas alrededor de la celda, las cuales podrían permanecer encendidas si se requiere.

4.2.6. Producción

La última etapa consiste en la producción del petróleo, para lo cual se abre la válvula inferior de la celda de tal manera que los fluidos producidos se almacenan en un cilindro a la misma presión inicial de operación. Luego de realizar la producción se determina el porcentaje de recuperación de crudo.

4.3. Restricciones y criterios para el diseño del sistema de control y adquisición de datos

Una vez concluida la fase de diagnóstico, a partir de la información obtenida se determinaron las pautas para el diseño y la construcción del sistema de control y adquisición de datos. Las pautas seguidas fueron las siguientes:

- El sistema debe incluir sistema de seguridad para gestión de alarmas de forma automática en caso de ausencia del operador.
- La temperatura máxima permitida debe ser de 500 °C para evitar daños en las mantas térmicas.
- La presión máxima permitida en las líneas del sistema debe ser de 2 000 psig.
- El sistema debe disponer de interfaz gráfica amigable para el operador con indicadores de alarma tanto visuales como auditivos.
- La estructura de construcción del software debe ser modular, con facilidad para agregar nuevas funcionalidades a futuro.
- El sistema debe requerir la mínima intervención del operador.

4.4. Identificación de las variables del proceso

En la Tabla 4.1 se muestra la lista de las variables del proceso a medir y/o controlar.

Tabla 4.1. Variables del proceso a medir y controlar

Variable	Variable medida	Variable controlada
Temperatura interna del evaporador	✓	✓
Temperatura externa del evaporador	✓	
Temperatura a la salida del evaporador	✓	
Temperatura en línea de vapor sobrecalentado	✓	✓
Temperatura en línea de agua fría	✓	
Temperatura en línea de la mezcla líquido-vapor saturado	✓	✓
Temperaturas en 5 puntos del interior de la celda	✓	
Temperaturas en 2 puntos del exterior de la celda	✓	✓
Temperatura a la salida de la celda	✓	
Presión en la bomba de inyección de agua al evaporador	✓	
Presión en la bomba de inyección de agua fresca	✓	
Presión en la bomba de regulación de presión en la celda	✓	
Flujo volumétrico de agua inyectado al evaporador	✓	
Flujo volumétrico de agua fresca	✓	
Flujo volumétrico de la bomba de regulación de presión en la celda	✓	
Volumen de agua en la bomba de inyección al evaporador	✓	
Volumen de agua fresca en la bomba de inyección al punto de mezcla	✓	
Volumen de agua en la bomba de regulación de presión en la celda	✓	
Presión diferencial en la celda (entre su entrada y su salida)	✓	
Calidad del vapor		✓

4.5. Selección de la instrumentación

4.5.1. Instrumentos de medición de temperatura

La selección e instalación de los instrumentos de medición de temperatura se hizo según lo establecido en las normas técnicas internas de la empresa.

La selección de los instrumentos de medición de temperatura en el evaporador, la línea de vapor sobrecalentado, la línea de la mezcla líquido-vapor saturado y la celda de desplazamiento, se realizó de la siguiente manera:

1- Se definieron las opciones de medición y se seleccionó la más adecuada para la aplicación según el criterio descrito a continuación: en el caso de líneas de procesos a alta temperatura se recomienda el uso de termopares o RTDs; por prácticas locales, se seleccionó el termopar como elemento de medición de temperatura en todos los puntos de la unidad de inyección alterna de vapor.

2- Se seleccionó la precisión y rango de los instrumentos que cumplieran con los requerimientos del proceso. En el caso de la unidad de inyección alterna de vapor, el error permitido de los instrumentos de medición de temperatura es de 2 %, la temperatura mínima de operación es de 20 °C, la temperatura normal de operación es de 300 °C y la temperatura máxima de operación de 500 °C.

Según las normas técnicas, el rango seleccionado debe ser tal que la condición normal de operación esté aproximadamente a media escala y que la máxima temperatura de operación del proceso no exceda el 80 % del rango del instrumento indicador. Además, el instrumento debe tener un rango de sobre protección 50 % mayor que la máxima temperatura de operación sin sufrir ningún daño. Para cumplir con lo anterior, el rango del termopar debe ser aproximadamente de 20 °C a 750 °C.

3- Se seleccionó el tipo de termopar que cumple con el rango determinado anteriormente y con las condiciones ambientales del proceso. Para el rango de 20 °C a 750 °C, existen varios tipos de termopares, sin embargo, siguiendo las normas técnicas y tomando en consideración que los fluidos manejados son oxidantes (vapor de agua a alta temperatura y

agua en estado líquido) y corrosivos (sales disueltas), así como los costos, entonces es posible usar un termopar tipo K (-40 °C a 1200 °C) o uno tipo E (-40 °C a 900 °C). Finalmente, se seleccionó el termopar tipo K, con rango de -40 °C a 1200 °C, debido a que es el tipo más lineal y podría presentar menos errores al calcular las temperaturas en el módulo de adquisición del sistema de control, el cual hace una linealización de los termopares.

El termopar tipo K está compuesto por una aleación de níquel (aproximadamente 90 %) y cromo, llamada Chromel, y otra aleación de níquel (aproximadamente 95%), aluminio, silicio y manganeso, llamada Alumel. Debido a la alta presencia de níquel, este termopar es resistente a la oxidación.

El termopar tipo K seleccionado es clase 2 y cumple con la norma IEC 584-1, que establece una tolerancia para la temperatura de $\pm 0,75 \%$ ó $\pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (el mayor de los dos valores). Dado lo anterior, en la temperatura normal de operación de 300 °C, el error máximo con el termopar tipo K será de 2,5 °C, el cual cumple con el requerido por el proceso (máximo 2 %). El termopar tipo K cumple con el estándar ITS-90, que establece cuál debe ser la relación entre las temperaturas y los voltajes termoeléctricos de salida de los termopares.

En el caso de la línea de agua fría, dado que el termopar tipo K cumple con los requerimientos del proceso, incluyendo el rango y la precisión, se usó este mismo tipo de termopar.

Características e instalación de los termopares

Debido a que las señales de los termopares son señales de bajo nivel, éstos en algunos casos deben ser aterrados y protegidos con el tipo de cable adecuado para prevenir la interferencia del ruido con la señal. Los termopares usados se seleccionaron aterrados según las prácticas locales, sin embargo, no fue necesario usar cable trenzado o blindado, pues no se presentó interferencia de ruido. El esquema de aterramiento de los termopares se muestra en el apéndice B.

Los termopares deben colocarse en termopozos en contacto directo con el fluido a medir y no en el exterior de las tuberías para lograr una medición precisa. En este caso no se usaron

termopozos debido a las limitaciones del diámetro de las tuberías, sin embargo, los termopares están protegidos por un material resistente. Cumpliendo con las normas técnicas, los termopares tienen un aislamiento de óxido de magnesio y un protector externo de metal resistente a la corrosión y a la oxidación.

Los termopares usados para la generación de alarmas en el sistema de seguridad están separados de los termopares usados para control y monitorización, cumpliendo con lo establecido en las normas técnicas.

Transmisores de temperatura

En el caso de la unidad de inyección alterna de vapor no fue necesario el uso de transmisores de temperatura, pues la distancia entre los elementos de medición (termopares) y el sistema de control central es corta.

Módulo de adquisición de temperaturas

El dispositivo de control usado dispone de un módulo para adquisición de temperaturas, con varias entradas para termopares. Este módulo también realiza la compensación de la junta fría usando un termistor integrado en el bloque de conexiones. Un microcontrolador integrado compensa y linealiza las lecturas de los termopares, obteniendo la temperatura equivalente al voltaje leído según el estándar ITS-90 (estándar también cumplido por los termopares), para luego manejarse desde el sistema de adquisición de datos y control.

4.5.2. Instrumento de medición de presión diferencial

La selección e instalación del instrumento de medición de presión diferencial se hizo según lo establecido en las normas técnicas internas de la empresa.

La selección del instrumento se realizó de la siguiente manera:

1- Se definieron las opciones de medición y se seleccionó la más adecuada para la aplicación, según el siguiente criterio: en el caso de líneas de procesos a altas temperaturas, según las prácticas locales se recomienda el uso de transductores con diafragma de acero inoxidable.

El transductor de presión diferencial usado está conformado por un diafragma de acero inoxidable fijo entre dos bloques de acero inoxidable, con una cavidad a cada lado del diafragma. En cada bloque está integrada una bobina. Una diferencia de presión aplicada entre las dos entradas desplaza el diafragma hacia un lado o hacia el otro. El valor de la inductancia de cada bobina varía con la deflexión del diafragma, aumentando una de ellas y disminuyendo la otra. Este transductor posee un circuito que genera como salida un voltaje DC que se lleva a un transmisor para su filtrado y amplificación.

La señal de salida del transmisor de presión diferencial, en el rango de - 10 VDC a 10 VDC, se digitaliza a través de un módulo del controlador industrial usado, y luego se obtiene la presión equivalente mediante una ecuación que comprende los parámetros de calibración.

El rango del transductor de presión diferencial se determina por el tipo de diafragma usado; existe una gran variedad de diafragmas para diferentes rangos.

2- Se seleccionó la precisión y rango del instrumento que cumpliera con los requerimientos del proceso. En el caso de la unidad de inyección alterna de vapor, el error permitido del instrumento es de 5 %.

La unidad de inyección alterna de vapor requiere de un instrumento para la medición de la presión diferencial en la celda durante la etapa de inyección. Las condiciones de operación de la celda son las siguientes: presión diferencial mínima de operación de 0 psig, presión diferencial normal de operación de 30 psig y presión diferencial máxima de 200 psig.

Según las normas técnicas, el rango seleccionado debe ser tal que la condición normal de operación esté aproximadamente a media escala y que la máxima presión de operación del proceso no exceda el 80 % del rango del instrumento indicador. Además, el instrumento debe tener un rango de sobre protección de 1,2 veces la máxima presión a la cual él podría ser expuesto. Para cumplir con los requerimientos mencionados, el rango del instrumento de presión diferencial debe ser aproximadamente de 0 psig a 250 psig.

3- Se seleccionó el tipo de diafragma que cumple con el rango determinado anteriormente y con las condiciones ambientales del proceso. El rango del diafragma usado en la celda es de 0 psig a 320 psig y el instrumento fue calibrado de 0 psig a 250 psig, ajustando el cero y el span mediante las perillas del transmisor, de tal manera que -10 VDC equivalen a -250 psig, 0 VDC equivalen a 0 psig y 10 VDC equivalen a 250 psig. Con esta calibración se cumple que la máxima presión diferencial (200 psig) no excede el 80 % del rango del instrumento indicador que está integrado al transmisor (0 psig a 250 psig).

Los transductores y los diafragmas son de acero inoxidable, el cual es un material resistente a la corrosión que soporta las condiciones ambientales del proceso.

El error máximo cometido por el instrumento es de 3 % a escala completa, lo cual indica que el error máximo para la presión diferencial de operación normal de 30 psig es menor que 0,9 psig, siendo éste aceptable para el proceso.

Transmisores de presión diferencial

El instrumento de medición de presión diferencial dispone de un transmisor que recibe la señal del transductor y genera una señal de salida en el rango de -10 VDC a 10 VDC, proporcional a la presión diferencial.

Módulo de adquisición de la señal del transmisor

El dispositivo de control usado dispone de un módulo para adquisición de entradas analógicas, el cual adquiere la señal de voltaje generada por el transmisor y la digitaliza. La señal digital de voltaje se procesa en el dispositivo de control para obtener la presión diferencial equivalente, haciendo uso de los parámetros de calibración.

4.5.3. Bombas

El tipo de bomba seleccionado porque permite inyectar flujos pequeños con precisión es una llamada bomba de jeringa, la cual es una bomba de desplazamiento positivo. Este tipo de bomba tiene un cilindro con capacidad de 102,93 ml y puede dispensar flujos desde 0,01 μ l/min hasta 50 ml/min, con un error máximo de 0,3 %. Estas bombas constan de un

circuito integrado que permite dispensar el fluido con gran precisión sin necesidad de rotámetros externos y poseen un controlador que permite el manejo y gestión del modo de operación requerido; los modos de operación de las bombas son los siguientes: bomba a flujo constante y bomba a presión constante.

Las bombas usadas constan de pistones, cilindros y cierres fabricados con acero inoxidable Nitronic 50, resistente a la corrosión.

4.5.4. Instrumentos de medición de presión manométrica

La selección de los instrumentos para la medición de la presión en las líneas del sistema se realizó de la siguiente manera:

1- Se seleccionó el material del transductor según las características del agua de inyección. Debido a que el agua de inyección es agua característica de las calderas de inyección en campo, y consiste en agua con sales disueltas, es necesario que los transductores de presión usados sean de acero inoxidable.

2- Se seleccionó la precisión y rango del instrumento según los requerimientos del proceso. En el caso de la unidad de inyección alterna de vapor, el error máximo permitido en la medición de la presión es de 2 %. Las condiciones de operación de las líneas del sistema son las siguientes: presión mínima de operación de 0 psig, presión normal de operación de 1 100 psig y presión máxima de 2 000 psig.

Según las normas técnicas, el rango seleccionado debe ser tal que la condición normal de operación esté aproximadamente a media escala y que la máxima presión de operación del proceso no exceda el 80 % del rango del instrumento indicador. Además, el instrumento debe tener un rango de sobre protección de 1,2 veces la máxima presión a la cual él podría ser expuesto. Para cumplir con los requerimientos antes mencionados, el rango del instrumento de presión debe ser aproximadamente de 0 psig a 2 400 psig.

3- Se seleccionó el instrumento que satisface los requerimientos en cuanto a rango y características del fluido. Dado que las bombas que proveen el agua de inyección disponen

de instrumentos de medición de presión integrados que cumplen con los requerimientos anteriores, éstos se usaron en el sistema. El rango de los instrumentos de medición presión de las bombas es de 0 psig a 10 000 psig. El elemento primario de medición de presión de las bombas consiste en un diafragma de acero inoxidable Nitronic 50, resistente a la corrosión que puede producir el agua de inyección.

El error máximo cometido por el instrumento de medición de presión de las bombas es de 0,5 % a escala completa, el cual es menor que el error aceptable para el proceso de 2 %.

El uso de los instrumentos de medición de presión de las bombas se justifica debido a que, luego de hacer algunas pruebas con manómetros instalados en las diferentes líneas, se verificó que las presiones indicadas por las bombas son muy aproximadas a las indicadas por los manómetros, con un error máximo de 2 % que es aceptable para el proceso.

El sistema desarrollado lee las presiones de las bombas directamente del módulo controlador de las mismas, mediante una comunicación serial y el uso de una dll (biblioteca de enlace dinámico).

4.5.5. Instrumentos de medición de flujo volumétrico

Dado que las bombas usadas para la inyección ya tienen incluidos instrumentos de medición de flujo, estos mismos instrumentos se usaron para la adquisición de los datos requeridos por el sistema. Los instrumentos de medición de flujo volumétrico integrados en las bombas tienen un rango de 0,01 $\mu\text{l}/\text{min}$ a 50 ml/min , el cual cumple con los requerimientos del sistema, pues los flujos a manejar normalmente están entre 0,1 ml/min y 10 ml/min . El error máximo cometido por estos instrumentos es de 0,3 %, satisfaciendo lo requerido por el proceso, que es un error máximo de 5 % en la medición.

Los flujos de agua inyectados por las bombas se leen directamente del módulo controlador de éstas, mediante una comunicación serial y el uso de una DLL; esto fue posible debido a que las bombas tienen integrados los transmisores de flujo.

4.5.6. Elementos finales de control de temperatura

Los elementos seleccionados para proporcionar calor a las líneas del sistema son mantas térmicas, y consisten en resistencias que se disponen alrededor de las tuberías, en contacto directo con las mismas para garantizar la transferencia de calor. Las mantas térmicas usadas trabajan con una tensión de 120 VAC; sus características se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Especificaciones de las mantas térmicas

Ubicación de la manta	Valor resistencia	Voltaje máximo	Corriente máxima	Potencia eficaz
Evaporador (interna)	38 Ω	120 V	3,2 A	189 W
Evaporador (externa)	19 Ω	120 V	6,3 A	379 W
Línea de vapor sobrecalentado	23 Ω	120 V	5,2 A	313 W
Línea de mezcla líquido-vapor saturado	30 Ω	120 V	4 A	240 W
Parte inferior/externa de la celda	16 Ω	120 V	7,5 A	450 W
Parte superior/externa de la celda	16 Ω	120 V	7,5 A	450 W

Para controlar el calor proporcionado por las mantas se usaron relés de estado sólido que controlan la entrega de la tensión de alimentación de 120 VAC a las mismas. Se usaron relés de estado sólido en vez de relés electromecánicos debido a que los contactos del relé son usados continuamente durante el control de las temperaturas y esto ocasionaría un desgaste de los contactos mecánicos. Además, los relés de estado sólido permiten una velocidad de conmutación bastante superior a la de los relés electromecánicos.

Dadas las características de las mantas, se seleccionó un relé de estado sólido con un contacto de salida que soporta hasta 240 VAC y 25 A; el tiempo de conmutación de este relé es de 5 ms para abrir y 5 ms para cerrar. Este relé de estado sólido se activa o enciende con una entrada de control DC en un rango de 3 VDC a 32 VDC.

4.5.7. Controlador industrial y módulos de entrada/salida

El controlador industrial que se usó dispone de un módulo de red que permite la conexión de hasta nueve módulos I/O (entrada/salida), mediante un bus de datos de alta velocidad. El

módulo de red permite la comunicación del controlador industrial con un PC, mediante un puerto RS-232.

Los módulos I/O que se usaron para adquirir los datos del proceso y ejercer las acciones de control son los siguientes:

- Dos módulos de entradas de termopares para recolectar los datos sobre la variable temperatura en los diferentes puntos de medición del proceso. Cada uno de estos módulos dispone de 8 canales de entrada de termopares.
- Un módulo de entradas analógicas para recolectar los datos sobre la variable presión diferencial. Este módulo dispone de 8 canales de entrada de voltaje DC con 16 bits de resolución.
- Un módulo de salidas analógicas para enviar la señal de control de temperatura a los relés. Este módulo dispone de 8 canales de salida de señales DC con una resolución de 12 bits.

4.6. Identificación de lazos de control

En la Tabla 4.3 se presenta la información sobre los lazos de control existentes en el sistema.

Tabla 4.3. Lazos de control de la unidad de inyección alterna de vapor

Lazo de control	Variable controlada	VARIABLES MEDIDAS	VARIABLES MANIPULADAS
Control de temperatura en el evaporador	Temperatura interna del evaporador	Temperatura interna del evaporador	Energía eléctrica entregada a las mantas del evaporador
Control de temperatura en la línea de vapor sobrecalentado	Temperatura en línea de vapor sobrecalentado	Temperatura en línea de vapor sobrecalentado	Energía eléctrica entregada a la manta alrededor de la línea de vapor sobrecalentado
Control de temperatura en la línea de mezcla líquido-vapor saturado	Temperatura en línea de mezcla líquido-vapor saturado	Temperatura en línea de mezcla líquido-vapor saturado	Energía eléctrica entregada a la manta alrededor de la línea de la mezcla líquido-vapor saturado
Control de la temperatura en la parte inferior/externa de la celda	Temperatura en la parte inferior/externa de la celda	Temperatura en la parte inferior/externa de la celda	Energía eléctrica entregada a la manta alrededor de la parte inferior de la celda
Control de la temperatura en la parte superior/externa de la celda	Temperatura en la parte superior/externa de la celda	Temperatura en la parte superior/externa de la celda	Energía eléctrica entregada a la manta alrededor de la parte superior de la celda
Control de la calidad del vapor	Calidad del vapor	Temperaturas y presiones del vapor sobrecalentado y del agua fresca, flujo volumétrico de agua entrando al evaporador, presiones y temperaturas en las bombas	Consigna del controlador de la temperatura de la mezcla líquido-vapor saturado, flujo volumétrico del agua fresca

4.7. Arquitectura del sistema de adquisición de datos y control

La arquitectura del sistema desarrollado se muestra en la Figura 4.3. Como puede apreciarse, toda la información sobre el proceso se centraliza en un computador con interfaz gráfica que permite al operador monitorizar el proceso y ejercer acciones de control sobre el mismo; este computador también realiza el registro de las diferentes variables del proceso y de los datos de configuración en archivos de texto plano.

El manejo de las bombas se realiza a través de un controlador dedicado, al cual se conectan tres bombas mediante comunicación serial. La comunicación entre la estación del operador y el controlador de las bombas también se hace mediante comunicación serial, enviando los comandos a través de una DLL, tanto para solicitar información como para iniciar o detener su operación y modificar su configuración.

Para realizar el control de las diferentes variables del proceso y la adquisición de los datos, se dispone de un controlador industrial con módulos de entradas y salidas digitales y analógicas. Este controlador recolecta los datos sobre las variables presión diferencial y temperatura, a través de la lectura de las salidas de los instrumentos de medición correspondientes; además, envía las señales de control a los elementos finales de control, que en este caso consisten en relés que encienden y/o apagan las mantas térmicas.

Como se aprecia en la Figura 4.3, los termopares se conectan directamente al módulo de adquisición de temperaturas del controlador, mientras que en el transductor de presión diferencial es conectado a un transmisor y éste último al módulo de entradas analógicas del controlador industrial.

El calor entregado por las mantas térmicas al sistema se controla mediante el uso de relés de estado sólido que entregan o suprimen la tensión de 120 VAC a dichas mantas, según la señal de control proveniente del controlador. Para lo anterior, se dispone de un arreglo de relés, existiendo uno para cada manta del sistema. Cada relé se conecta independientemente a un canal del módulo de salidas analógicas del controlador para su manejo mediante una señal de voltaje DC.

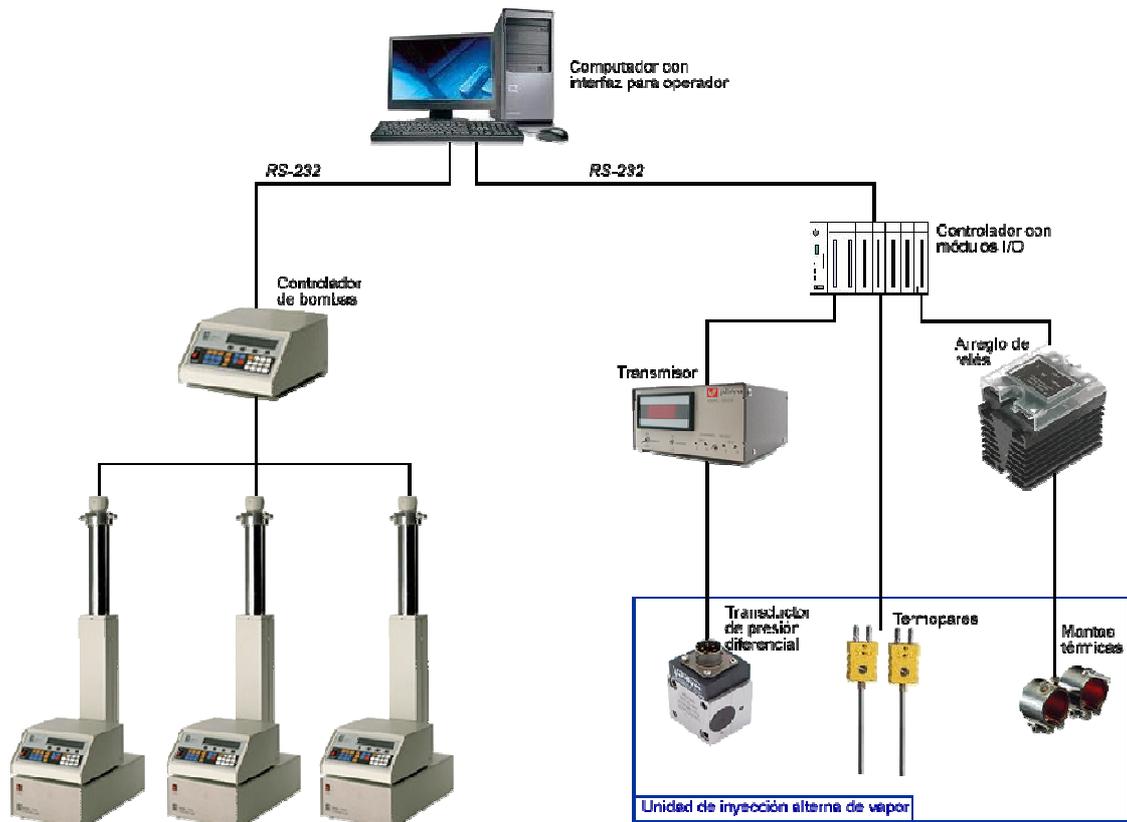


Figura 4. 3. Arquitectura del sistema de control y adquisición de datos

4.8. Sistema de unidades

En la medida de lo posible se usaron las unidades del Sistema Internacional de Unidades (SI), sin embargo, algunas magnitudes se expresaron usando otros sistemas de unidades debido a las prácticas tradicionales de la industria petrolera nacional. No obstante, para efectuar operaciones matemáticas con diferentes magnitudes se efectuó la conversión de unidades al SI.

4.9. Modelación del sistema de generación de vapor sobrecalentado

Como se mencionó anteriormente, la unidad de inyección alterna de vapor cuenta con un evaporador que se usa para preparar el vapor húmedo a inyectarse en la celda. Este

evaporador requiere de un sistema de control de temperatura, por lo cual es de gran utilidad obtener un modelo matemático que permita realizar el diseño del controlador.

A continuación se aplica la técnica de identificación de sistemas mediante Matlab™ al evaporador eléctrico de la unidad de inyección alterna de vapor, conformado por dos resistencias. Se presenta en detalle el procedimiento seguido para obtener un modelo del evaporador, considerando como entrada el porcentaje de ancho de un tren de pulsos y como salida la temperatura interna del evaporador.

El objetivo de la modelación del sistema de generación de vapor sobrecalentado es disponer de un modelo matemático que permita aplicar técnicas conocidas para el diseño del sistema control de temperatura, así como realizar simulaciones para observar su comportamiento.

4.9.1. Descripción del sistema modelado

El sistema modelado es el sistema de generación de vapor sobrecalentado de la unidad de inyección alterna, mostrado en la Figura 4.4.

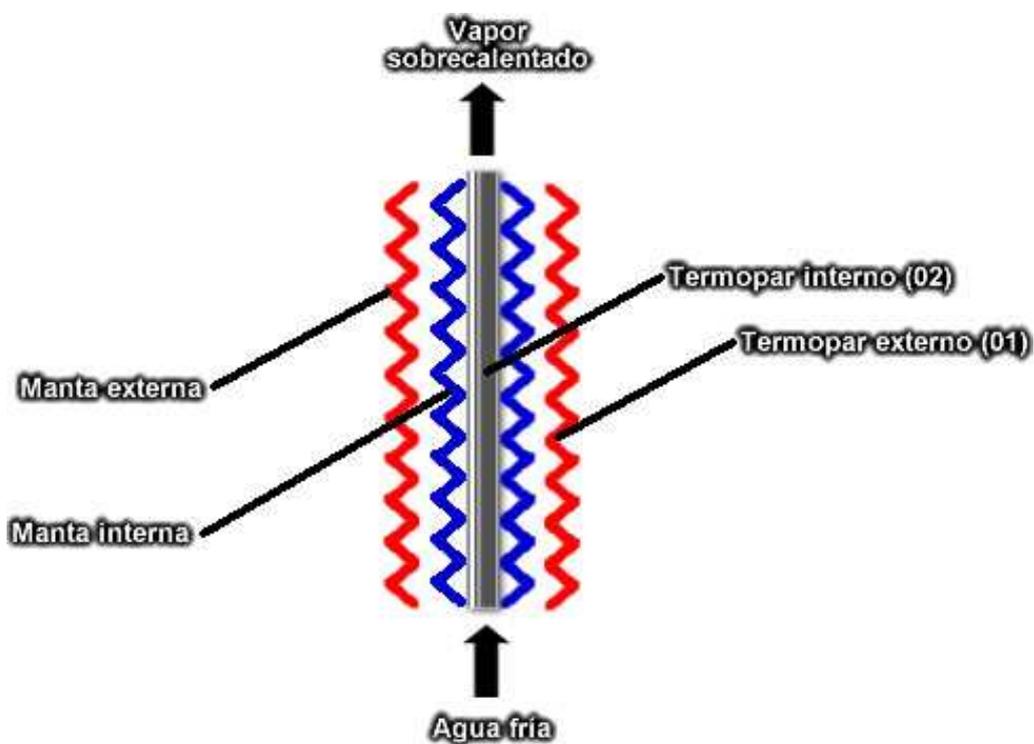


Figura 4. 4. Esquema del sistema de generación de vapor sobrecalentado

El evaporador consiste en una tubería de diámetro pequeño, a través de la cual fluye el agua a evaporar; alrededor de dicha tubería está dispuesta una resistencia eléctrica o manta térmica. Además de la resistencia anterior, existe una resistencia eléctrica externa, dispuesta alrededor de la primera, que tiene como función incrementar la transferencia de calor hacia la tubería interna y, de esta forma, hacia el agua, para obtener el vapor sobrecalentado requerido.

Para controlar la temperatura en el interior del evaporador, es necesario manipular la energía eléctrica entregada a las dos resistencias, también llamadas mantas térmicas. Estas dos resistencias trabajan con una tensión de 120 VAC.

La energía eléctrica entregada a las resistencias del evaporador se manipula mediante dos relés que reciben un tren de pulsos que determina en tiempo de apagado y encendido de las mismas; las resistencias están conectadas a dos relés independientes, pero reciben el mismo tren de pulsos. La temperatura de las mantas es controlada mediante la variación del ancho de los pulsos.

Debido a lo anterior, se obtuvo un modelo matemático para el sistema que estima la temperatura en el interior del evaporador (TE-02) debida a las dos resistencias del mismo. Para el modelo estimado, la entrada es el porcentaje de ancho de los pulsos entregados a las dos resistencias del evaporador y la salida es la temperatura en el interior del evaporador (TE-02).

4.9.2. Experimentos realizados

Para el sistema a modelar, se identificó como señal de entrada el porcentaje de ancho de los pulsos entregados a las resistencias y como señal de salida la temperatura en el interior del evaporador (TE-02).

Inicialmente, se intentó adquirir los datos del sistema en lazo abierto, sin embargo, fue imposible obtener la respuesta adecuada debido a que la dinámica del sistema es muy lenta y el sistema se ve afectado por muchas perturbaciones tales como pérdidas de calor, a pesar de usar el aislante de fibra de vidrio. Por lo anterior, se tomó la decisión de efectuar la

identificación del sistema en lazo cerrado, implantando un controlador proporcional con una constante K_p igual a 5.

Para manipular la energía eléctrica entregada a las resistencias se usaron dos relés de estado sólido, los cuales mediante una señal de 12 VDC, permiten entregar o suprimir la tensión de 120 VAC a las resistencias. De esta manera, es posible controlar la temperatura disipada por las resistencias mediante una modulación de ancho de pulso, que permite entregar la energía eléctrica adecuada. Así, la tensión de 120 VAC será entregada a las resistencias en algunos instantes de tiempo y con una duración determinados por un tren de pulsos adecuado para lograr la temperatura deseada.

El ancho de pulso máximo seleccionado es de 2 s y el sistema de control se diseñó de tal manera que su salida sea un porcentaje de dicho ancho máximo, que represente el ancho del pulso requerido en cada instante de tiempo. Así, si la salida del sistema de control es de 0 %, entonces no se entrega energía a las resistencias, pero si la salida es de 50 %, entonces durante 1 s se entrega energía a las resistencias y durante el siguiente segundo se suprime la energía de las mismas; esta alternancia se efectúa continuamente.

Para efectuar la adquisición de datos se instalaron dos sensores de temperatura en el evaporador, consistentes en termopares; uno fue colocado en el interior (TE-02), en contacto directo con el vapor, y el otro en el exterior (TE-01), en contacto directo con la resistencia externa.

En el experimento efectuado, con el sistema en lazo cerrado, se usó como entrada de referencia, r , una señal similar a un ruido blanco Gaussiano filtrado con media igual a 300 °C, como se muestra en la Figura 4.5.

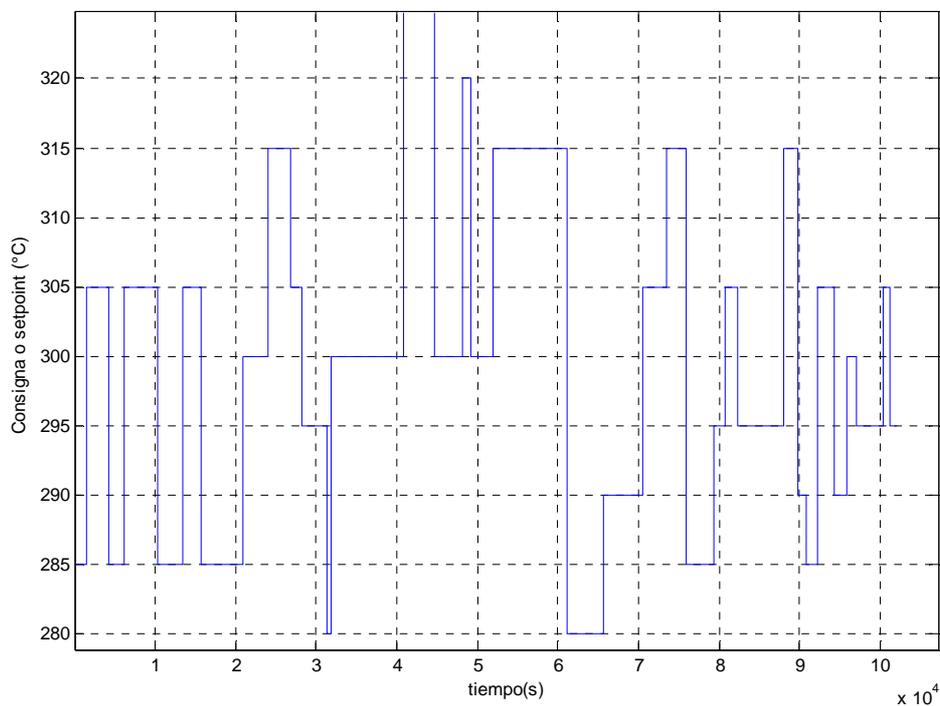


Figura 4. 5. Señal de referencia usada para la identificación del evaporador

Por el tipo de experimento efectuado en lazo cerrado, donde se conoce la señal de referencia y el controlador, se usó el método de identificación indirecta, obteniéndose la función de transferencia en lazo cerrado y luego, a partir de ésta, la función de transferencia en lazo abierto.

Debido a que el modelo debe ser lo más aproximado posible al sistema real en operación normal, se inyectó agua al evaporador a una razón de 4 ml/min y se mantuvo la presión en el sistema en 1100 psig, que son los parámetros normales.

Considerando que los modelos a obtener mediante Matlab™ son lineales, se llevó el sistema alrededor del punto de operación normal, en 300 °C, y se procedió a variar la referencia alrededor de dicha temperatura, en un pequeño porcentaje. Esto es con el objetivo de obtener una aproximación lineal en un rango pequeño de variación de la salida del sistema.

4.9.3. Adquisición de datos

Para obtener la información sobre el sistema en lazo cerrado se efectuó la adquisición de los datos sobre las temperaturas en los puntos de medición TE-01 y TE-02, la presión en el sistema, las señales de control y la señal de referencia r . Para lo anterior se usó un período de muestreo de 2 segundos. Los datos adquiridos fueron almacenados en un archivo de texto plano.

Los datos de entradas y salida requeridos para la identificación se adquirieron mediante varios experimentos realizados sobre el sistema real, alrededor del punto de operación de interés, que es de 300 °C. Para concatenar los datos de diferentes experimentos se realizó la unión de éstos en puntos correspondientes a la misma consigna o setpoint; esto fue con el objetivo de evitar transitorios erróneos. Los datos de entrada y salida adquiridos en los diferentes experimentos se muestran en la Figura 4.6. En la Figura 4.7 se muestra un acercamiento de la Figura 4.6 para observar mayor detalle.

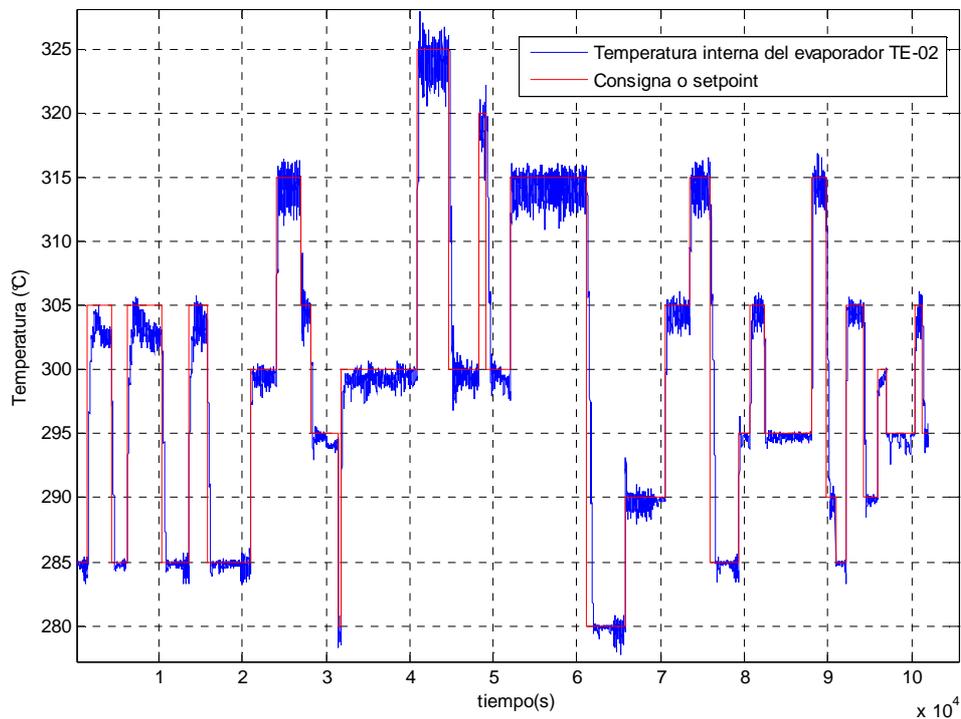


Figura 4. 6. Datos de entrada y salida del evaporador

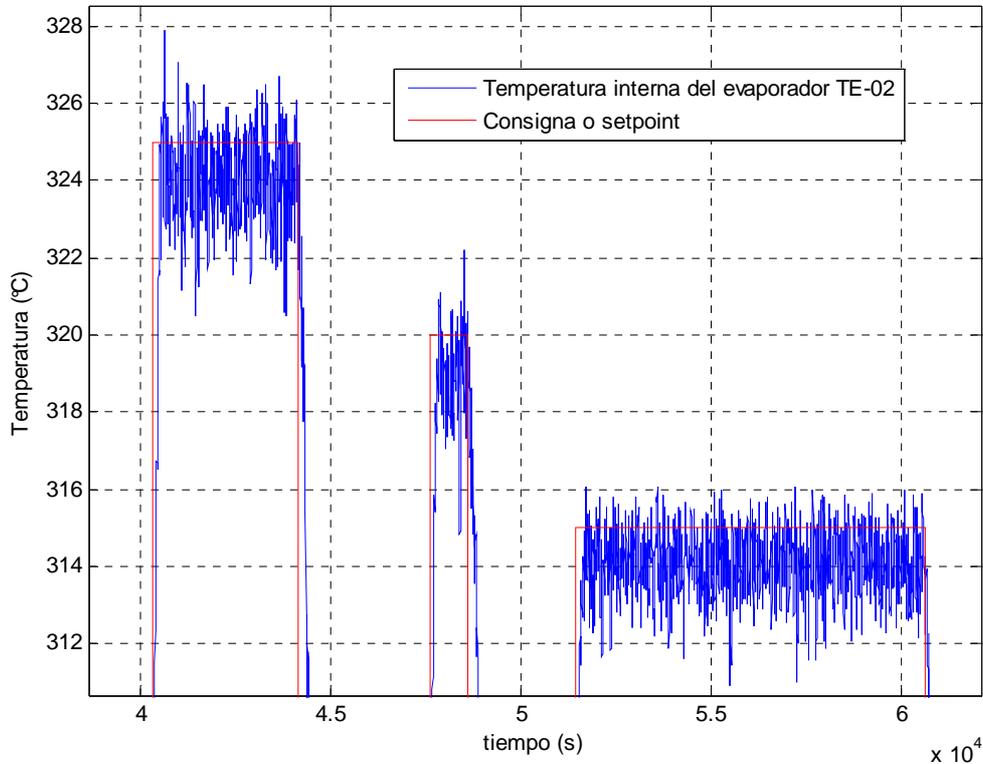


Figura 4. 7. Datos de entrada y salida del evaporador (zoom)

4.9.4. Preprocesamiento de los datos mediante filtro FIR pasa-bajas

Los datos de salida del sistema, correspondientes a la temperatura en el punto de medición TE-02 y adquiridos en lazo cerrado, mostraron un gran nivel de ruido al graficarse en función del tiempo. Por lo anterior, y para garantizar una buena estimación del modelo mediante identificación, se realizó un preprocesamiento de los datos mediante un filtro digital FIR pasa-bajas. Se usó un filtro FIR porque éste siempre es estable y tiene fase lineal, es decir, no presenta distorsión de fase y por tanto proporciona un retraso constante de grupo [5].

La decisión de usar un filtro pasa-bajas FIR respondió a la necesidad de conservar la correspondencia entre los datos de entrada y salida, pues el filtro se aplicó solo a los datos de salida. Esto porque si hay una distorsión en la fase de la señal de salida puede producirse

un error en el modelo al existir un retraso variable entre los datos de entrada y salida. Al existir un retraso constante, es posible hacer la corrección mediante un adelanto constante de todos los datos de salida hasta hacerlos corresponder con los datos de entrada, conservando el retraso real correspondiente, si existe.

El filtro FIR pasa-bajas usado se diseñó e implementó mediante la herramienta Matlab™. Se usó la función *firpmord* para estimar el orden del filtro FIR pasa-bajas que cumpliera con las siguientes especificaciones:

Borde pasa-banda de 3 dB en $f_p=0,01$ Hz

Borde supresor de banda de 40 dB en $f_s=0,02$ Hz

Frecuencia de muestreo de $S = 0,5$ Hz

Las especificaciones anteriores se obtuvieron luego de probar con varios filtros y observar la respuesta obtenida, seleccionando este filtro como el mejor por la atenuación del ruido lograda. El orden del filtro diseñado es 54.

La construcción del filtro pasa-bajas se hizo mediante la función *fir1* y, luego, se usó la función *filter* para hacer el filtrado de los datos con el filtro construido.

Los coeficientes del numerador del filtro FIR pasa-bajas diseñado son los siguientes:

```
Num= [-0,0003 -0,0001 0,0000 0,0002 0,0005 0,0009 0,0016 0,0024 0,0035  
0,0048 0,0064 0,0084 0,0106 0,0131 0,0158 0,0187 0,0217 0,0249 0,0281  
0,0312 0,0341 0,0369 0,0394 0,0415 0,0432 0,0445 0,0453 0,0455 0,0453  
0,0445 0,0432 0,0415 0,0394 0,0369 0,0341 0,0312 0,0281 0,0249 0,0217  
0,0187 0,0158 0,0131 0,0106 0,0084 0,0064 0,0048 0,0035 0,0024 0,0016  
0,0009 0,0005 0,0002 0,0000 -0,0001 -0,0003]
```

El filtro FIR diseñado tiene fase lineal. Por ser un filtro FIR, todos los polos se encuentran en $z=0$. Los espectros de magnitud y de fase del filtro FIR pasa-bajas diseñado se muestran en la Figura 4.8.

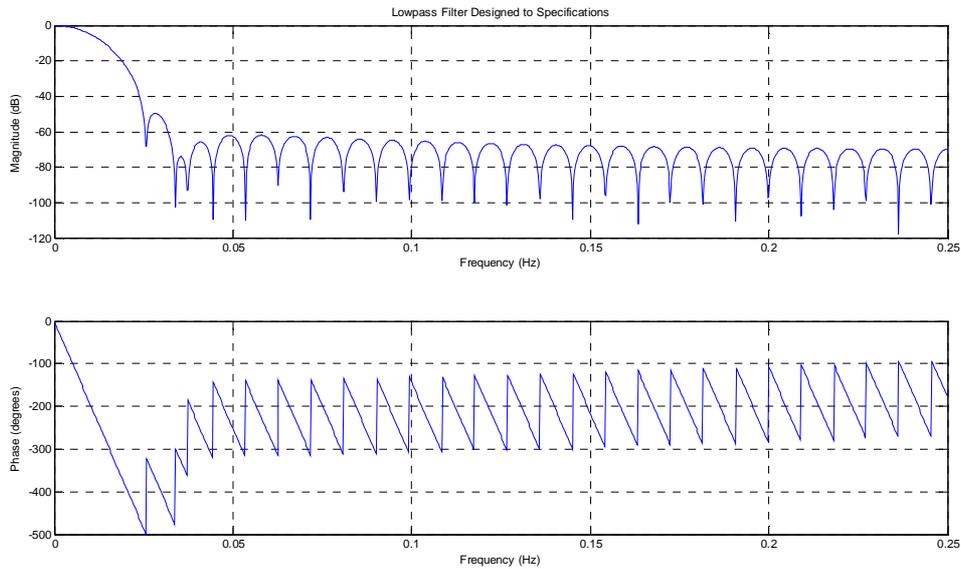


Figura 4. 8. Espectro de magnitud y fase del filtro FIR pasa-bajas

Filtrado de la señal de temperatura

Los resultados obtenidos al filtrar la señal de temperatura mediante el filtro FIR pasa-bajas se muestran en la Figura 4.9, donde se puede apreciar que el filtro atenúa gran parte del ruido presente en la señal de temperatura, obteniéndose una señal más adecuada para la aplicación de la técnica de identificación de sistemas mediante Matlab™.

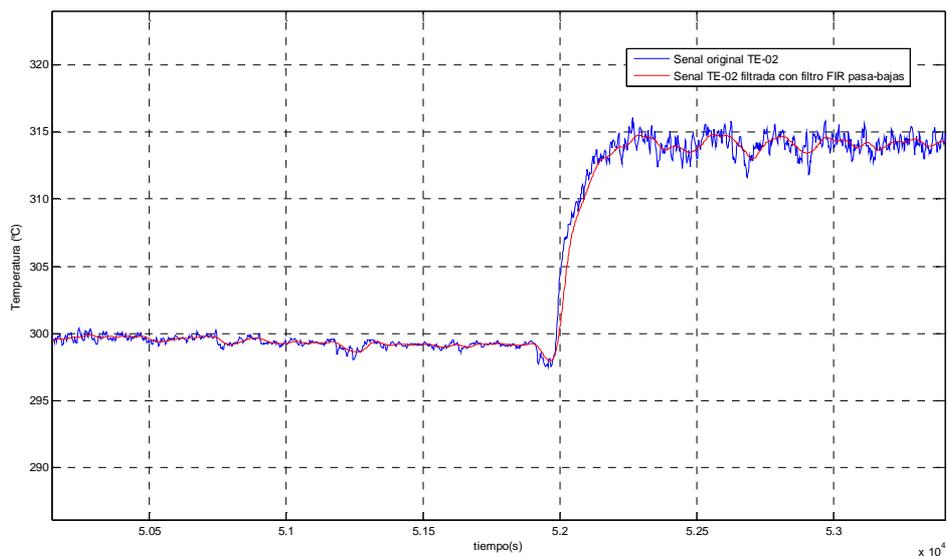


Figura 4. 9. Temperatura TE-02 original y filtrada con FIR pasa-bajas

4.9.5. Identificación del sistema en lazo cerrado

Como se comentó anteriormente, la identificación se hizo en lazo cerrado. Conocida la señal de referencia y el controlador, se usó el método de identificación indirecta para obtener la función de transferencia en lazo cerrado y luego, a partir de ésta, se obtuvo la función de transferencia del sistema en lazo abierto.

En esta sección se presentan los datos de entrada y salida usados para la estimación del modelo del sistema mediante la herramienta de identificación de Matlab™, así como el modelo obtenido para el sistema en lazo cerrado.

4.9.5.1. Datos para estimación y validación del modelo

Debido a que se efectuó la identificación del sistema en lazo cerrado, la señal de entrada usada en la identificación correspondió a la señal de referencia del sistema de control proporcional usado; la señal de salida correspondió a la temperatura interna del evaporador.

El conjunto de datos obtenidos se dividió en dos grupos: un grupo para la estimación del modelo y otro grupo para la validación del modelo. Los datos de entrada y salida usados en la estimación del modelo del sistema en lazo cerrado se muestran en la Figura 4.10. En la Figura 4.11 se muestran los datos usados para la validación del modelo estimado.

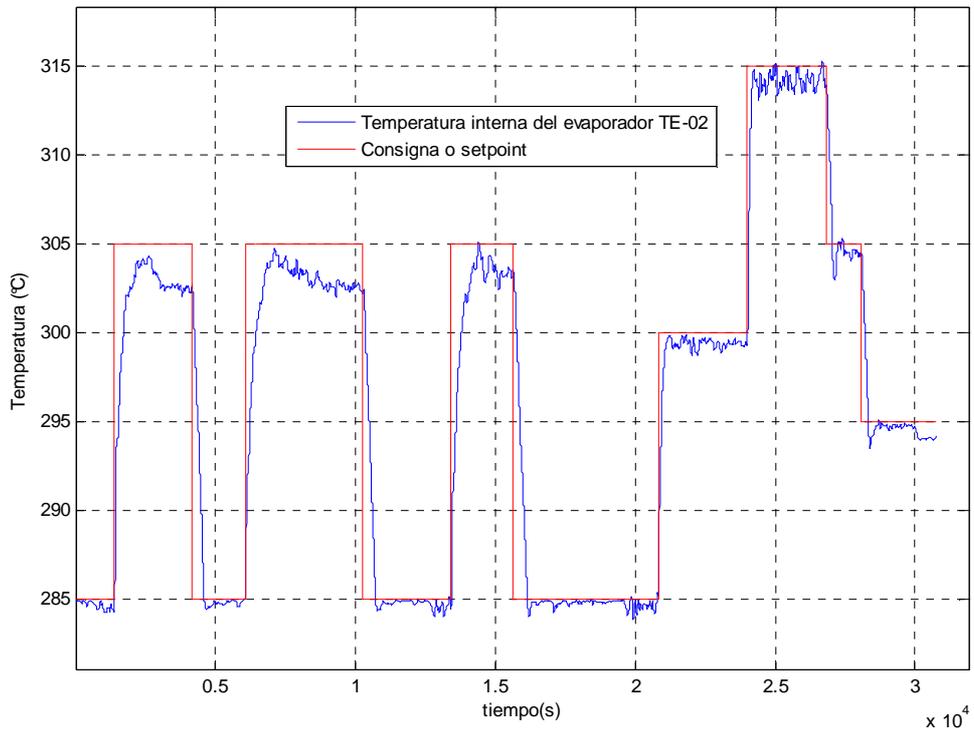


Figura 4. 10. Datos de entrada y salida usados en la estimación del modelo del evaporador

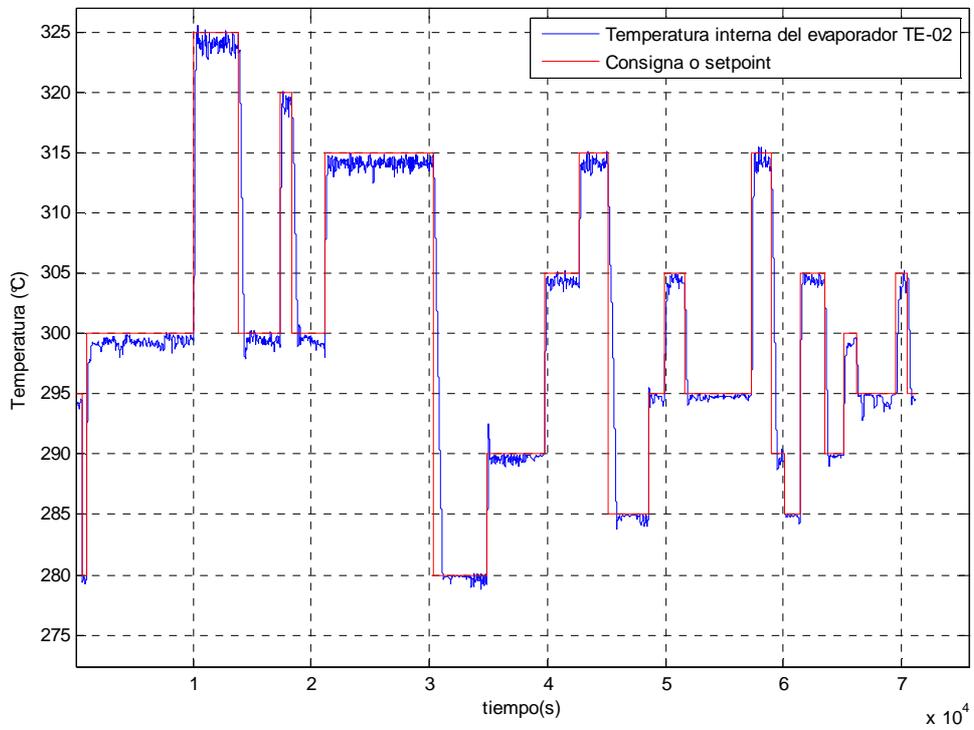


Figura 4. 11. Datos de entrada y salida usados para la validación del modelo del evaporador

4.9.5.2. Identificación del sistema mediante Matlab™

Matlab™ dispone de una herramienta de identificación que se despliega mediante el comando *ident* en la consola principal. En la Figura 4.12 se muestra la interfaz gráfica de la herramienta de identificación de sistemas de Matlab™. La herramienta ofrece la estimación de diferentes estructuras de modelos, entre éstos modelos paramétricos lineales como ARX y ARMAX, y modelos de procesos sobreamortiguados y subamortiguados de hasta tercer orden.

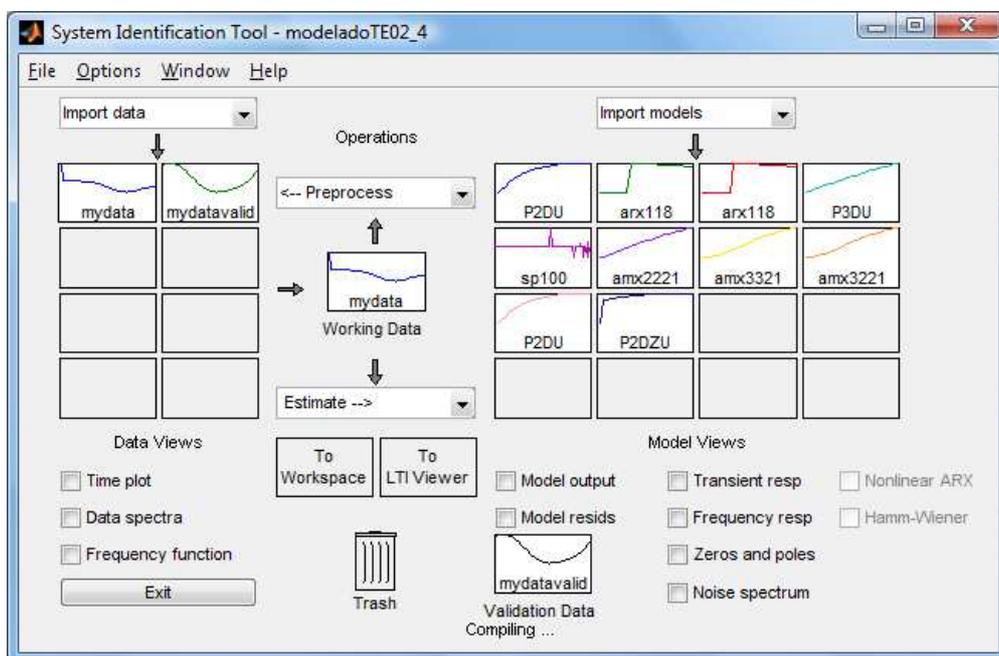


Figura 4. 12. Interfaz gráfica de herramienta de identificación de Matlab

Luego de probar con varios modelos, se obtuvo que el modelo con mejor ajuste al sistema en lazo cerrado es el siguiente:

$$G_{LC}(s) = \frac{K}{1 + 2ZetaTws + Tw^2 s^2} e^{-Tds} \quad (4. 1)$$

donde,

$$K = 0,9987$$

$$T_w = 49,135 \text{ s/rad}$$

$$\text{Zeta} = 1,4465$$

$$T_d = 0 \text{ s}$$

En la Figura 4.13 se muestra la comparación entre la respuesta del sistema real en lazo cerrado y la respuesta del modelo anterior, simulado a través de simulink. En la Figura 4.14 se muestra un acercamiento de la Figura 4.13 para ver mayor detalle.

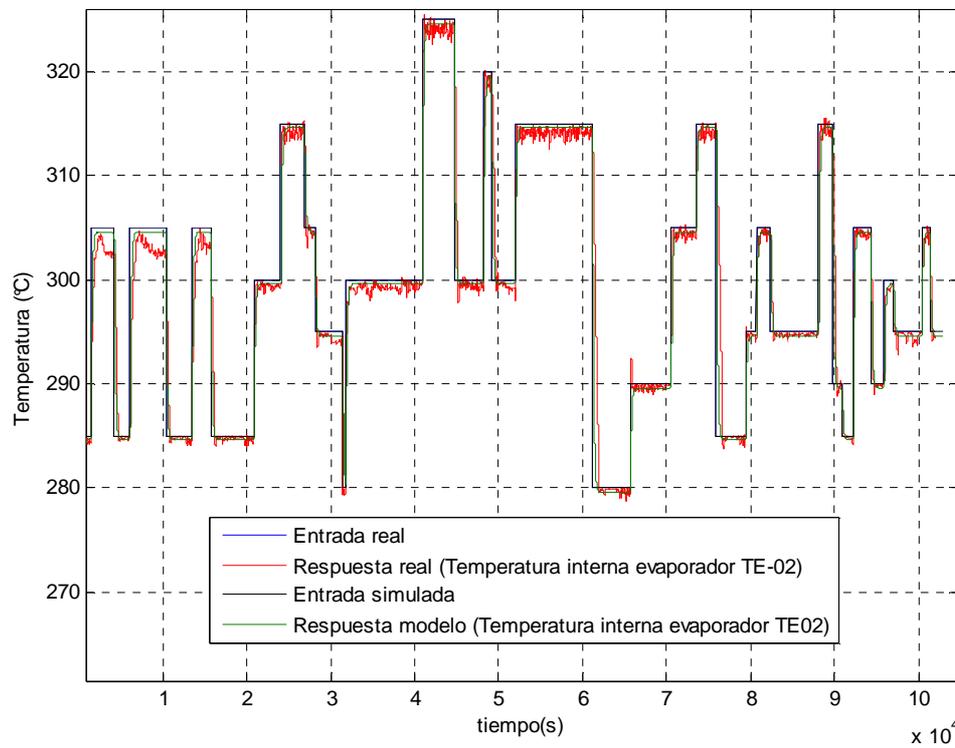


Figura 4. 13. Comparación entre respuesta real y respuesta del modelo estimado del evaporador

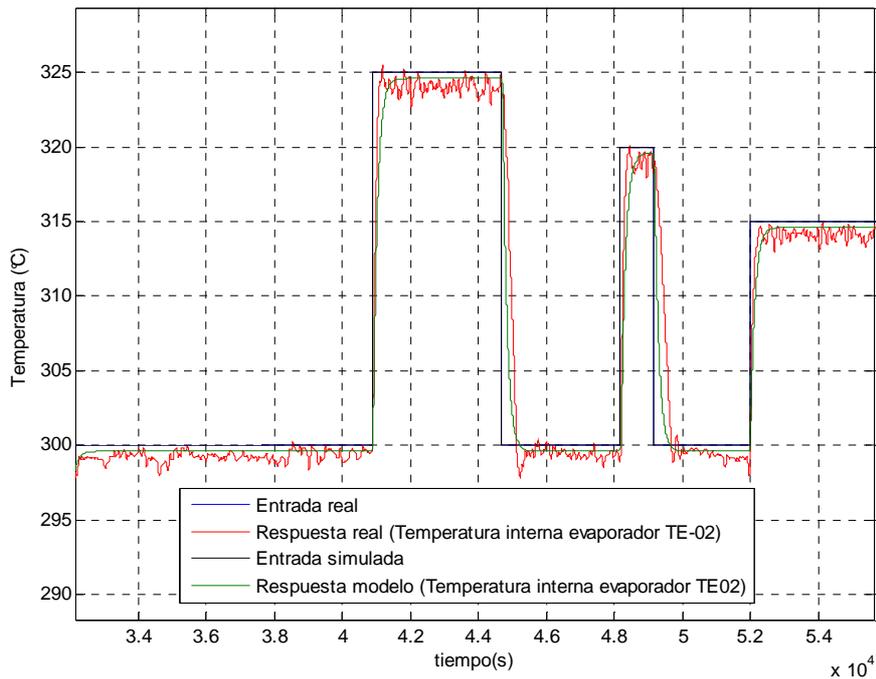


Figura 4. 14. Comparación entre respuesta real y respuesta del modelo estimado (zoom)

Como se puede apreciar en la Figura 4.13 y Figura 4.14, el modelo obtenido para el sistema en lazo cerrado se ajusta satisfactoriamente al sistema real.

4.9.6. Cálculo de la función de transferencia del sistema en lazo abierto

El modelo obtenido mediante la herramienta de identificación de Matlab™ corresponde al sistema en lazo cerrado, que corresponde al esquema mostrado en la Figura 4.15.

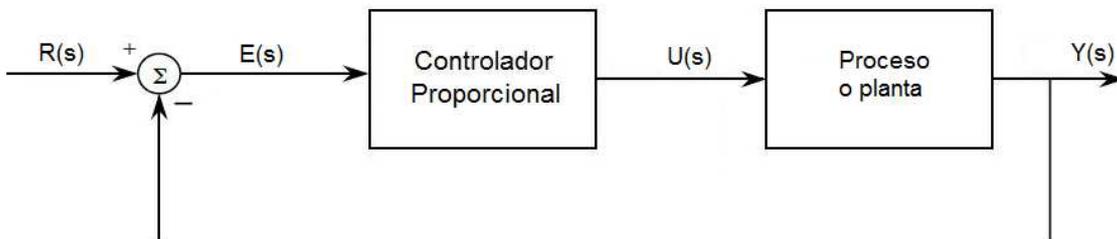


Figura 4. 15. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado usado para identificación

El modelo obtenido, consistente en la función de transferencia $G_{LC}(s)$, corresponde a la relación entre la salida $Y(s)$ y la entrada de referencia $R(s)$. Debido a que se conoce el

controlador proporcional, es posible obtener la función de transferencia del sistema o planta haciendo uso de las técnicas de reducción de diagramas de bloques.

El diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado puede presentarse como se muestra en la Figura 4.16, donde $G_{LA}(s)$ corresponde al modelo del sistema o proceso que se desea conocer.

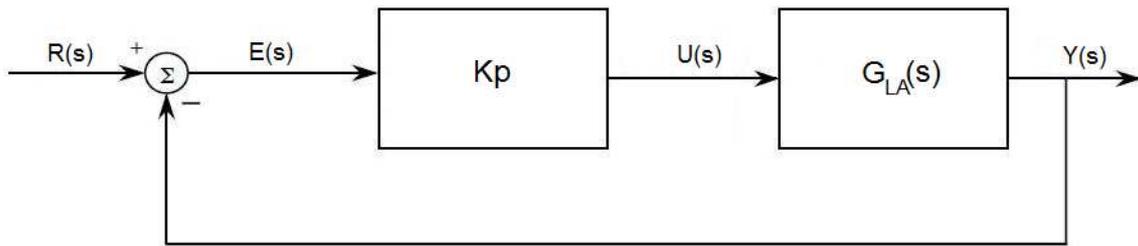


Figura 4. 16. Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado para el evaporador

El diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado mostrado en la Figura 4.16 puede reducirse a la función de transferencia siguiente:

$$G_{LC}(s) = \frac{K_p G_{LA}(s)}{1 + K_p G_{LA}(s)} \quad (4.2)$$

Como se mostró anteriormente, el modelo obtenido mediante identificación corresponde a la siguiente función de transferencia:

$$G_{LC}(s) = \frac{K}{1 + 2ZetaTws + Tw^2s^2} \quad (4.3)$$

Al igualar las dos funciones de transferencia anteriores, se puede obtener la función de transferencia del sistema en lazo abierto, denotada por $G_{LA}(s)$, dada por:

$$G_{LA}(s) = \frac{K}{Tw^2 K_p s^2 + 2ZetaTwK_p s + K_p - KK_p} \quad (4.4)$$

De esta manera, el modelo del sistema o proceso consistente en el evaporador es el siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{Tw^2 K_p s^2 + 2Zeta Tw K_p s + K_p - KK_p} \quad (4.5)$$

donde,

$$K = 0,9987$$

$$Tw = 49,135 \text{ s/rad}$$

$$Zeta = 1,4465$$

$$K_p = 5 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$$

Al simular el sistema en lazo cerrado, con el esquema mostrado en la Figura 4.16, y la función de transferencia del sistema en lazo abierto ya calculada, se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 4.17. En la Figura 4.18 se muestra un acercamiento de la Figura 4.17 donde se aprecia con mayor detalle la respuesta del sistema real y simulado.

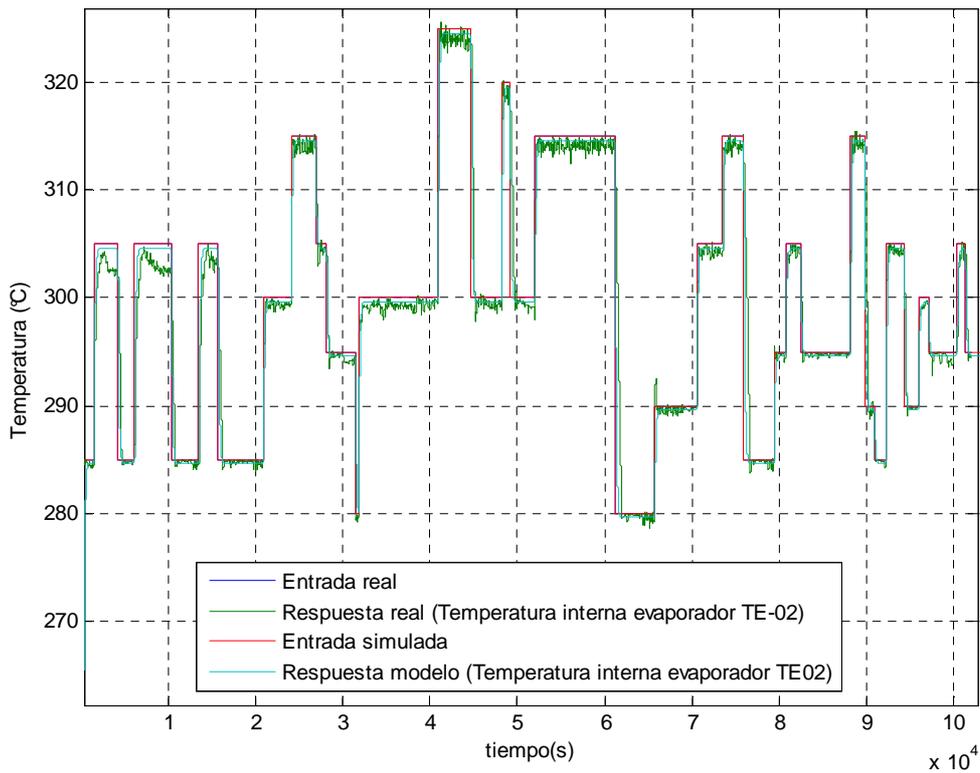


Figura 4. 17. Comparación entre la respuesta real y la simulada para el evaporador

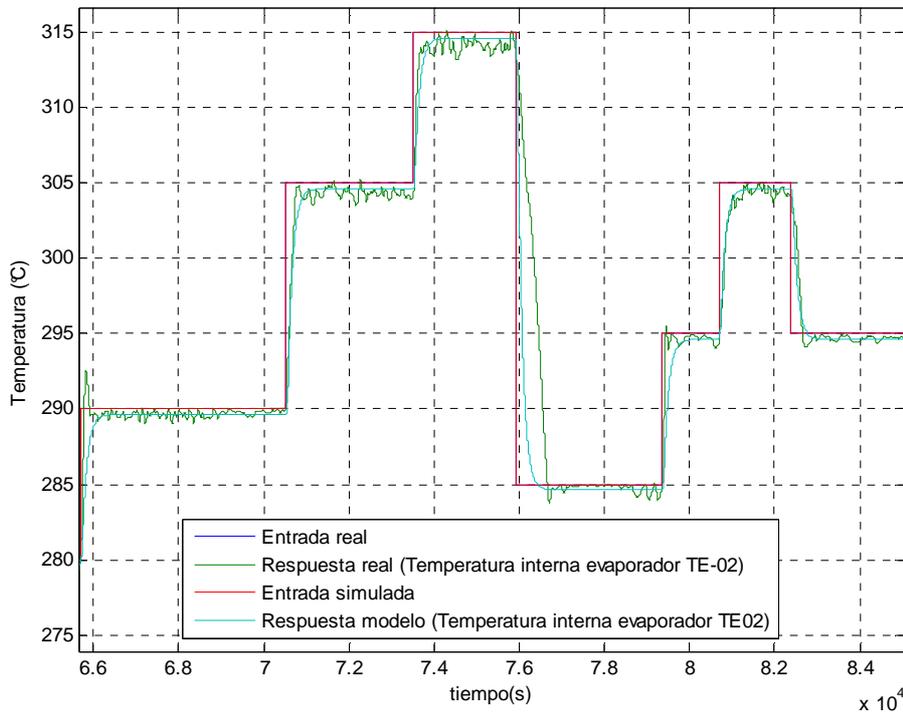


Figura 4. 18. Comparación entre la respuesta real y la simulada para el evaporador (zoom)

La Figura 4.17 y la Figura 4.18 muestran que el modelo obtenido para el evaporador se ajusta al sistema real con muy buena aproximación, por lo cual el modelo obtenido es válido alrededor del punto de operación de 300 °C.

4.10. Diseño e implantación del sistema de control de temperatura

4.10.1. Sistema de control de la temperatura en el evaporador

Para el control de la temperatura en el evaporador se diseñaron dos esquemas de control para evaluar su desempeño y determinar el más adecuado. Un esquema fue el control proporcional-integral y otro el control difuso. Para ambos esquemas de control se definieron las siguientes variables:

- Variable controlada: temperatura interna del evaporador
- Variable medida: temperatura interna del evaporador
- Variable manipulada: energía entregada a las 2 mantas del evaporador

Como ya se comentó, para manipular la energía eléctrica entregada a las resistencias del evaporador se usaron dos relés, los cuales permiten entregar o suprimir la tensión de 120 VAC. El control de la temperatura interna del evaporador se hizo mediante una modulación de ancho de pulso, que permite entregar la energía eléctrica adecuada a las dos mantas que están conectadas a dos relés independientes, pero que reciben la misma señal de control.

El ancho de pulso máximo es de 2 s y el sistema de control fue diseñado de tal manera que su salida sea un porcentaje de dicho ancho máximo, que represente el ancho del pulso requerido en cada instante de tiempo. El sistema de control funciona de esta manera: si la salida del controlador es de 0 %, entonces no se entrega energía a las resistencias, pero si la salida es de 50 %, entonces durante 1 s se entrega energía a las resistencias y durante el siguiente segundo se suprime la energía; esta alternancia se efectúa continuamente.

4.10.1.1. Sistema de control Proporcional- Integral para TE-02

Dado que se conoce el modelo matemático del evaporador, se aplicó una técnica de diseño basada en el ajuste de los parámetros del controlador PI para lograr el polinomio característico en lazo cerrado, que cumplió las especificaciones deseadas. El esquema del sistema de control proporcional-integral aplicado se muestra en la Figura 4.19.

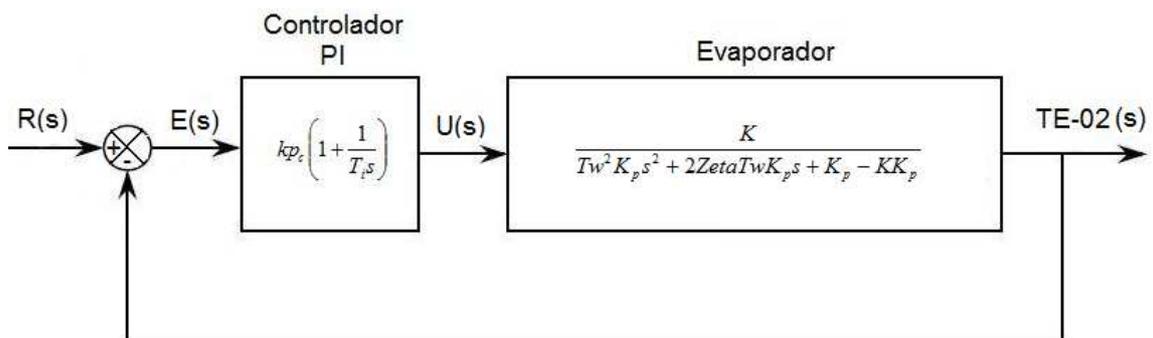


Figura 4. 19. Sistema de control Proporcional-Integral para el evaporador

Tomando $K_i = 1/T_i$, la función de transferencia del sistema en lazo cerrado está dada por la Ecuación (4.6).

$$G_{LC}(s) = \frac{KKp_c s + KK_i}{Tw^2 K_p s^3 + 2ZetaTwK_p s^2 + (K_p - KK_p + KKp_c)s + KK_i} \quad (4.6)$$

El polinomio característico del sistema en lazo cerrado, correspondiente al polinomio en el denominador de la función de transferencia, es el siguiente:

$$PC_{LC}(s) = Tw^2 K_p s^3 + 2ZetaTwK_p s^2 + (K_p - KK_p + KKp_c)s + KK_i \quad (4.7)$$

Para el diseño del controlador PI se establecieron como especificaciones deseadas en lazo cerrado las siguientes: sobrepaso máximo de 3 % y tiempo de asentamiento menor o igual que 500 s.

A partir de las especificaciones deseadas es posible obtener el polinomio característico deseado para el sistema en lazo cerrado, y luego los parámetros del controlador PI adecuado. Es importante resaltar que se desea un sistema subamortiguado en lazo cerrado.

Polinomio característico deseado en lazo cerrado

Las especificaciones deseadas para el sistema en lazo cerrado son, en este caso, sobrepaso máximo de 3 % y tiempo de asentamiento menor o igual que 500 s. Para cumplir con dichas especificaciones se buscaron los parámetros del controlador PI, Kp_c y K_i , de tal manera que el sistema en lazo cerrado fuera subamortiguado con un polinomio característico con dos raíces complejas conjugadas de la siguiente forma:

$$PC_d(s) = s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2 \quad (4.8)$$

De esta manera, a partir de estas especificaciones deseadas se determinó el polinomio característico deseado como se explica a continuación:

Para que el sobrepaso máximo sea de 3 %, el valor del coeficiente de amortiguamiento ζ se calcula de la siguiente ecuación:

$$M = 0,03 = e^{-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (4.9)$$

A partir de la Ecuación (4.9) se obtiene que el factor de amortiguamiento relativo ζ debe ser igual a 0,74, por lo cual los polos en lazo cerrado deben ubicarse sobre las rectas mostradas en la Figura 4.20, con $\zeta = 0,74$.

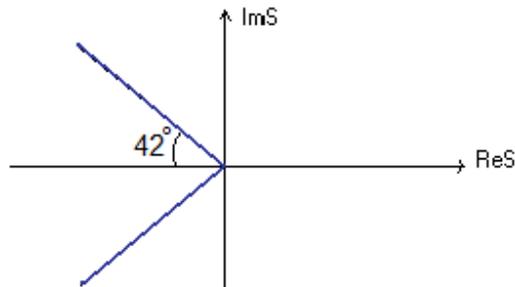


Figura 4. 20. Ubicación de los polos deseados del evaporador en lazo cerrado según sobrepaso máximo

Para cumplir con la especificación de tiempo de asentamiento, la distancia del eje imaginario a cada uno de los polos (d) debe ser mayor o igual que $4/ts$, según el criterio del 2 %, es decir, se debe cumplir lo siguiente:

$$d \geq \frac{4}{500} \Rightarrow d \geq 0,008 \quad (4. 10)$$

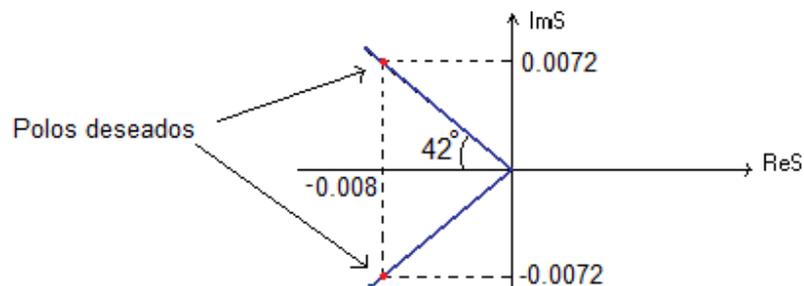


Figura 4. 21. Ubicación de los polos deseados del evaporador en lazo cerrado

De esta manera, para cumplir las especificaciones deseadas, el sistema en lazo cerrado debe tener polos complejos conjugados como los mostrados en la Figura 4.21, dados por $S = -0,008+0,0072j$ y $S = -0,008-0,0072j$, por lo cual el polinomio característico deseado en lazo cerrado es el siguiente:

$$PC_d(S) = (S + 0,008 - 0,0072j)(S + 0,008 + 0,0072j) \quad (4. 11)$$

$$PC_d(S) = S^2 + 0,016S + 0,0001 \quad (4. 12)$$

Dado que el polinomio característico del sistema en lazo cerrado, denotado por $PC_{LC}(s)$ y mostrado en la Ecuación (4.7), es de tercer grado, se debe agregar un polo al polinomio característico deseado, alejado de los polos $S = -0,008+0,0072j$ y $S = -0,008-0,0072j$ para que estos dos últimos sean dominantes y se puedan cumplir las especificaciones dadas.

El polinomio característico de tercer grado, deseado para el sistema en lazo cerrado, se puede escribir de la siguiente forma:

$$PC_d(S) = (S + \alpha)(S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2) \quad (4.13)$$

$$PC_d(S) = S^3 + (0,016 + \alpha)S^2 + (0,0001 + 0,016\alpha)S + 0,0001\alpha \quad (4.14)$$

Cálculo de parámetros del controlador PI

Al igualar el polinomio característico deseado, $PC_d(s)$, con el polinomio característico del sistema en lazo cerrado, $PC_{LC}(s)$, se obtienen los parámetros Kp_c y K_i del controlador: $\alpha = 0,0429$, $Kp_c = 9,6899$ y $K_i = 0,0605$.

El valor obtenido de $\alpha = 0,0429$ indica que el sistema en lazo cerrado tendrá un polo en $S = -0,0429$ lo cual es satisfactorio, pues este polo está alejado de los polos $S = -0,008+0,0072j$ y $S = -0,008-0,0072j$, por lo cual estos últimos son los dominantes y determinan la dinámica del sistema, haciendo que se cumplan las especificaciones deseadas.

Cálculo del período de muestreo en lazo cerrado

Dado que los polos deseados en lazo cerrado son $S = -0,008+0,0072j$, $S = -0,008-0,0072j$ y $S = -0,0429$, los polos dominantes son $S = -0,008+0,0072j$ y $S = -0,008-0,0072j$, y el polo no dominante es $S = -0,0429$, por lo cual la constante de tiempo de la componente más rápida corresponde al polo $S = -0,0429$ y es $T = 1/0,0429 = 23,3$ s. Así, el tiempo de asentamiento de la componente más rápida, según el criterio del 99,3%, está dado por $t_s = 5T = 5 * 23,3 = 116,5$ s.

Como la dinámica más rápida está regida por un polo simple ($S = -0,0429$), el período de muestreo debe tomarse, como máximo, diez veces menor que el tiempo de asentamiento de esta dinámica, obteniéndose lo siguiente:

$$T_0 < \frac{116,5}{10} \text{ s} \Rightarrow T_0 < 11,65 \text{ s} \quad (4.15)$$

De esta manera, el período de muestreo debe ser menor que 11,65 s. Así, en este caso se puede tomar como período de muestreo $T_0 = 2 \text{ s}$.

Simulación del sistema con control PI

Con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema con el controlador PI diseñado, se realizó una simulación mediante el uso de la herramienta Matlab™.

La respuesta del sistema simulado en lazo cerrado, con los parámetros $Kp_c = 9,6899$ y $K_i = 0,0605$, se muestra en la Figura 4.22. Como se puede apreciar, la simulación indica que el sistema es estable en lazo cerrado y el tiempo de asentamiento (criterio del 2 %) con el controlador es de 480 s, cumpliéndose la especificación deseada, pues es menor que 500 s. Sin embargo, la especificación del sobrepaso máximo no se satisface, pues en la simulación es de 26,5 %.

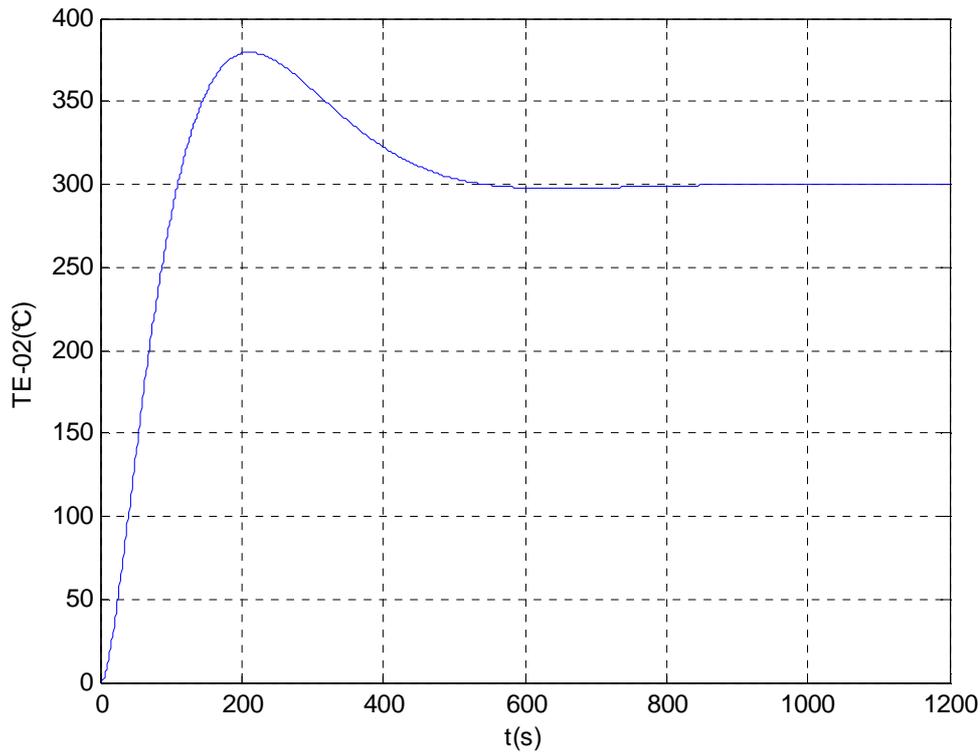


Figura 4. 22. Respuesta del evaporador con el controlador PI-1 diseñado (simulado)

Dado que el sobrepaso máximo del sistema con el controlador PI diseñado es muy grande, se realizó una variación de los parámetros alrededor de $Kp_c = 9,6899$ y $K_i = 0,0605$ hasta lograr una mejor respuesta. Luego de realizar simulaciones con diferentes parámetros, se encontró que los parámetros más adecuados son los siguientes: $Kp_c = 14,5348$ y $K_i = 0,0484$; la respuesta del sistema simulado se muestra en la Figura 4.23.

Como se puede apreciar en la Figura 4.23, el sistema en lazo cerrado con los parámetros $Kp_c = 14,5348$ y $K_i = 0,0484$ tiene una mejor respuesta, con un sobrepaso máximo de 14,4 %. El tiempo de asentamiento con el nuevo controlador es de 654 s (criterio del 2 %), no cumpliendo con la especificación deseada inicial, sin embargo, este tiempo de asentamiento es aceptable para el sistema.

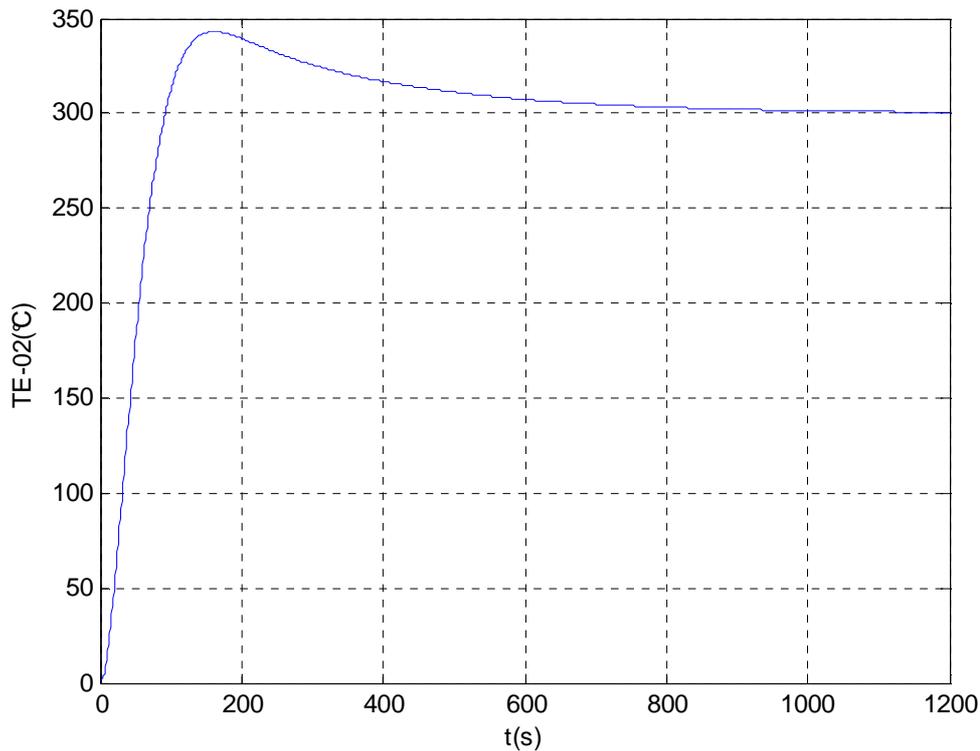


Figura 4. 23. Respuesta del evaporador con el controlador PI-2 diseñado (simulado)

4.10.1.2. Sistema de control difuso para TE-02

El esquema de control usado se muestra en la Figura 4.24. La referencia $r(k)$ corresponde a la temperatura deseada en el interior del evaporador, $u(k)$ es la señal de control o ancho del pulso que determina la entrega de energía a las resistencias, y $y(k)$ corresponde a la temperatura en la zona interna del evaporador. Como se puede apreciar en la Figura 4.24, la salida del controlador difuso es el cambio del control, $\Delta u(k)$, y no el control, $u(k)$, directamente. El control se hace de la siguiente manera: para controlar la temperatura interna del evaporador se manipula la energía entregada a las dos resistencias del evaporador al mismo tiempo (la resistencia interna y la resistencia externa).

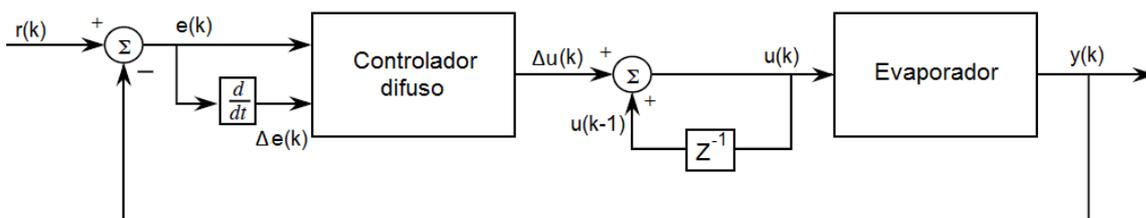


Figura 4. 24. Esquema del sistema de control difuso para el evaporador

El controlador difuso diseñado tiene como entradas el error, $e(k)$, y el cambio del error, $\Delta e(k)$, y como salida el cambio del control $\Delta u(k)$, siendo $u(k)$ el ancho del pulso expresado en porcentaje del tiempo base, que en este caso fue tomado como 2 s. Para cada una de las variables de entrada y salida se definieron conjuntos difusos en todo su rango, con las funciones de pertenencia mostradas en la Figura 4.25.

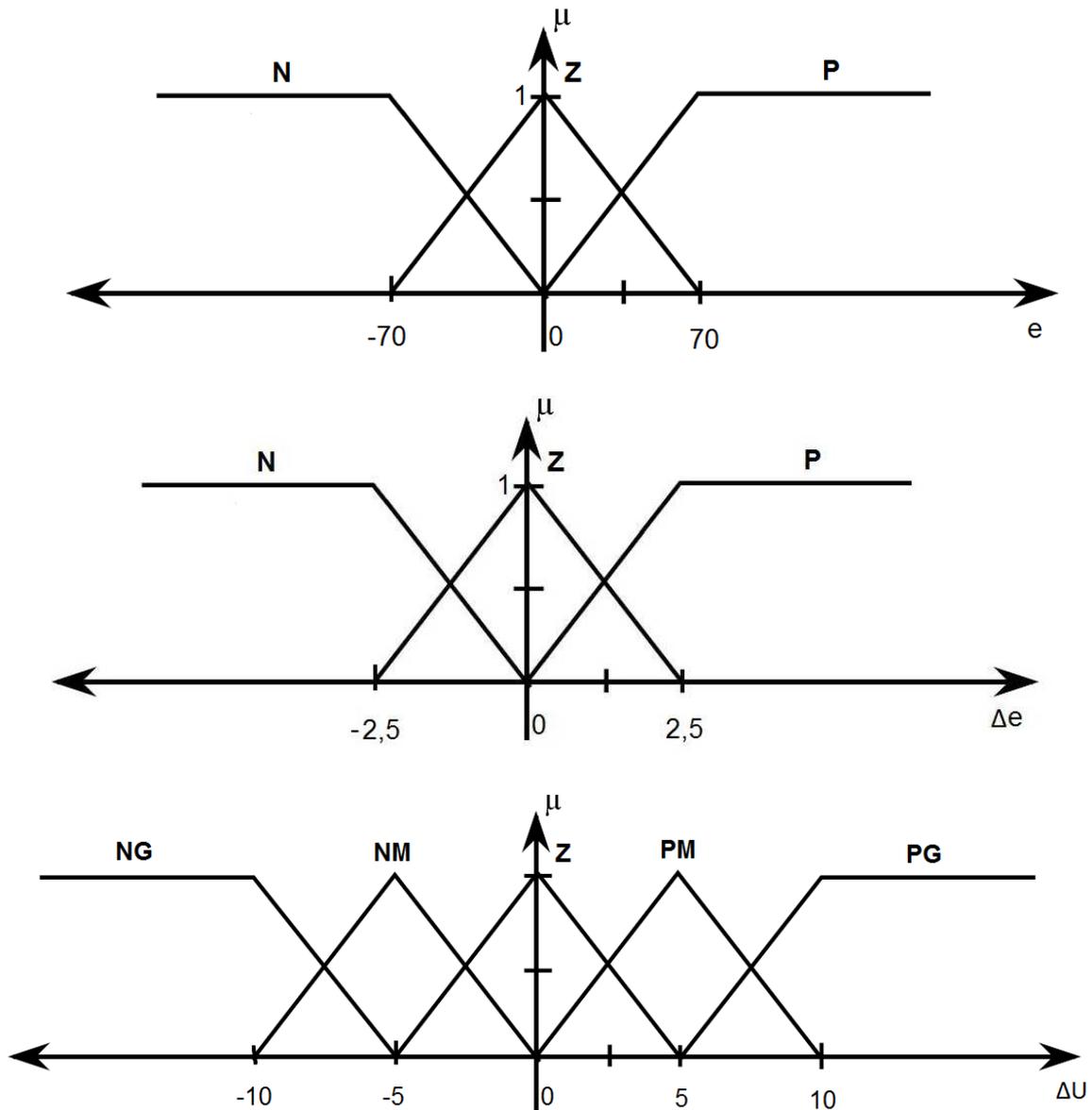


Figura 4. 25. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de entrada y salida para el evaporador

En la partición difusa de las variables se usó una abreviación para los valores lingüísticos, como sigue: “N” es la abreviación para “valor negativo”, “Z” es la abreviación para “valor igual a cero”, “P” es la abreviación para “valor positivo”, “NG” es la abreviación para “valor negativo grande”, “NM” es la abreviación para “valor negativo mediano”, “PM” es la abreviación para “valor positivo mediano” y “PG” es la abreviación para “valor positivo grande”.

A partir del conocimiento sobre el control de procesos, y usando la partición difusa realizada para cada una de las variables, se definió la base de reglas de la siguiente manera:

Si **error** es N y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es N y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es N y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es NM

Si **error** es Z y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es NM

Si **error** es Z y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es Z

Si **error** es Z y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es PM

Si **error** es P y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es Z

Si **error** es P y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es PM

Si **error** es P y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es PG

El mecanismo de inferencia usado fue el mecanismo de inferencia tipo Mamdani para modelos MISO. El método de desdifusificación usado fue el del promedio ponderado (weighted average method), dada la simetría de las funciones de pertenencia usadas.

Construcción e implantación del sistema de control difuso

La construcción del controlador difuso de temperatura diseñado se hizo mediante un programa en lenguaje C++. Para probar el desempeño del controlador difuso, se usó el sistema de control y adquisición de datos desarrollado, en el cual se ejecutó el controlador que está contenido en una DLL (biblioteca de enlace dinámico). Durante las pruebas, se registraron las diferentes variables del proceso.

El período de muestreo usado para adquirir los datos de las temperaturas y de la señal de control fue de 2 s. En las pruebas realizadas, se inyectó al evaporador un flujo de agua de 4,4 ml/min y se mantuvo la presión alrededor de 1000 psig.

4.10.2. Sistema de control de temperatura en línea de vapor sobrecalentado (TE-04)

En el tramo de la línea desde la salida del evaporador hasta el punto de mezcla se dispone de una manta térmica que tiene por función compensar las pérdidas de calor para garantizar la conservación del vapor sobrecalentado hasta el punto de mezcla. Debido a que esta manta se retira con frecuencia y se instala nuevamente para realizar las pruebas, el proceso es variable, ya que la disposición de la manta sobre la línea puede cambiar cada vez que se instala. Por lo anterior, no resulta de mucha utilidad obtener un modelo matemático del sistema, pues habría que calcularlo cada vez que se instale de la manta.

Motivado al buen desempeño mostrado por el controlador difuso en el caso del evaporador y debido a que la implantación de este controlador no requiere conocer el modelo matemático del sistema, se decidió la implantación de un controlador difuso para la temperatura en la línea de vapor sobrecalentado, denotada por TE-04. Para el esquema de control difuso se definieron las siguientes variables:

- Variable controlada: temperatura en la línea de vapor sobrecalentado
- Variable medida: temperatura en la línea de vapor sobrecalentado
- Variable manipulada: energía entregada a la manta de la línea de vapor sobrecalentado

De forma similar al evaporador, para manipular la energía eléctrica entregada a la resistencia de la línea de vapor sobrecalentado se usó un relé, el cual permite el control de la temperatura de la línea mediante una modulación de ancho de pulso.

4.10.2.1. Sistema de control difuso para TE-04

El esquema de control usado es el mismo usado para la temperatura en el evaporador, mostrado en la Figura 4.24. La referencia $r(k)$ corresponde a la temperatura TE-04 deseada, $u(k)$ es la señal de control y $y(k)$ corresponde a la temperatura TE-04 real. $u(k)$ es el ancho

del pulso expresado en porcentaje del tiempo base, que en este caso se tomó como 4 s. Para cada variable de entrada, $e(k)$ y $\Delta e(k)$, y salida, $\Delta u(k)$, se definieron conjuntos difusos en todo su rango, con funciones de pertenencia mostradas en la Figura 4.26.

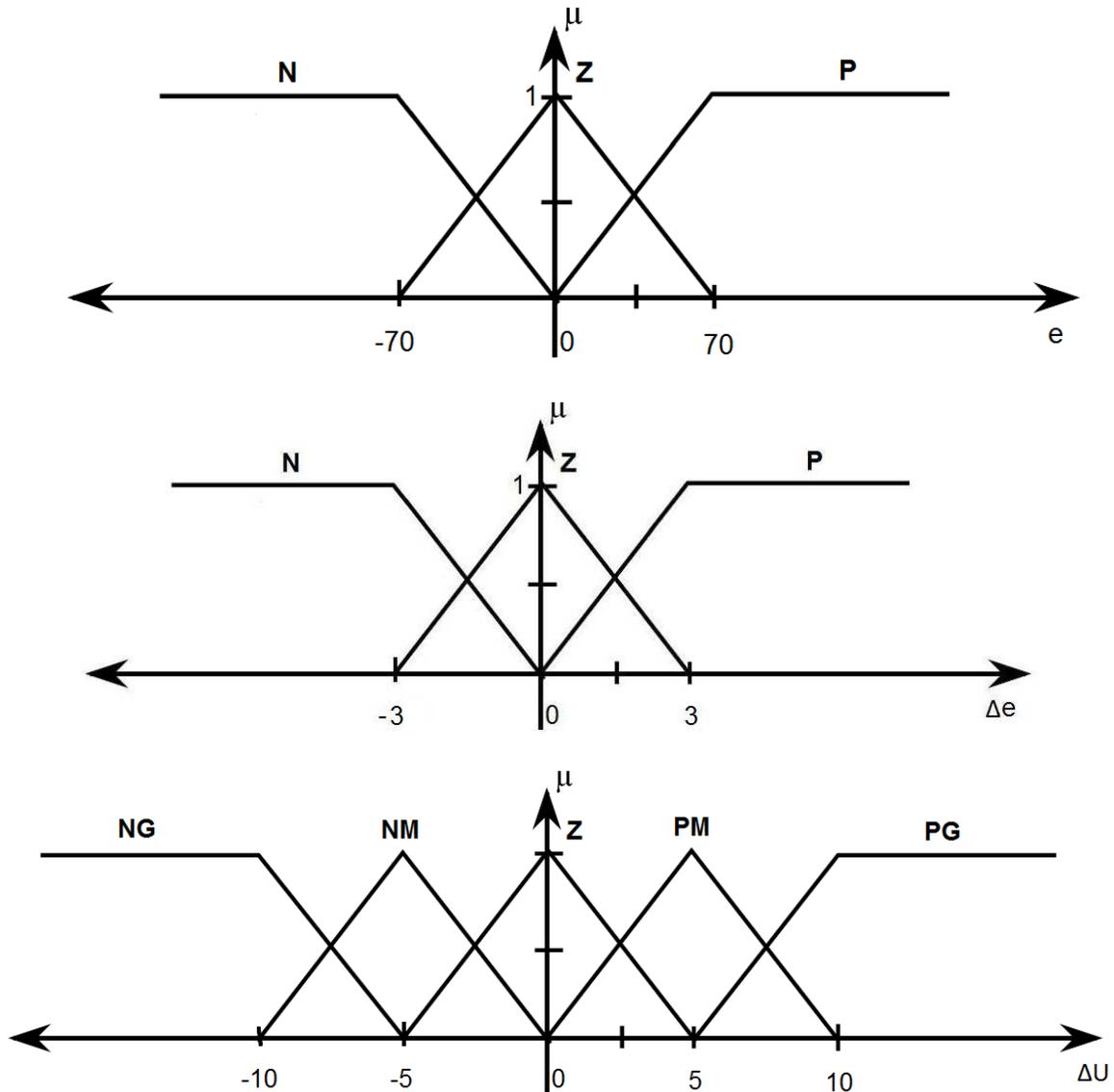


Figura 4. 26. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de entrada y salida para la línea 04

La base de reglas usada es igual a la mostrada para el evaporador:

Si **error** es N y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es N y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es N y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es NM

Si **error** es Z y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es NM

Si **error** es Z y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es Z

Si **error** es Z y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es PM

Si **error** es P y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es Z

Si **error** es P y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es PM

Si **error** es P y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es PG

Construcción e implantación del sistema de control difuso

La construcción del controlador difuso para la temperatura TE-04 se hizo con la DLL ya desarrollada. El período de muestreo usado para adquirir los datos de la temperatura y de la señal de control fue de 2 s. Durante las pruebas se inyectó al evaporador un flujo de agua de 4,4 ml/min, se mantuvo la presión alrededor de 1000 psig y se mantuvo la temperatura interna del evaporador en 300 °C mediante el controlador ya desarrollado para el mismo.

4.10.3. Sistema de control de temperatura en línea de la mezcla (TE-05)

En el tramo de la línea de la mezcla líquido-vapor saturado se dispone de una manta térmica que tiene por función compensar las pérdidas de calor para garantizar la conservación de la calidad del vapor hasta la celda. Esta manta se desconecta e instala frecuentemente y, por lo tanto, no resulta de utilidad obtener un modelo de este tramo, pues éste cambia con frecuencia.

Dado el buen desempeño del control difuso en el control de la temperatura en el evaporador y en la línea de vapor sobrecalentado, se decidió la implantación de un controlador difuso para la temperatura en la línea de la mezcla líquido-vapor saturado, denotada por TE-05. Para el esquema de control difuso se definieron las siguientes variables:

- Variable controlada: temperatura en la línea de la mezcla líquido-vapor saturado
- Variable medida: temperatura en la línea de la mezcla líquido-vapor saturado
- Variable manipulada: energía entregada a la manta alrededor de la línea de la mezcla

De la misma forma que en el resto de los controladores, para manipular la energía eléctrica entregada a la resistencia de la línea de la mezcla se usó un relé, el cual permite el control de la temperatura de la línea mediante una modulación de ancho de pulso.

4.10.3.1. Sistema de control difuso para TE-05

El esquema de control usado es el mismo usado para la temperatura en el evaporador y en la línea de vapor sobrecalentado, mostrado en la Figura 4.24. La referencia $r(k)$ corresponde a la temperatura TE-05 deseada, $u(k)$ es la señal de control y $y(k)$ corresponde a la temperatura TE-05. $u(k)$ es el ancho del pulso expresado en porcentaje del tiempo base, tomado en este caso también como 2 s.

Para las variable $e(k)$ y $\Delta u(k)$, fueron definidos conjuntos difusos con funciones de pertenencia idénticas a las usadas para TE-04. Para $\Delta e(k)$ se definió la función de pertenencia mostrada en la Figura 4.27.

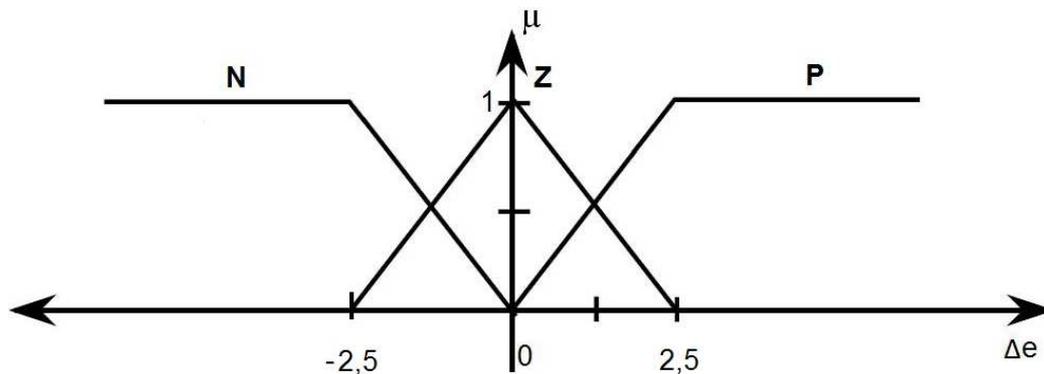


Figura 4. 27. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos del cambio del error para la línea 05

La base de reglas usada es igual a la mostrada en los casos anteriores.

Construcción e implantación del sistema de control difuso

La construcción del controlador difuso para la temperatura TE-05 se hizo con la misma DLL ya desarrollada, sólo cambiando los parámetros según los conjuntos difusos definidos para las variables. El período de muestreo usado para adquirir los datos de la temperatura y de la señal de control fue de 2 s.

Durante las pruebas se inyectó al evaporador un flujo de agua de 4,4 ml/min y se mantuvo la presión alrededor de 1000 psig en todo el sistema. Para evaluar el desempeño de este controlador fue necesario desactivar el control de la calidad del vapor, con el objetivo de variar manualmente la consigna de TE-05 y observar con mayor claridad tanto el estado transitorio como el estacionario.

4.10.4. Sistema de control de temperatura en la celda (TE-13 y TE-14)

Dado que el vapor se inyecta por la parte inferior de la celda, que se muestra en la Figura 4.28, éste se desplaza lentamente desde la parte inferior hacia la parte superior y, por lo tanto, la temperatura interna de la celda se mantiene mayor en los puntos inferiores que en los puntos superiores por un tiempo considerable, hasta que se logre la propagación del calor en toda la celda y todos los puntos tengan la misma temperatura. Al comportamiento de las temperaturas en los distintos puntos de la celda (desde su parte inferior hasta su parte superior) se le conoce como perfil de temperatura.

Para garantizar la obtención de un perfil de temperatura correcto en la celda es necesario reducir las pérdidas de calor a medida que el vapor fluye dentro de la misma. Por lo anterior, se dispone de dos mantas térmicas alrededor de la celda, una cubriendo su mitad superior y otra cubriendo su mitad inferior, como se muestra en la Figura 4.28. Cada manta es independiente para no alterar el perfil de temperatura y, por lo tanto, cada una requiere un controlador independiente.

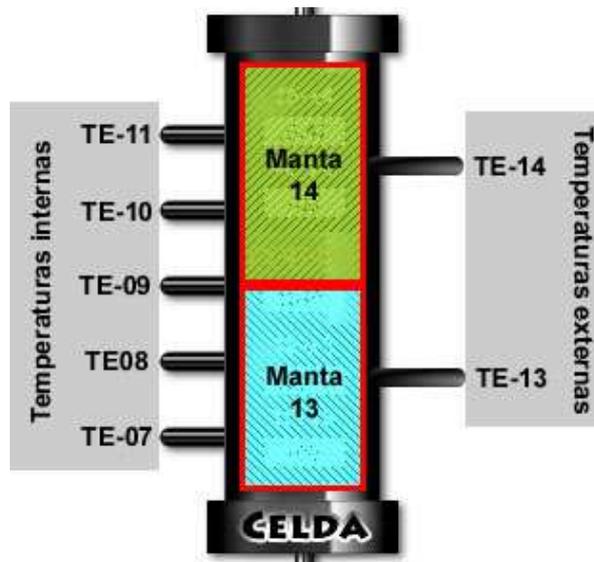


Figura 4. 28. Disposición de mantas térmicas en la celda

Para garantizar el perfil de temperatura natural del sistema, debido sólo al calor proporcionado por el vapor, es necesario que las mantas no proporcionen más energía que el vapor en la parte interna de la celda, por lo cual las mantas deben calentarse a medida que aumente la temperatura en el interior de la celda. Para lograr lo anterior, el sistema de control ajusta la consigna de los controladores de temperatura a medida que aumenta la temperatura interna de la celda, así: para la manta en la parte inferior de la celda se toma como consigna la temperatura interna TE-07 menos 1 °C y para la manta superior se toma como consigna la temperatura interna TE-09 menos 1 °C, mostradas en la Figura 4.28.

Debido a que la celda se instala y desinstala cada vez que se realiza una nueva prueba, no es posible obtener un modelo matemático único para la temperatura en la misma, pues al cambiar la celda y mover de posición las mantas, así como variar la disposición del aislante (fibra de vidrio), el modelo matemático cambia. Por lo anterior, para la temperatura en la celda resulta práctico el uso del control difuso, que es de fácil ajuste de parámetros.

Para los dos controles difusos, en la parte inferior y superior de la celda, se definieron las siguientes variables:

- Variable controlada: temperatura en parte inferior/externa (TE-13) o en la parte superior/externa (TE-14) de la celda.
- Variable medida: temperatura inferior externa (TE-13) o superior/externa (TE-14).
- Variable manipulada: energía entregada a la manta alrededor de la parte inferior o parte superior de la celda.

4.10.4.1. Sistema de control difuso para TE-13 y TE-14

El esquema de control difuso usado, tanto para TE-13 como para TE-14, es el mismo usado para la temperatura en los casos anteriores. El tiempo base, consistente en el ancho máximo del pulso, en este caso fue tomado como 2 s.

Para las variables de entrada, $e(k)$ y $\Delta e(k)$, y de salida, $\Delta u(k)$, se definieron conjuntos difusos en todo su rango, con las funciones de pertenencia mostradas en la Figura 4.29. Debido a que el sistema es más rápido que en los otros controladores, por poseer resistencias de mayor potencia, y a que la consigna de los controladores de la celda aumenta muy lentamente, fue necesario definir rangos más pequeños para las tres variables. Lo anterior surgió luego de observar grandes picos y muchas oscilaciones de la salida para grandes rangos de las variables.

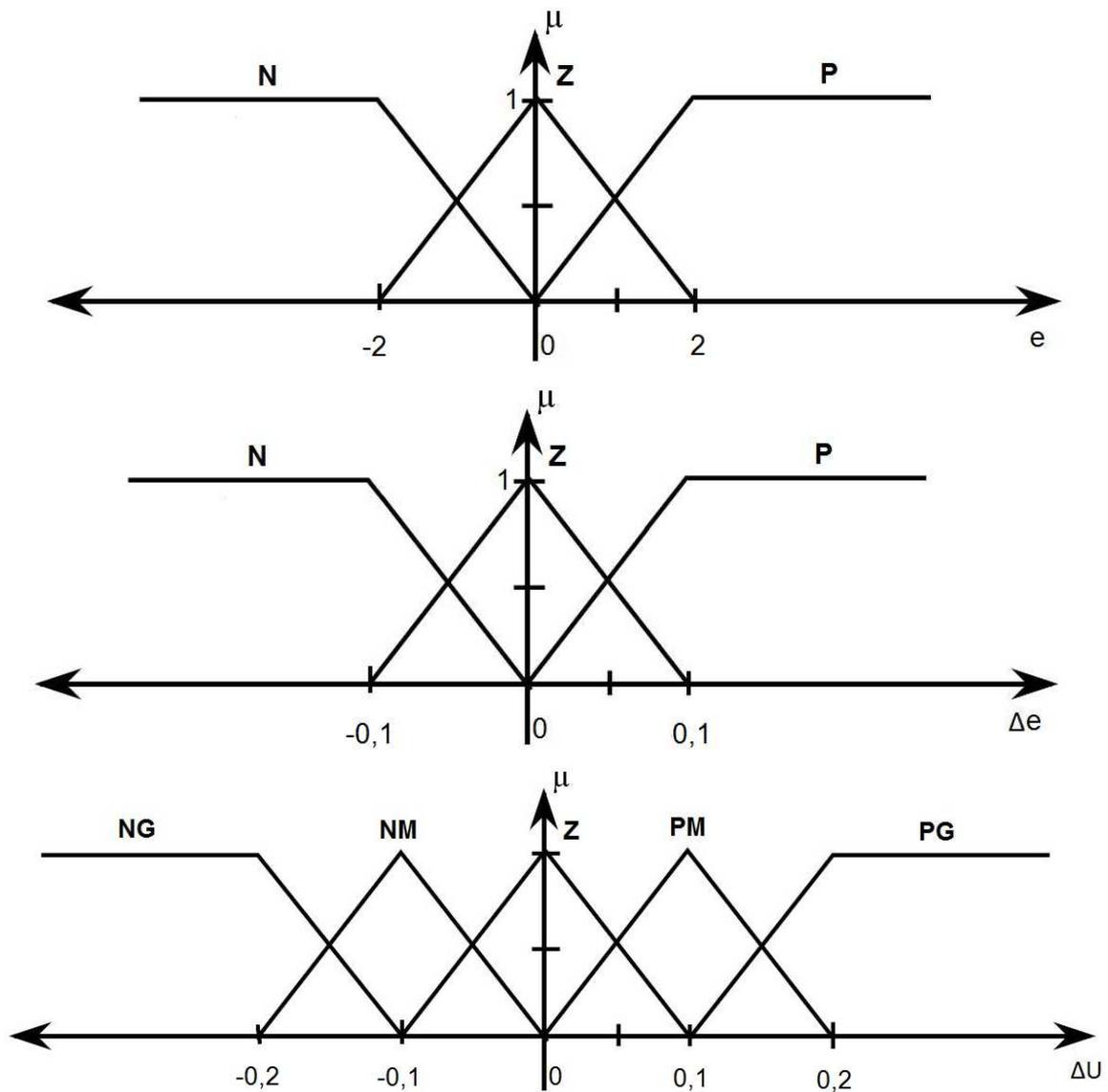


Figura 4. 29. Funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de entrada y salida para la celda

A partir del conocimiento sobre el comportamiento del sistema, y usando la partición difusa realizada para cada una de las variables, se definió la base de reglas de la siguiente manera:

Si **error** es N y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es N y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es N y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es Z y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es Z y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es Z y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es P y **cambio del error** es N entonces **cambio del control** es NG

Si **error** es P y **cambio del error** es Z entonces **cambio del control** es PM

Si **error** es P y **cambio del error** es P entonces **cambio del control** es PM

El sistema de reglas anterior se obtuvo luego realizar algunas pruebas y observar la gran rapidez de respuesta de las mantas usadas en la celda. Con esta base de reglas se logró que la temperatura en la parte inferior/externa y en la parte superior/externa de la celda se mantuviera en el rango adecuado, sin exceder en gran medida la temperatura interna de la celda.

El mecanismo de inferencia usado fue el mecanismo de inferencia tipo Mamdani para modelos MISO. El método de desdifusificación usado fue el del promedio ponderado (weighted average method), dada la simetría de las funciones de pertenencia usadas.

Construcción e implantación del sistema de control difuso

Los controladores difusos para las temperaturas en el exterior de la celda se implementaron mediante la misma DLL usada en todos los casos, efectuando los cambios en los parámetros, según la partición difusa de las variables, y en la base de reglas. El período de muestreo usado para adquirir los datos fue de 2 s.

El flujo de agua inyectado a la celda durante el período de prueba fue de 1 ml/min y se mantuvo la presión del sistema alrededor de 1100 psig. La calidad del vapor inyectado fue de 80 %.

4.11. Diseño del sistema de control de la calidad del vapor

4.11.1. Esquema de control aplicado para la calidad del vapor

Como se muestra en la Figura 4.30, el vapor húmedo con calidad x se obtuvo mediante la mezcla de vapor sobrecalentado y agua fría en un punto llamado punto de mezcla. El control se hizo mediante el ajuste de los flujos de agua fría y vapor sobrecalentado.

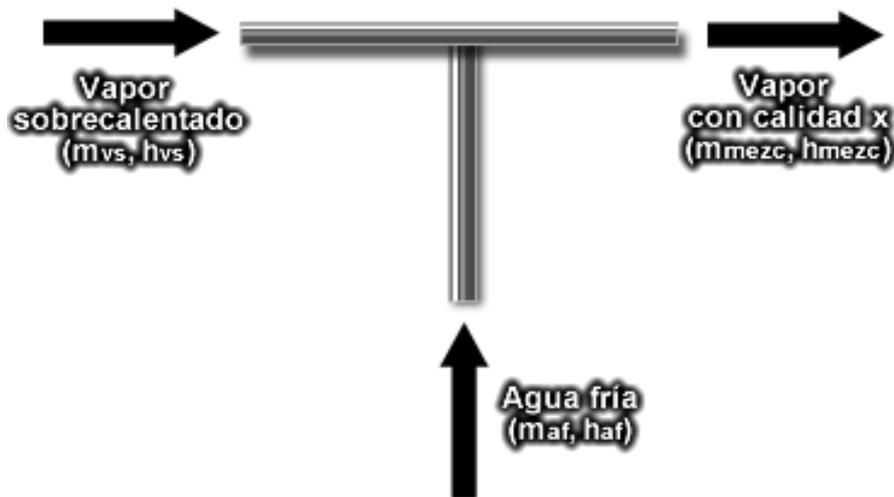


Figura 4. 30. Punto de mezcla de agua fría y vapor sobrecalentado para control de la calidad

4.11.2. Estrategia de control aplicada para la calidad del vapor

Para hacer el control de la calidad del vapor se plantearon inicialmente dos métodos: el primero fue el uso del calorímetro de estrangulación para medir la calidad y luego hacer los ajustes de los flujos; el segundo fue la aplicación del balance de masa y energía en el punto de mezcla. El primer método se probó, luego de hacer el montaje en el laboratorio, y no arrojó buenos resultados, lo cual se atribuye a los bajos flujos manejados, para los cuales las pérdidas de calor son muy representativas; los resultados obtenidos se muestran en el Apéndice A. Debido a lo anterior, se decidió implantar el segundo método.

La estrategia de control de la calidad del vapor se fundamentó en el balance de masa y energía en el punto de mezcla, estableciendo la relación de la calidad del vapor con los flujos de las dos corrientes y las entalpías.

Como se mostró anteriormente, al aplicar balance de masa y de energía en el punto de mezcla, se obtienen dos ecuaciones que relacionan la calidad del vapor húmedo (x) con la masa del vapor sobrecalentado (m_{vs}), la masa del agua fría (m_{af}) y las entalpías por unidad de masa, expresadas en la Ecuación (4.16) y Ecuación (4.17).

$$h_{mezc} = \frac{m_{vs}h_{vs} + m_{af}h_{af}}{m_{vs} + m_{af}} \quad (4.16)$$

$$h_{mezca} = h_l + x(h_g - h_l) \quad (4.17)$$

donde:

h_{mezca} es la entalpía por unidad de masa de la mezcla líquido-vapor o vapor húmedo

h_{vs} es la entalpía por unidad de masa del vapor sobrecalentado

h_g es la entalpía por unidad de masa del vapor saturado y se calcula en función de la temperatura de saturación (temperatura en la línea de la mezcla)

h_l es la entalpía por unidad de masa del líquido saturado y se calcula en función de la temperatura de saturación (temperatura en la línea de la mezcla)

h_{af} es la entalpía por unidad de masa del agua subenfriada

Por lo anterior, se estableció como objetivo controlar la calidad del vapor mediante el ajuste del flujo de agua fría, dado un flujo fijo de vapor sobrecalentado, por lo cual para el sistema de control se definen las siguientes variables:

- Variable controlada: calidad del vapor
- Variables medidas: temperatura del vapor sobrecalentado, presión en la línea del vapor sobrecalentado, temperatura del agua fría al llegar al punto de mezcla, presión en la línea del agua fría, flujo de agua entrando al evaporador, presión en las bombas, temperatura del agua en las bombas.
- Variables manipuladas: consigna del controlador de temperatura de la mezcla, flujo volumétrico de agua fría.

La estrategia de control de la calidad del vapor comprende el siguiente procedimiento:

- 1- Se calcula la temperatura de saturación correspondiente a la presión de la línea por donde fluye la mezcla líquido-vapor; esto es con el objetivo de garantizar la saturación para la mezcla. Esta temperatura de saturación se establece como la consigna para el controlador de temperatura en la línea de la mezcla.

2- Se calculan las entalpías h_l y h_g requeridas para la mezcla líquido-vapor, en función de la temperatura de saturación ya calculada.

3- Se calcula la entalpía requerida de la mezcla, h_{mezca} , para lograr la calidad del vapor deseada, mediante la Ecuación (4.18).

$$h_{mezca} = h_l + x(h_g - h_l) \quad (4.18)$$

h_l y h_g son las entalpías requeridas, calculadas en el paso 2.

4- Dado el flujo fijo de vapor sobrecalentado, se determina el flujo de agua fría necesario para obtener la entalpía requerida de la mezcla, h_{mezca} , mediante la Ecuación (4.19).

$$h_{mezca} = \frac{m_{vs}h_{vs} + m_{af}h_{af}}{m_{vs} + m_{af}} \quad (4.19)$$

La Ecuación (4.19) debe ajustarse de tal manera que, dado el flujo volumétrico del agua inyectada al evaporador, se calcule el flujo volumétrico de agua fría requerido en el punto de mezcla para obtener la calidad del vapor deseada. A partir de la Ecuación (4.19) se obtiene la Ecuación (4.20).

$$m_{af} = \frac{m_{vs}h_{vs} - h_{mezca}m_{vs}}{h_{mezca} - h_{af}} \quad (4.20)$$

Debido a que las bombas usadas en el laboratorio manejan flujo volumétrico, fue necesario hacer la conversión del flujo másico en flujo volumétrico, obteniéndose lo siguiente:

$$v_{af} = \frac{v_a d_a h_{vs} - h_{mezca} v_a d_a}{d_{af} (h_{mezca} - h_{af})} \quad (4.21)$$

donde:

v_{af} es el flujo volumétrico de agua fría inyectado en el punto de mezcla

v_a es el flujo volumétrico de agua inyectado al evaporador

d_a es la densidad del agua inyectada al evaporador y se calcula en función de la presión y la temperatura en la bomba

h_{vs} es la entalpía por unidad de masa del vapor sobrecalentado y se calcula en función de la presión y la temperatura en la línea de dicho vapor

d_{af} es la densidad del agua subenfriada y se calcula en función de la presión y la temperatura en la bomba

h_{af} es la entalpía por unidad de masa del agua subenfriada y se calcula en función de la presión y la temperatura en la línea del agua fría

La Ecuación (4.18), Ecuación (4.19) y Ecuación (4.21) fueron incluidas en el sistema de control de tal manera que se calcula el flujo volumétrico del agua fría cada segundo.

4.11.3. Cálculo de entalpías

El cálculo de las entalpías por unidad de masa se realizó según el estándar IAPWS IF -97 para propiedades del agua y del vapor, a través de una DLL disponible.

4.11.4. Puntos de operación

Los puntos de operación del sistema se establecen por el operador mediante la modificación de las consignas a través de la interfaz gráfica del sistema. Estos puntos de operación se determinan según las especificaciones de las pruebas a realizar en el equipo. Como se indicó antes, la temperatura de la mezcla se calcula en función de la presión de la línea para garantizar que dicha mezcla sea de vapor y líquido saturados. De esta manera, al variar la presión del sistema, la consigna del controlador de temperatura para la mezcla se ajusta automáticamente a la temperatura de saturación correspondiente a la presión dada.

4.12. Gestión de alarmas

El sistema dispone de una funcionalidad de gestión de alarmas para garantizar la seguridad del equipo y de los operadores. A continuación se describen los indicadores de alarma del sistema.

4.12.1. Indicadores de alta temperatura

Cuando alguna de las temperaturas supera el valor máximo permitido de 500 °C, el sistema genera una alarma visual y de sonido. Ante una alarma, el indicador de temperatura correspondiente, visible en la interfaz del operador, cambia de color de forma intermitente. La alarma se puede generar ya sea porque la temperatura ha superado el valor máximo establecido o porque el termopar ha sufrido algún daño.

Cuando se produce una alarma por alta temperatura, el sistema apaga automáticamente las mantas de las zonas correspondientes a la alta temperatura; esto es con el objetivo de garantizar las condiciones de seguridad de la planta y del personal que la opera.

4.12.2. Indicadores de baja y alta presión

Cuando la presión en alguna de las líneas del sistema supera los 2 000 psig o está por debajo de los valores permitidos, el sistema genera una alarma y, de manera similar a la alarma por altas temperaturas, el indicador de presión correspondiente cambia de color en la interfaz gráfica del operador. En caso de alarma por alta presión, las bombas se apagan automáticamente.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas del sistema de control y adquisición de datos, desarrollado según la metodología descrita en el capítulo anterior.

5.1. Análisis del modelo del sistema de generación de vapor sobrecalentado

Como se explicó en el capítulo anterior, la modelación del sistema se hizo en lazo cerrado, obteniéndose inicialmente la función de transferencia del sistema en lazo cerrado y luego la función de transferencia del sistema en lazo abierto. A continuación se estudia la estabilidad del sistema en lazo abierto a partir de la función de transferencia obtenida.

5.1.4. Estabilidad del sistema en lazo abierto

La función de transferencia del evaporador en lazo abierto está dada por la Ecuación (5.1):

$$G(s) = \frac{K}{Tw^2 K_p s^2 + 2Zeta Tw K_p s + K_p - KK_p} \quad (5.1)$$

donde,

$$K = 0,9987$$

$$Tw = 49,135 \text{ s/rad}$$

$$Zeta = 1,4465$$

$$K_p = 5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$$

Los polos en lazo abierto están ubicados en $S = -0,0589$ y $S = -9,1 \cdot 10^{-6}$, siendo este último el polo dominante. Dado que los dos polos del sistema están en el semiplano izquierdo del plano S , entonces el sistema es estable en lazo abierto. Con el polo dominante $S = -9,1 \cdot 10^{-6}$ se puede calcular el tiempo de asentamiento aproximado del sistema en lazo abierto como $ts = 5 * T$ (criterio del 0,7 %), con la constante de tiempo $T = 1/9,1 \cdot 10^{-6}$ s, obteniéndose que el tiempo de asentamiento es de 549 450 segundos.

En la Figura 5.1 se puede apreciar la respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada escalón unitario. Como se puede apreciar, el sistema es estable en lazo abierto y su tiempo de asentamiento es muy grande, como se calculó anteriormente.

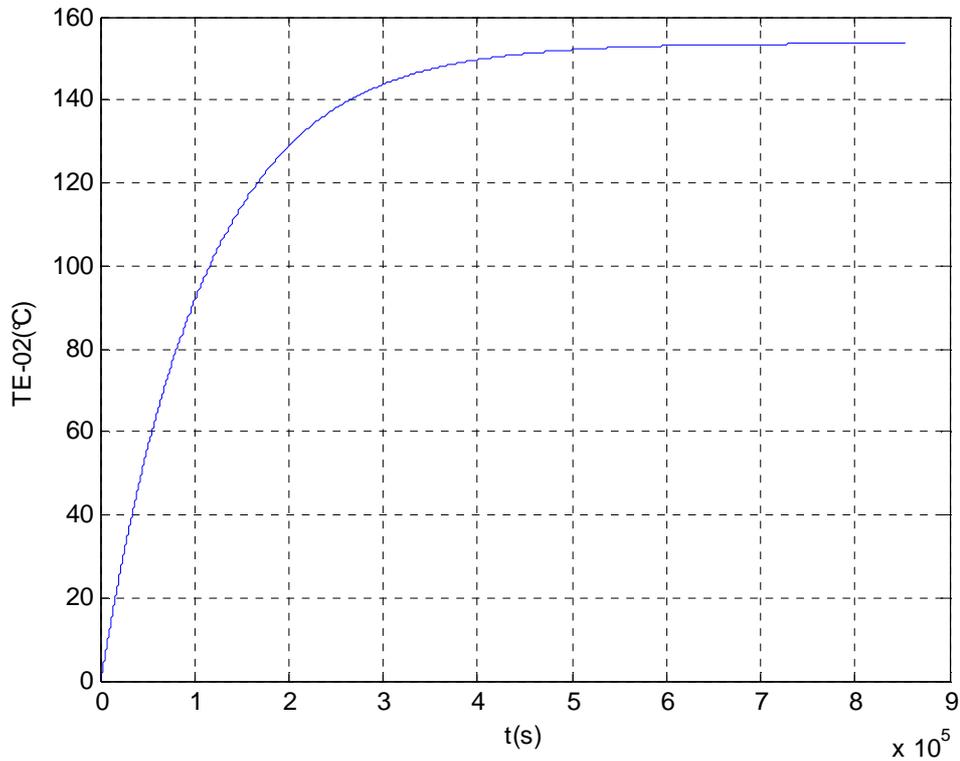


Figura 5. 1. Respuesta simulada del evaporador

5.2. Pruebas de los sistemas de control de temperaturas

5.2.1. Sistemas de control de la temperatura en el evaporador

A continuación se muestran los resultados obtenidos al implantar los dos esquemas de control diseñados para el evaporador: el sistema de control proporcional- integral y el sistema de control difuso.

5.2.1.1. Sistema de control proporcional- integral para TE-02

Dado que el sistema de control PI diseñado y simulado en el capítulo anterior muestra una respuesta simulada satisfactoria para el control de la temperatura en el evaporador, se hizo la implantación del controlador en el sistema real. La respuesta del sistema real se muestra

en la Figura 5.2, donde se muestra la consigna o *setpoint* del controlador en color rojo y la respuesta del sistema en color azul. Como se aprecia en la Figura 5.2, la respuesta del sistema en el estado estable se mantiene dentro del rango o tolerancia permisible de 2 %. El tiempo de asentamiento (criterio del 2 %) con este controlador es de aproximadamente 406 s y el sobrepaso máximo es de 1 %.

Dados los resultados anteriores, se comprobó que el sistema de control proporcional-integral implantado en el evaporador, con parámetros $K_{p_c} = 14,5348$ y $K_i = 0,0484$, logró satisfacer las especificaciones deseadas de tiempo de asentamiento menor que 500 s y sobrepaso máximo menor que 3 %. El controlador PI implantado logra un buen desempeño en el sistema de generación de vapor de la unidad de inyección alterna de vapor, lo cual demuestra la validez de la técnica aplicada en el diseño del controlador.

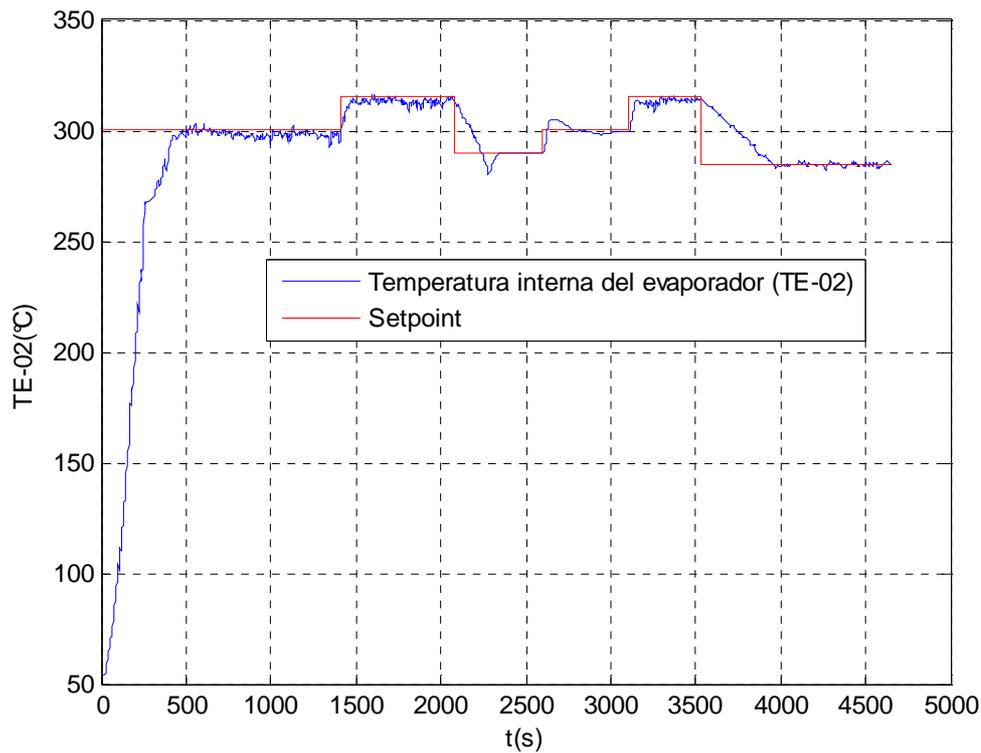


Figura 5. 2. Respuesta del evaporador con el controlador PI

5.2.1.2. Sistema de control difuso para TE-02

A continuación se muestran los resultados obtenidos al implantar el sistema de control difuso en el evaporador. En la Figura 5.3 y Figura 5.5 se muestra el comportamiento de la temperatura interna del evaporador durante dos pruebas realizadas; en la Figura 5.4 y Figura 5.6 se muestran las señales de control respectivas.

Como se puede apreciar en la Figura 5.3 de la prueba 1, la respuesta del sistema en el estado estable se mantiene dentro del rango o tolerancia permisible de 2 %. El tiempo de asentamiento (criterio del 2 %) con este controlador es de aproximadamente 940 s y el sobrepaso máximo es de 3 % (temperatura máxima de 309 °C).

En la Figura 5.5 se muestra la respuesta del sistema ante un cambio de consigna, apreciándose una buena respuesta con un sobrepaso máximo y un error en el estado estable muy pequeños.

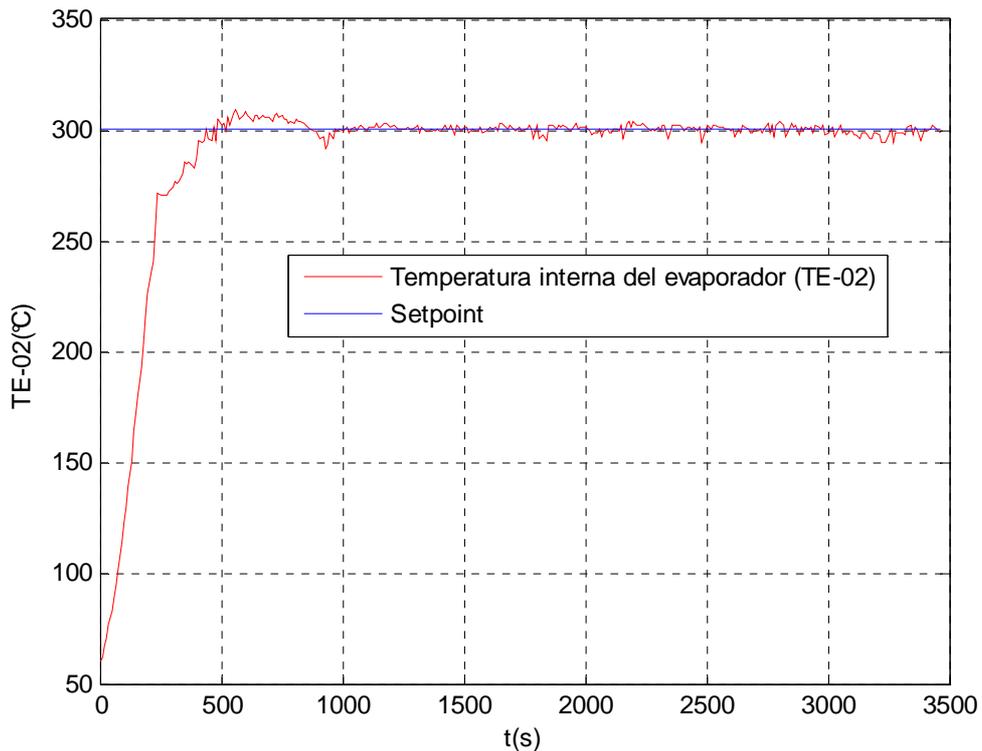


Figura 5. 3. Respuesta del evaporador con el controlador difuso (prueba 1)

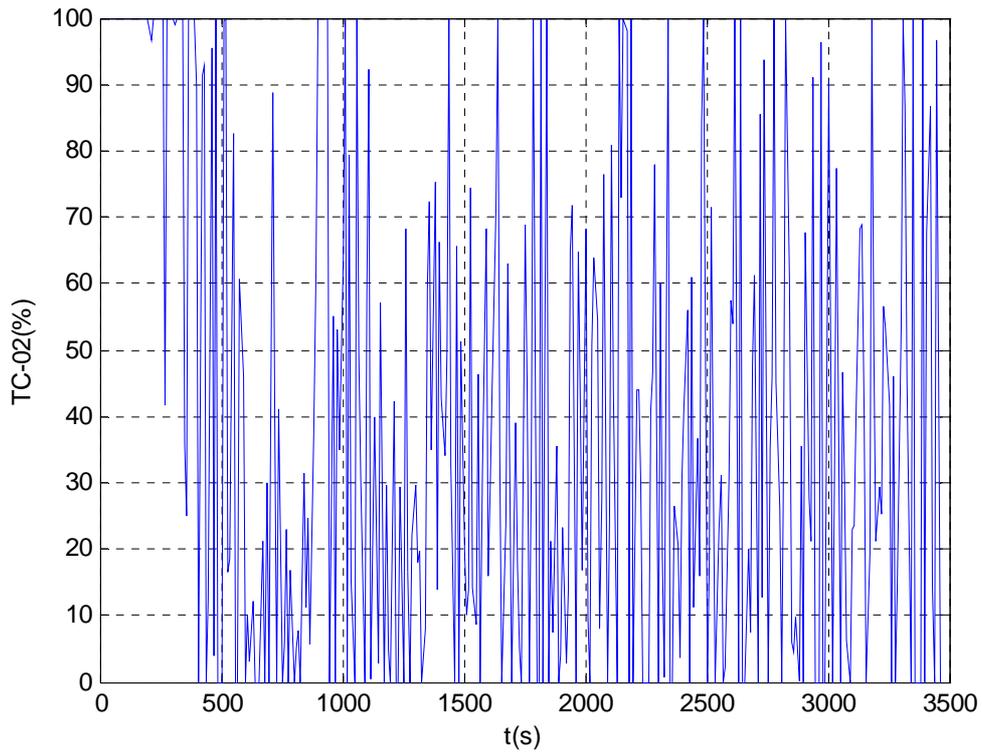


Figura 5. 4. Señal de control para el evaporador con el controlador difuso (prueba 1)

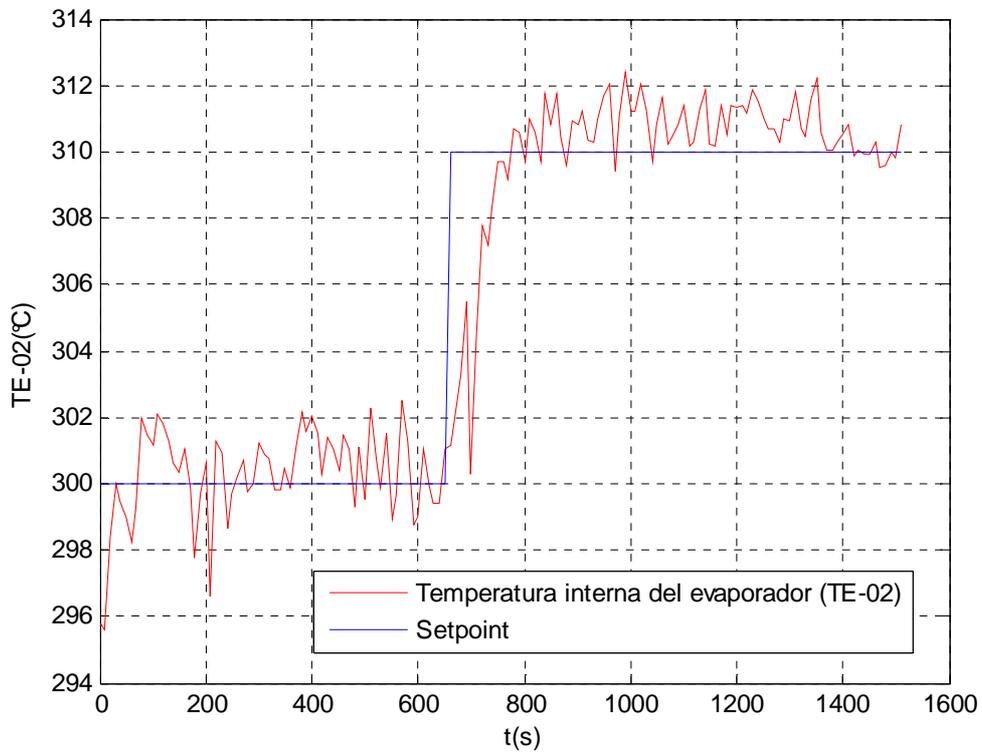


Figura 5. 5. Respuesta del evaporador con el controlador difuso (prueba 2)

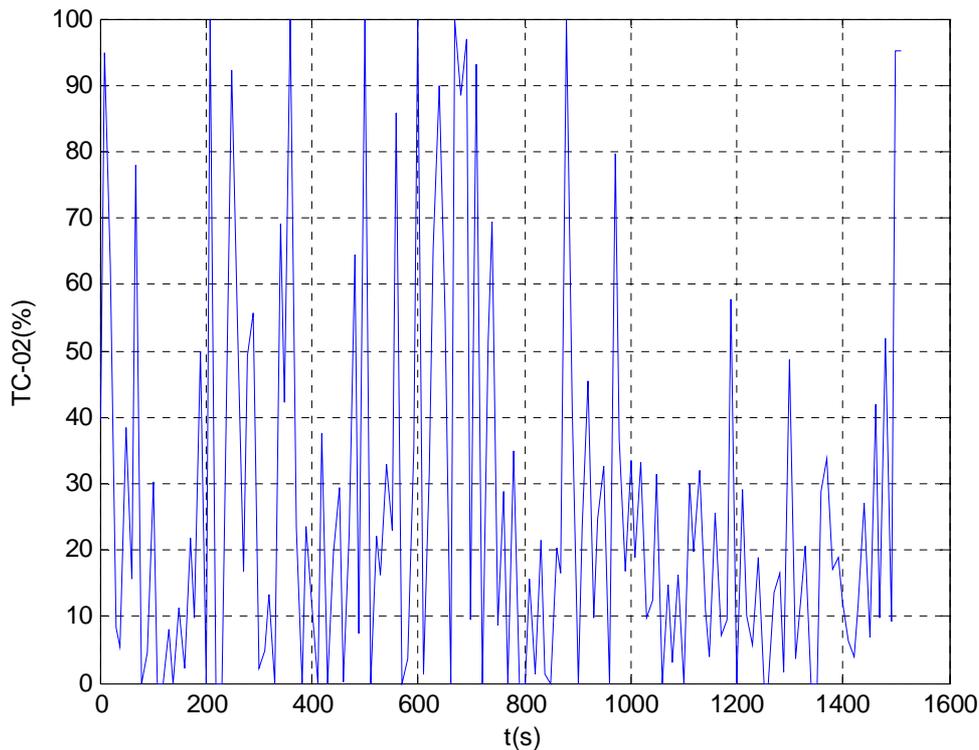


Figura 5. 6. Señal de control para el evaporador con el controlador difuso (prueba 2)

Al comparar los resultados obtenidos con el controlador PI y el controlador difuso para el evaporador, se aprecia que con controlador PI el sistema tiene un mejor desempeño, lográndose un menor tiempo de asentamiento y menor sobrepaso máximo, sin embargo, ambos controladores logran cumplir las especificaciones mínimas requeridas. Lo anterior demuestra la ventaja que ofrece conocer el modelo matemático del sistema para el diseño de los controladores mediante técnicas conocidas, pues el controlador PI diseñado a partir del modelo matemático logró superar satisfactoriamente las especificaciones mínimas.

5.2.2. Sistema de control de la temperatura en línea de vapor sobrecalentado (TE-04)

En la Figura 5.7 y Figura 5.9 se muestran los resultados obtenidos para la temperatura TE-04 durante dos pruebas con el controlador difuso; en la Figura 5.8 y 5.10 las señales de control. Como se aprecia en la Figura 5.9, el error máximo en estado estable para la prueba 2 es de 4 %, el tiempo de asentamiento (criterio del 5 %) es de aproximadamente 500 s y el sobrepaso máximo es de 13,4 % (temperatura máxima de 338 °C). En la Figura 5.7 de la prueba 1 se aprecia un error máximo en estado estable por debajo del 2 %.

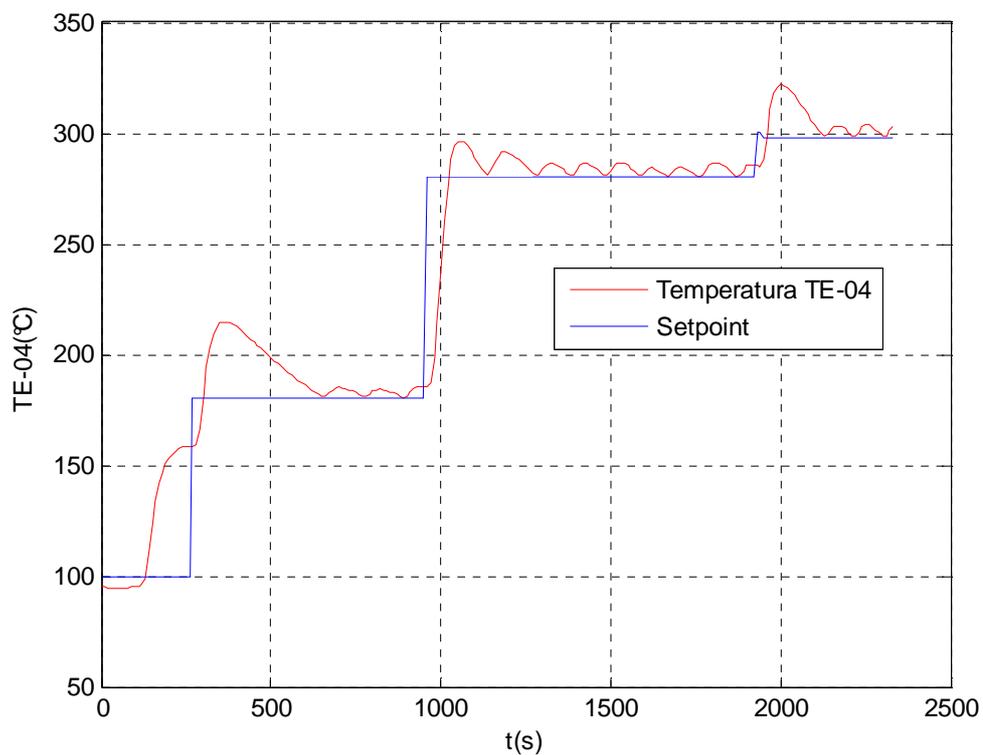


Figura 5. 7. Respuesta del sistema para TE-04 con el controlador difuso (prueba 1)

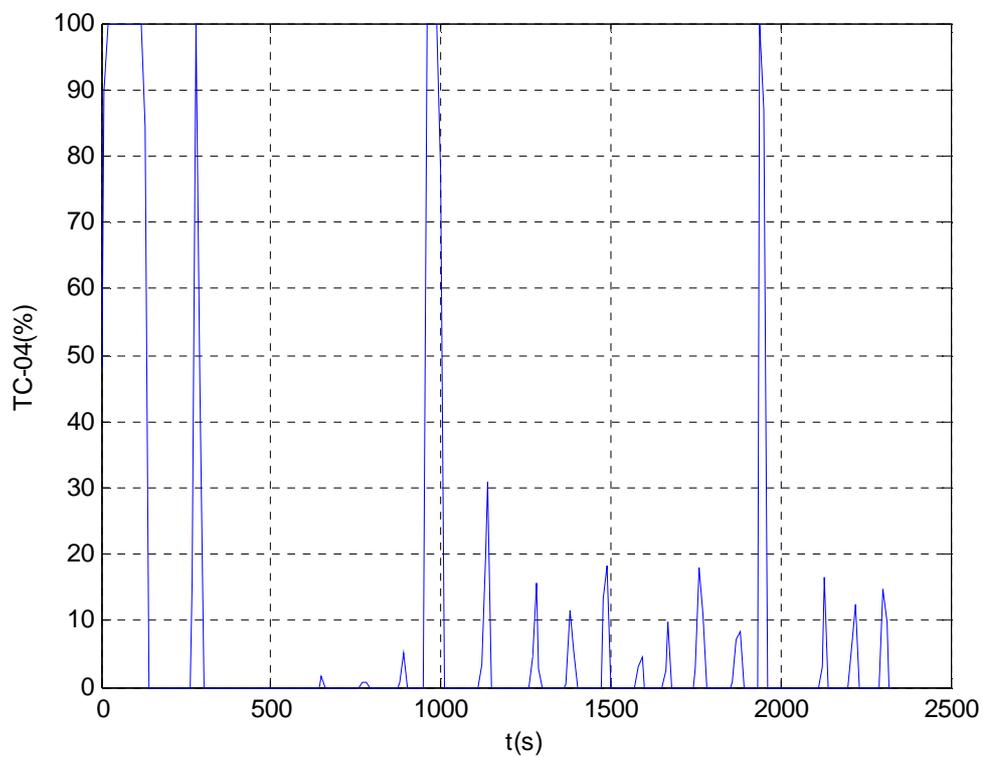


Figura 5. 8. Señal de control TC-04 (prueba 1)

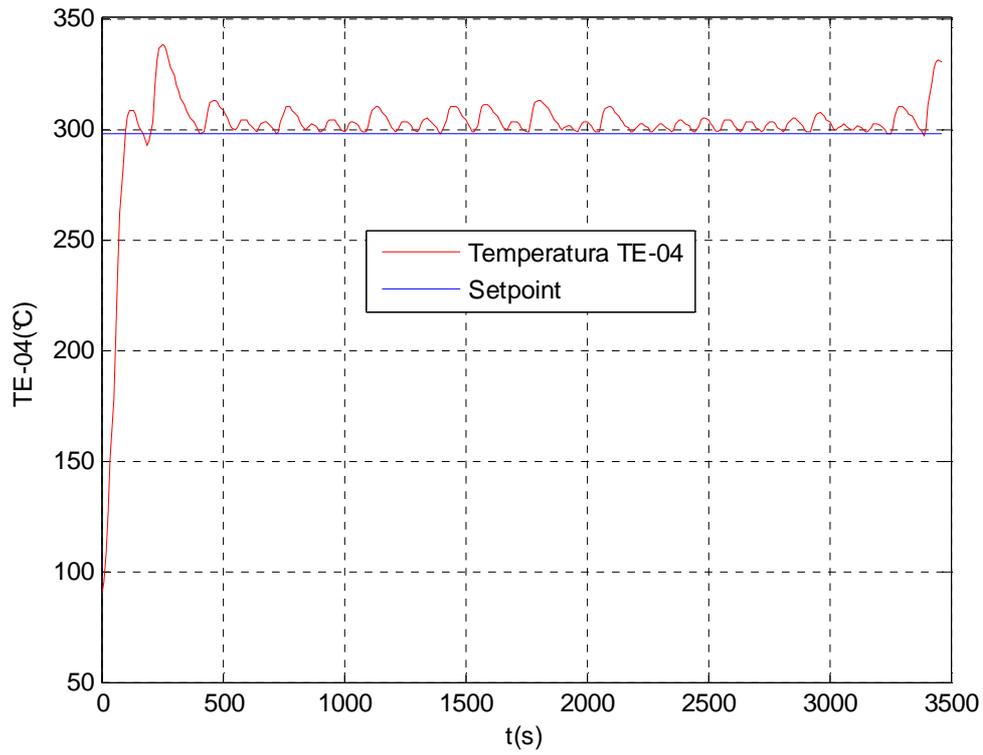


Figura 5. 9. Respuesta del sistema para TE-04 con el controlador difuso (prueba 2)

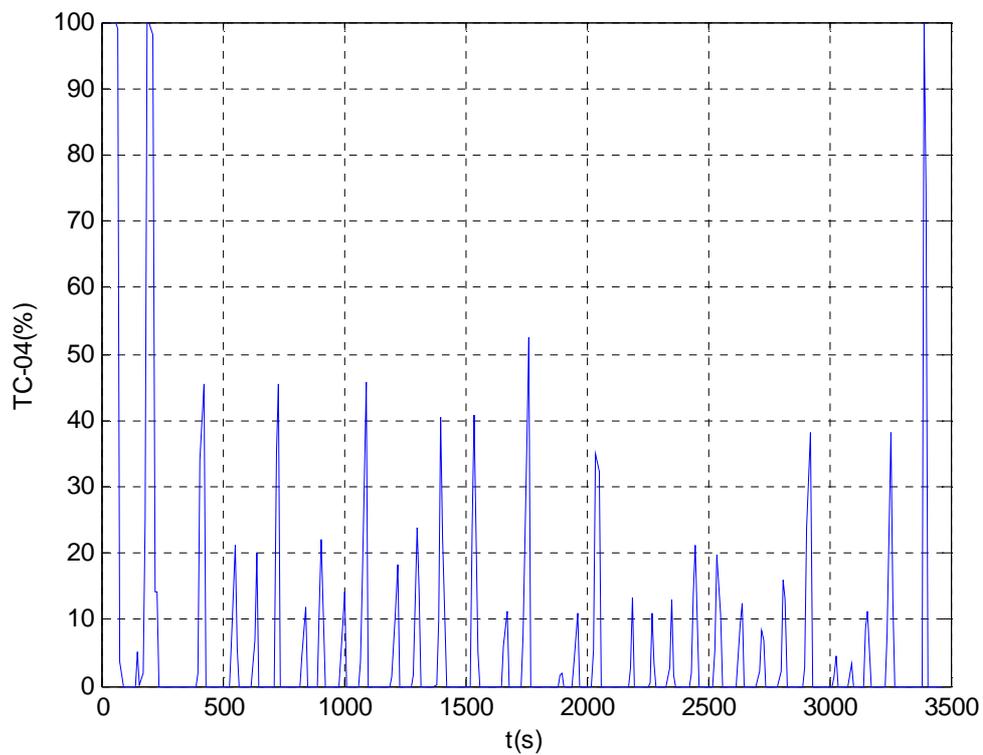


Figura 5. 10. Señal de control TC-04 (prueba 2)

5.2.3. Sistema de control de la temperatura en la línea de la mezcla (TE-05)

Los resultados obtenidos para TE-05 con el controlador difuso se muestran en la Figura 5.11 y Figura 5.13; las respectivas señales de control se muestran en la Figura 5.12 y Figura 5.14. El tiempo de asentamiento (criterio del 2%) se aprecia en la Figura 5.13, correspondiente a la prueba 2, y es de 920 s aproximadamente. El sobrepaso máximo observado en la prueba 2 es de 3,2 %. Como se puede apreciar, la respuesta del sistema en estado estable se mantiene dentro del rango o tolerancia permisible de 2 %.

En la Figura 5.11 se muestra la respuesta del sistema ante cambios de consigna, observándose una buena respuesta, pues el error en estado estable es muy pequeño al igual que el sobrepaso máximo.

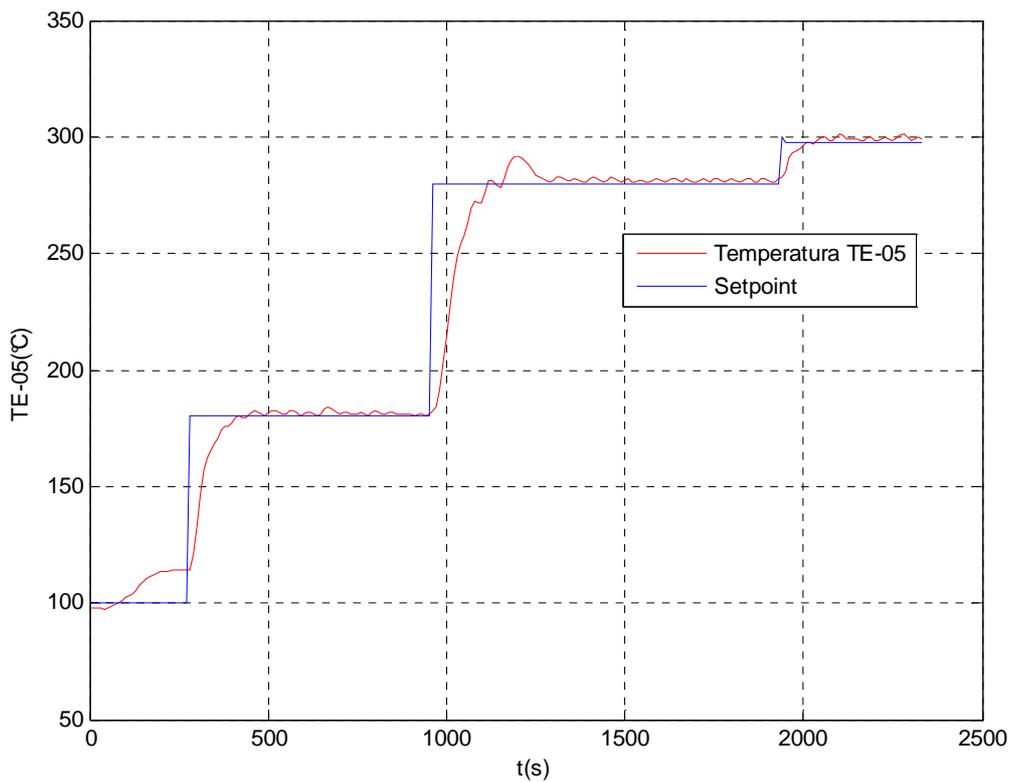


Figura 5. 11. Respuesta del sistema para TE-05 con el controlador difuso (prueba 1)

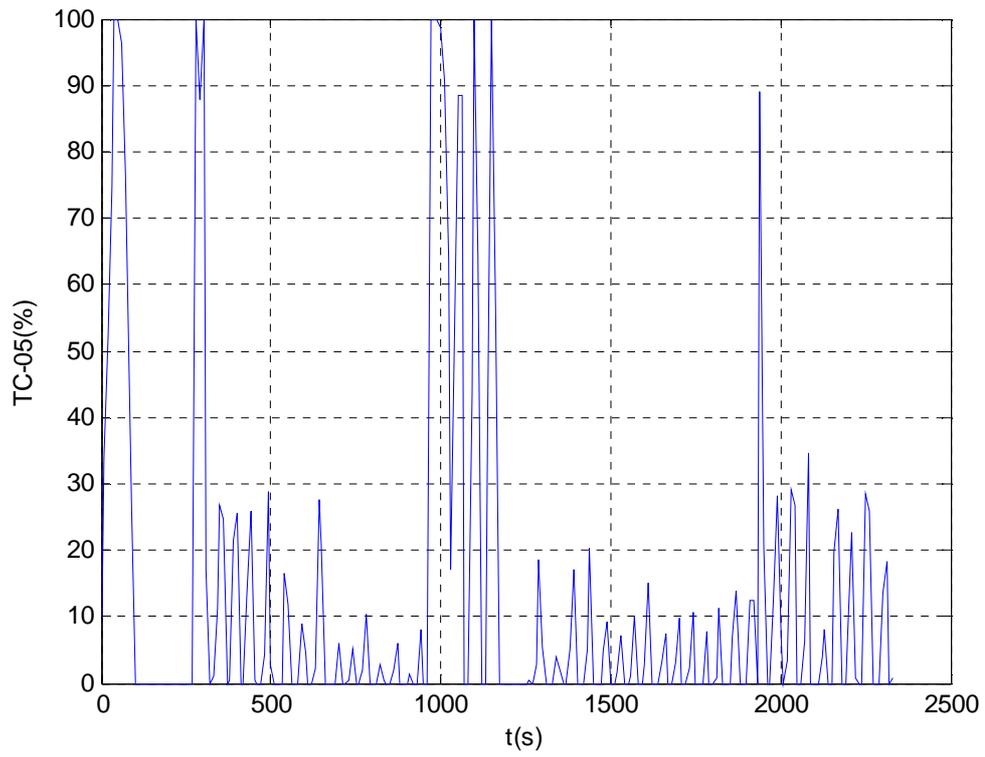


Figura 5. 12. Señal de control TC-05 (prueba 1)

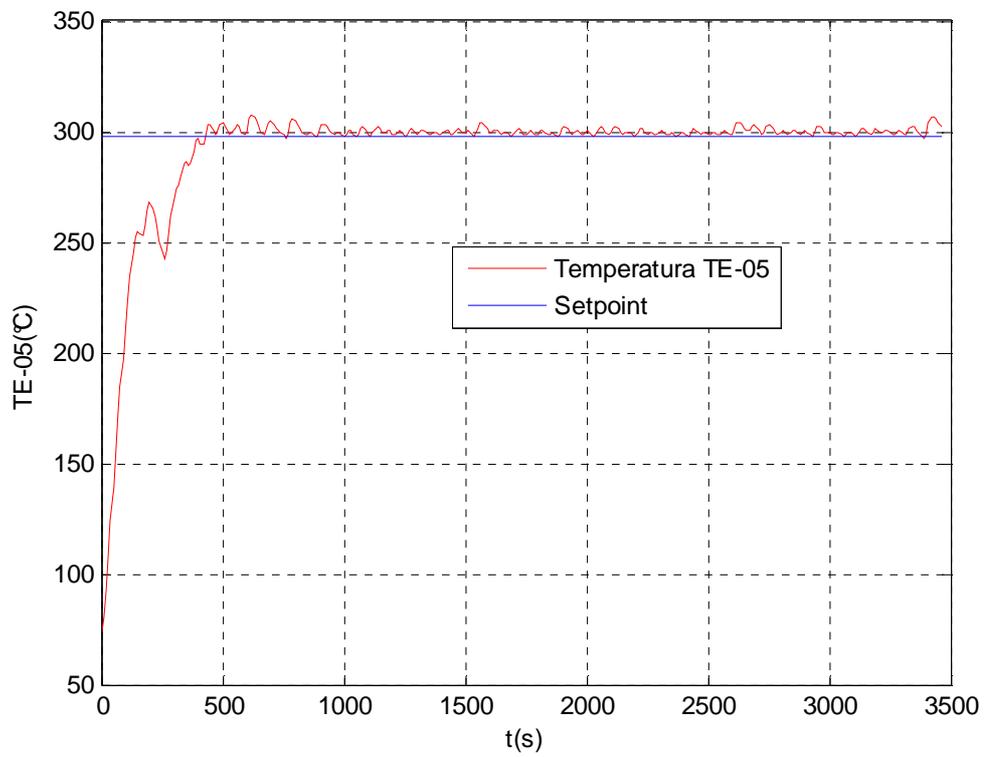


Figura 5. 13. Respuesta del sistema para TE-05 con el controlador difuso (prueba 2)

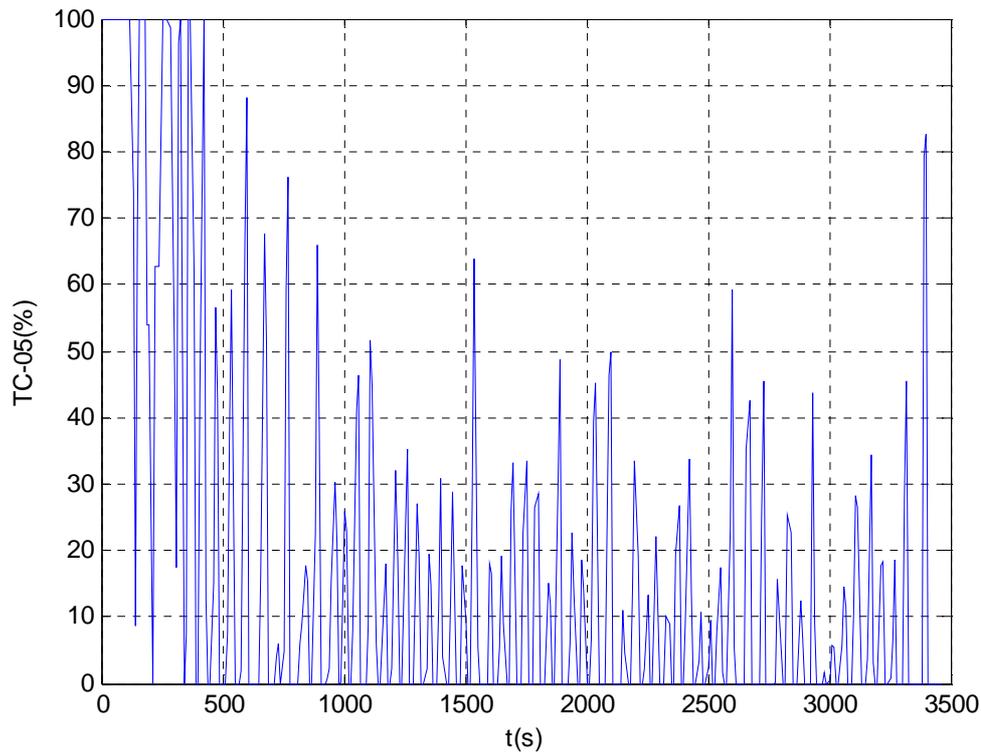


Figura 5. 14. Señal de control TC-05 (prueba 2)

5.2.4. Sistema de control de la temperatura en la celda (TE-13 y TE-14)

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos en una prueba con un ciclo de inyección en la celda. Durante la prueba se inyectó a la celda una cantidad de vapor equivalente a un volumen de 130 ml de agua a 30 °C.

Como se aprecia en la Figura 5.15, el perfil de temperaturas en la celda es satisfactorio, indicando que las pérdidas de calor fueron compensadas de buena manera por las mantas dispuestas en la celda. Como se aprecia en la Figura 5.15, los puntos inferiores de la celda alcanzan mayor temperatura que los superiores y esto se debe a la propagación lenta del calor en el medio poroso desde su entrada (parte inferior) hasta su salida (parte superior).

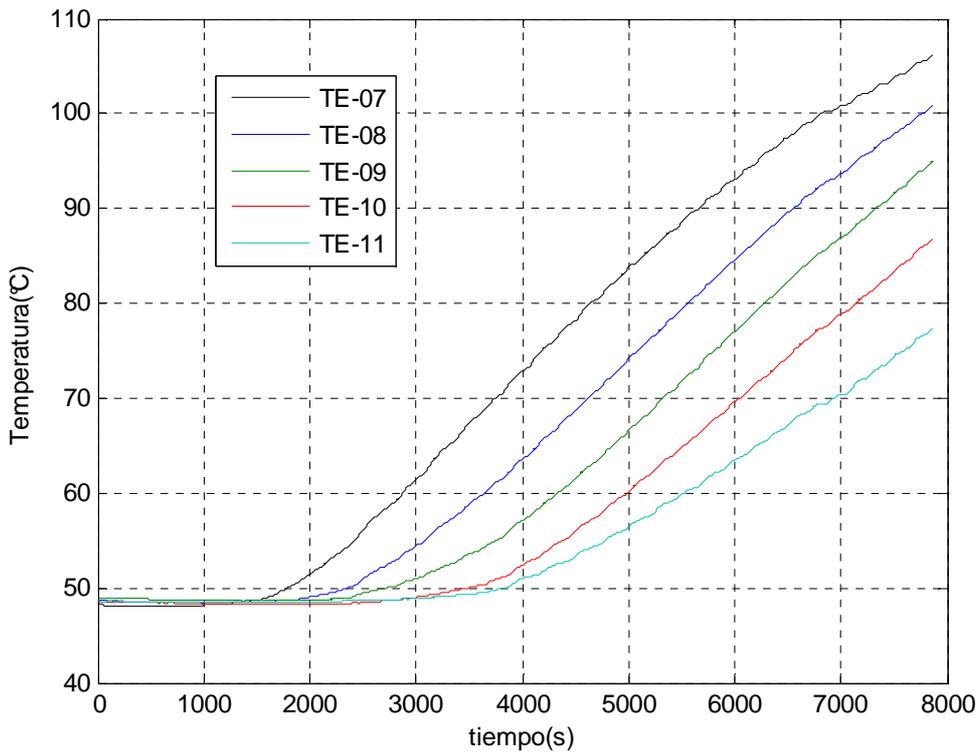


Figura 5. 15. Perfil de temperaturas en la celda

En la Figura 5.16 se observa la respuesta de los sistemas de control difusos implantados para las mantas alrededor de la celda. Se aprecia que las consignas para TE-13 y TE-14 (denotadas por SP-13 y SP-14), ubicadas 1 °C por debajo de de TE-07 y TE-09, respectivamente, son seguidas exitosamente por el sistema, con un error máximo de 4 %. Al observar las oscilaciones que presentan las temperaturas externas de la celda, TE-13 y TE-14, y compararlas con las temperaturas en el interior de la celda de la Figura 5.15, se aprecia que las mantas no alteran el perfil de temperaturas natural, pues las temperaturas internas no presentan las oscilaciones.

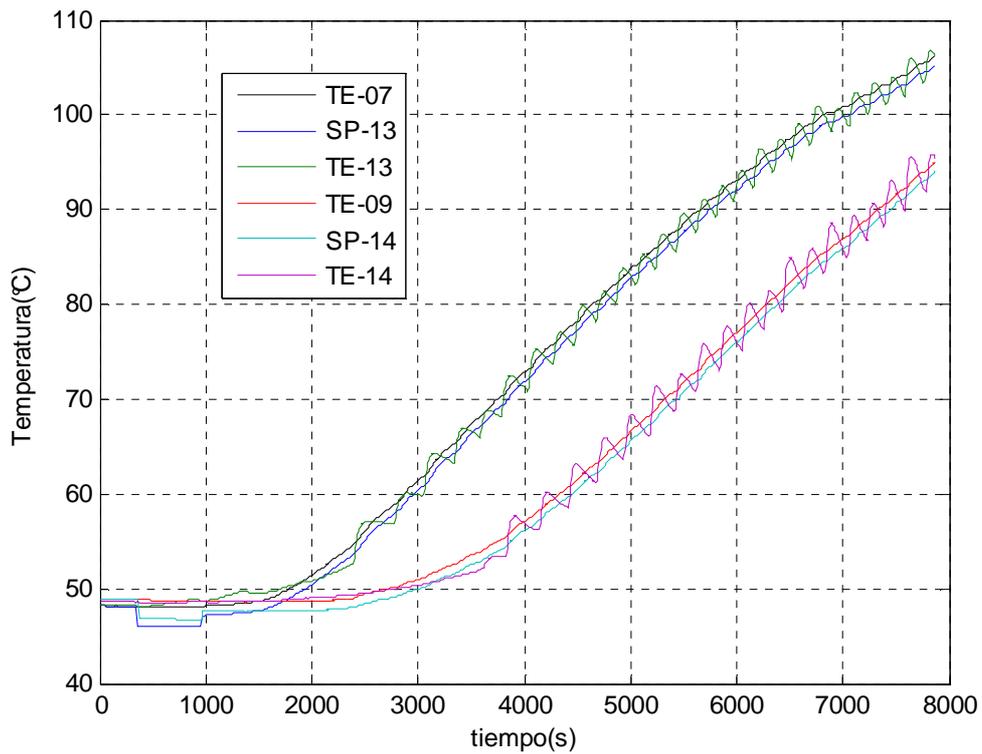


Figura 5. 16. Respuesta del sistema de control en la celda

En la Figura 5.17 se muestra la respuesta de los sistemas de control difusos en la celda con sus respectivas señales de control. Como se aprecia en la Figura 5.17, el control es muy pequeño, lo cual se debe a la gran rapidez de respuesta del sistema y a que la consigna aumenta muy lentamente, con la misma lentitud que aumenta la temperatura en el interior de la celda.

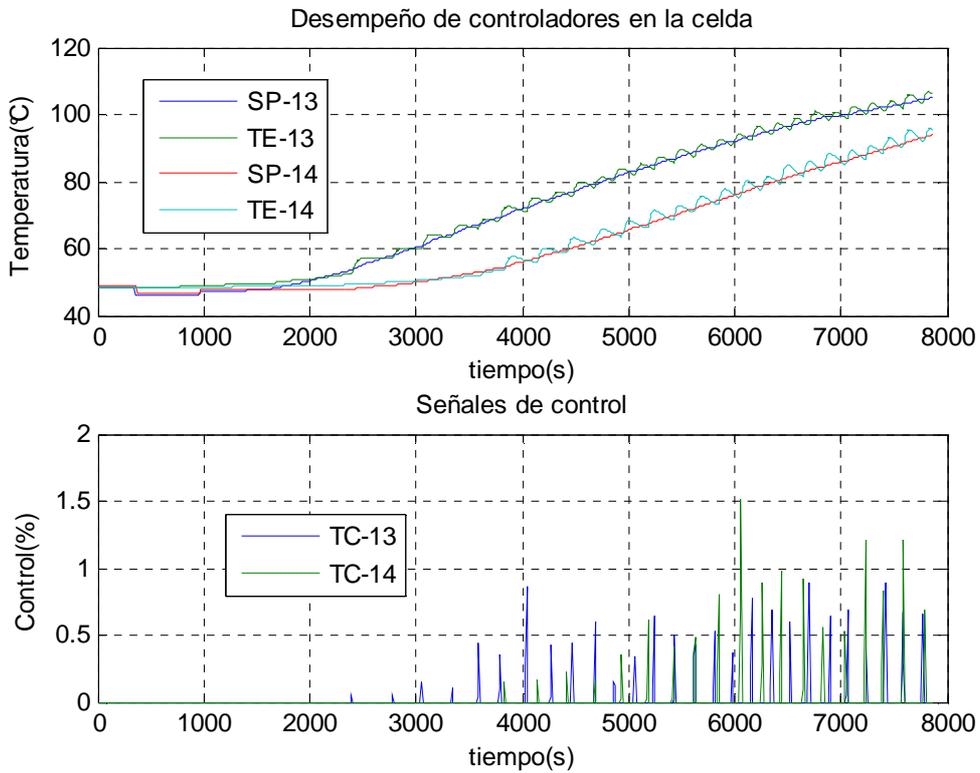


Figura 5. 17. Señales de control para los controladores en la celda

5.3. Pruebas del sistema de control de la calidad del vapor

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante una prueba del sistema de control de la calidad del vapor. En la prueba realizada se mantuvo la presión del sistema casi constante, así como la temperatura del vapor sobrecalentado y del agua fría. Esto fue con el objetivo de analizar posteriormente el comportamiento de los flujos sin la influencia de estas variables. En la Figura 5.18 se muestra el comportamiento de la temperatura del vapor sobrecalentado y la presión, observándose que se mantuvieron casi constantes, con pequeñas variaciones debidas a la dinámica de la planta en sí.

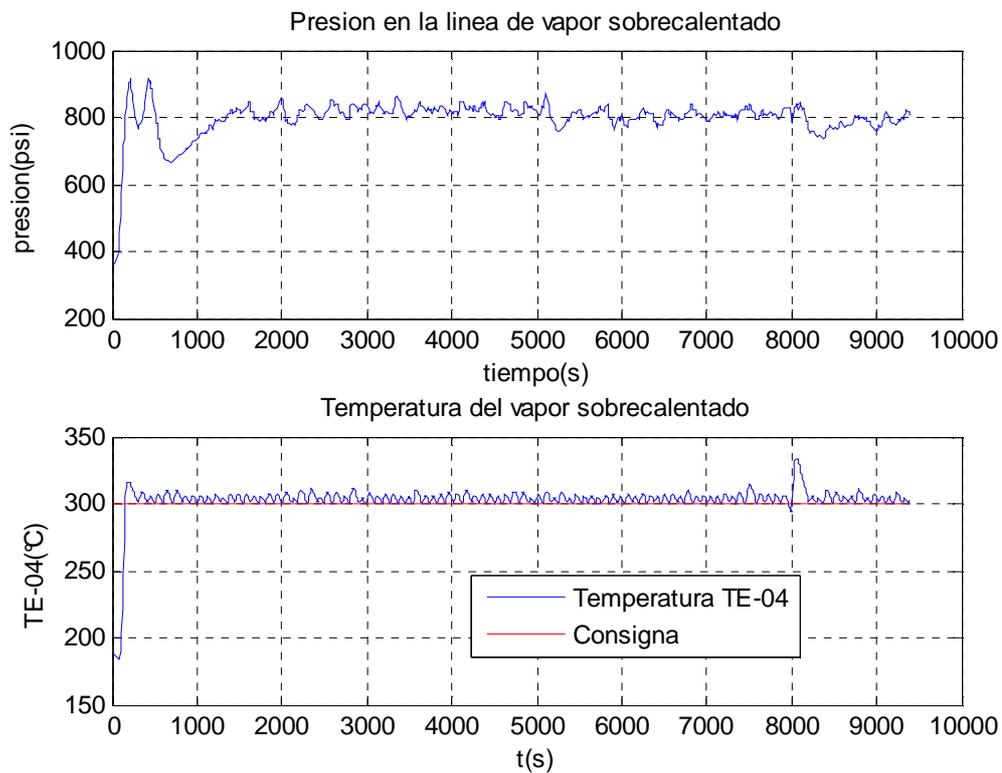


Figura 5. 18. Comportamiento de la presión y la temperatura del vapor sobrecalentado

En la Figura 5.19 se muestra la variación de la temperatura de saturación en función de la presión en la línea de la mezcla. Esta temperatura de saturación, calculada en función de la presión, se usa como consigna para el controlador de la temperatura en la línea de la mezcla, denotada por TE-05; en la Figura 5.20 se muestra la respuesta del sistema de control de la temperatura.

Como se puede apreciar en la Figura 5.20, el sistema de control de la temperatura en la línea de la mezcla, denotada por TE-05, responde satisfactoriamente a cambios en la consigna determinados por los cambios en la presión de la línea.

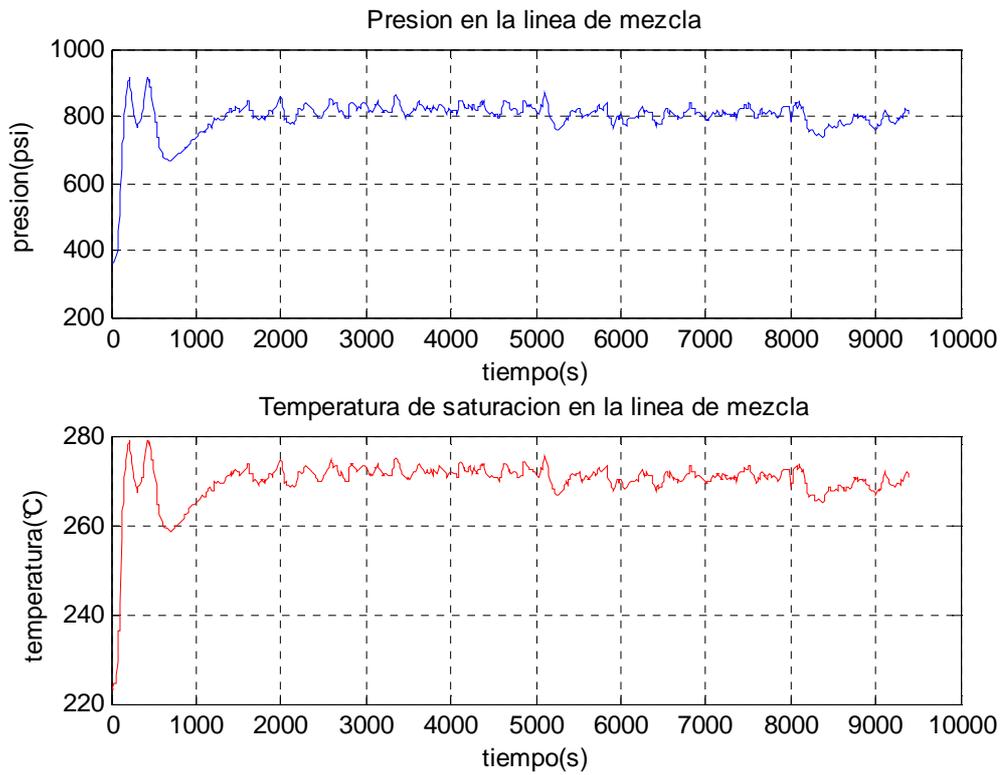


Figura 5. 19. Relación entre la presión y la temperatura de saturación

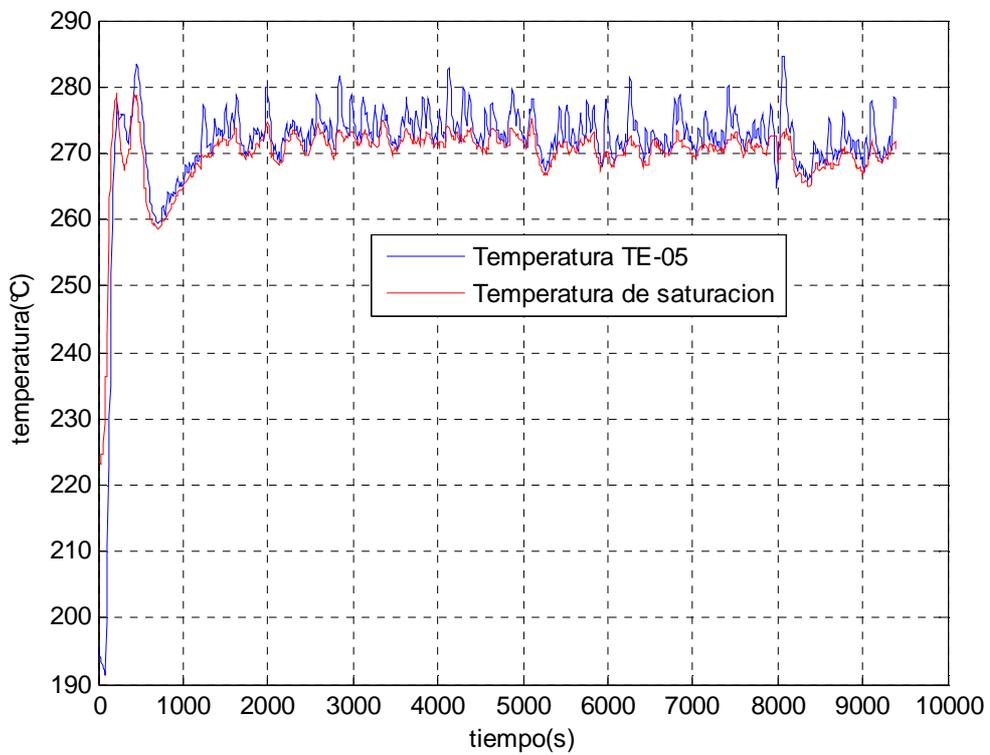


Figura 5. 20. Respuesta del sistema de control de temperatura para TE-05

El comportamiento de las entalpias del líquido saturado (h_l) y del vapor saturado (h_g) presentes en la mezcla se muestra en la Figura 5.21. Se observa que h_l y h_g permanecen casi constantes, y esto se debe a que la temperatura de la mezcla, TE-05, no varía en gran medida.

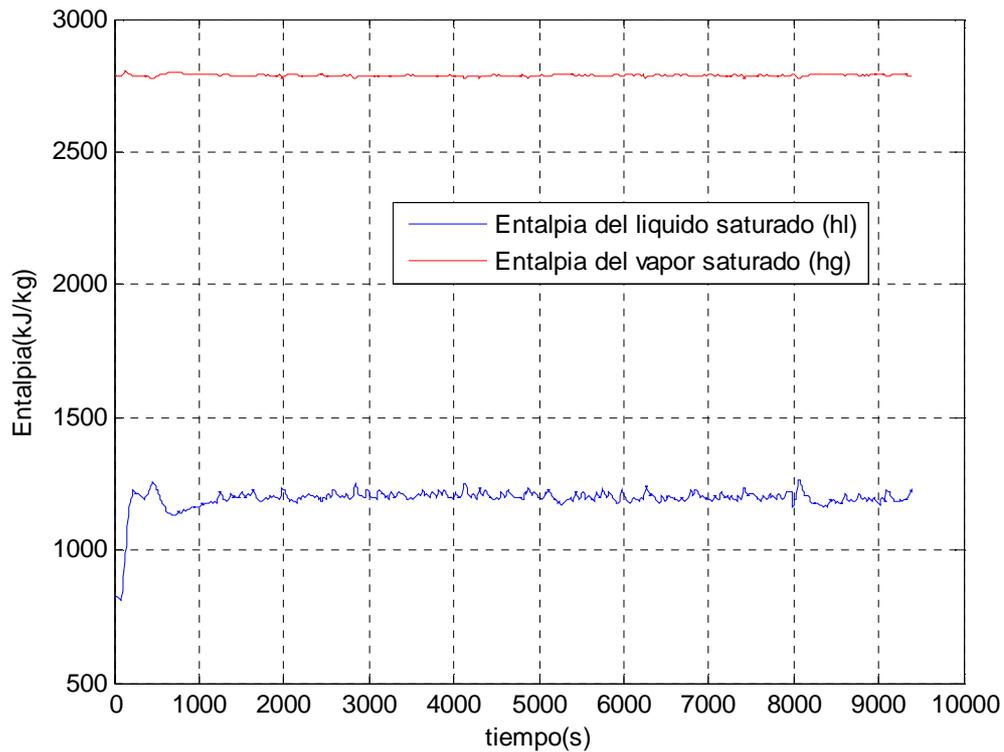


Figura 5. 21. Entalpias del líquido saturado y vapor saturado en la mezcla

En la Figura 5.22 se muestra como varía la entalpía por unidad de masa deseada para la mezcla en función de la consigna de la calidad del vapor. Como se aprecia, una calidad del vapor alta corresponde a una entalpía alta y esto se debe a que la presencia de mayor cantidad de vapor saturado en la mezcla implica mayor cantidad de energía.

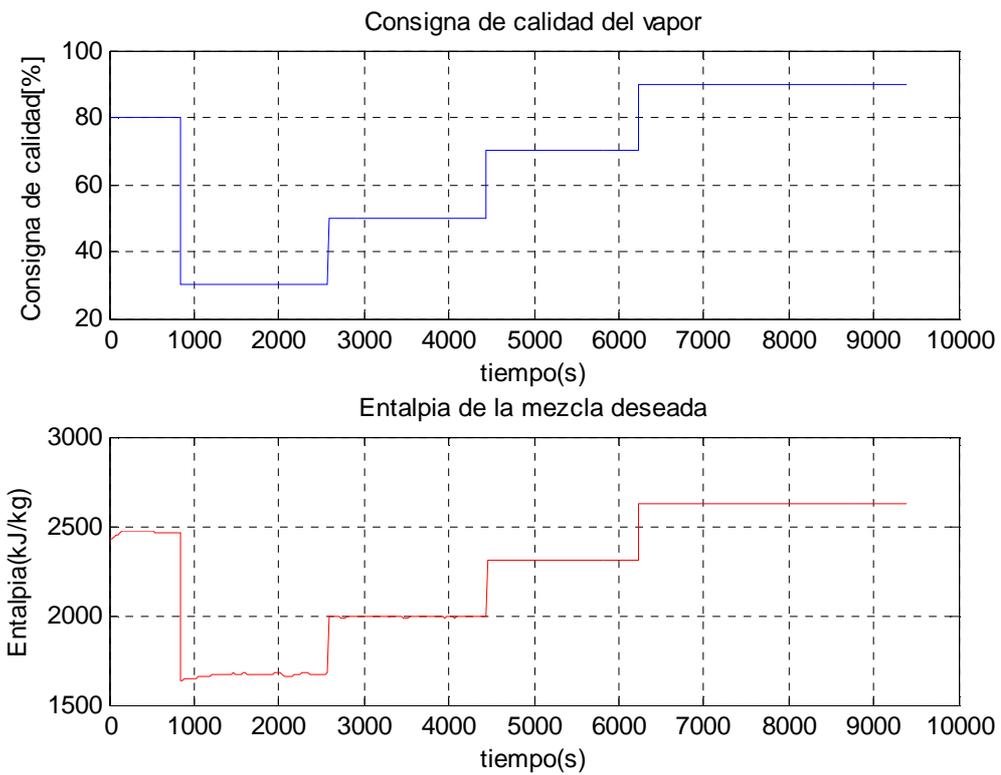


Figura 5. 22. Relación entre la calidad del vapor y la entalpía

En la Figura 5.23 se muestra la respuesta del sistema en relación a la entalpía de la mezcla. Como se aprecia en dicha figura, la respuesta del sistema es muy rápida, lográndose rápidamente la calidad del vapor deseada.

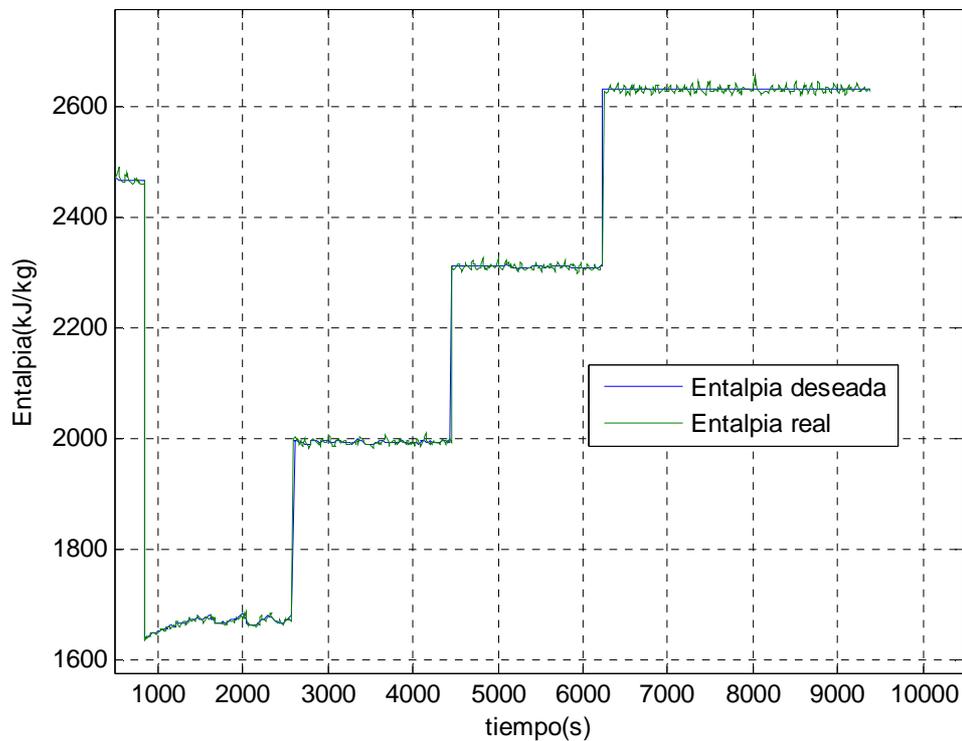


Figura 5. 23. Respuesta del sistema de control de la calidad para las entalpías

En la Figura 5.24 se muestra la variación del flujo de agua fría en función de la calidad del vapor, dado un flujo de agua entrando al evaporador que fija el operador. Como se observa en la Figura 5.24, el flujo de agua fría varía según la calidad del vapor, siendo este flujo menor para mayor calidad, lo cual tiene sentido, pues al agregar menor cantidad de agua fría a la mezcla se está agregando menor cantidad de líquido y la calidad del vapor húmedo aumenta si disminuye la presencia de líquido en la mezcla. Es importante destacar que durante la prueba realizada el vapor sobrecalentado y el agua fría se mantuvieron a presiones y temperaturas casi constantes.

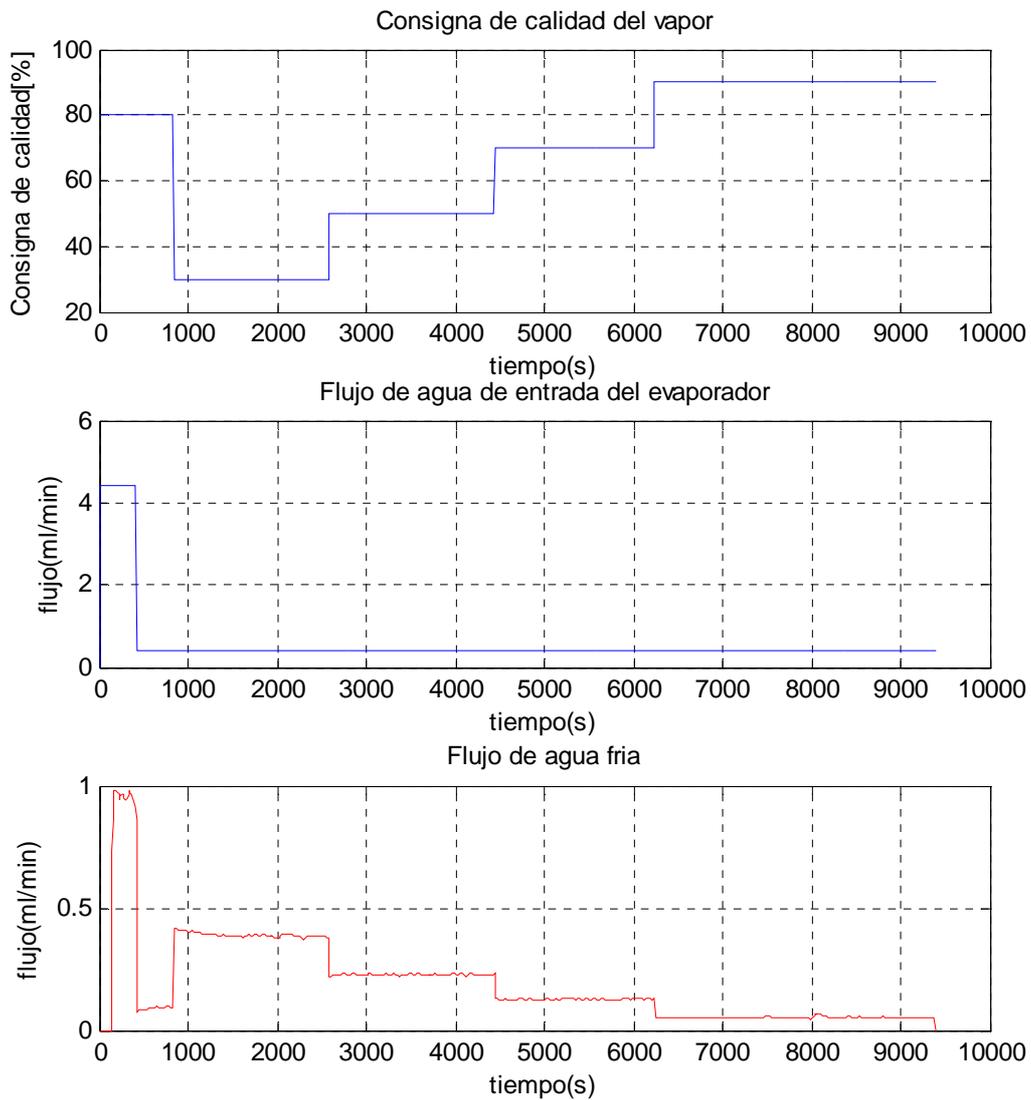


Figura 5. 24. Relación entre el flujo de agua fría y la calidad del vapor requerida

Como se aprecia en la Figura 5.24, el flujo de agua fría presenta una pequeña variación en estado estable y ésta se debe a la variación que presentan la temperatura y la presión de la mezcla y de las dos corrientes (agua fría y vapor sobrecalentado), mostrando que el sistema de control hace los correctivos necesarios en el flujo de agua fría para lograr la calidad deseada.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Aunque existen varias técnicas de modelación de sistemas mediante la identificación, la técnica de identificación en lazo cerrado, aplicada al sistema de generación de vapor de la unidad de inyección alterna de vapor, mostró ser la más adecuada para este proceso, permitiendo obtener un modelo muy aproximado del sistema real en lazo abierto.

En procesos para los cuales es muy difícil o imposible conocer el modelo matemático, o cuando el modelo matemático no es fijo por modificaciones frecuentes de la planta, es posible aplicar una técnica de control que es de fácil ajuste de parámetros y no requiere el modelo matemático del sistema, conocida como control difuso. El control difuso aplicado a las temperaturas de las líneas del sistema, el evaporador y la celda mostró muy buen desempeño, logrando un sobrepaso máximo de 3 % en la mayoría de los casos y un error máximo en estado estable de 4 %. Además, con el control difuso se logró obtener tiempos de asentamiento pequeños.

En el caso del evaporador, se mostró que el control PI diseñado a partir del modelo matemático del sistema arrojó mejores resultados que el control difuso, lo cual demuestra la ventaja de conocer el modelo matemático del sistema al momento de diseñar y entonar los controladores.

Durante el diseño de los controladores difusos con la arquitectura usada en la unidad de inyección alterna de vapor, debe tomarse en cuenta la rapidez de respuesta del sistema para definir el rango de las variables error, cambio del error y cambio del control. Si el sistema es muy rápido, o el cambio en la consigna es pequeño, como ocurrió en el caso de la celda, los rangos de dichas variables deben ser pequeños (simétricos alrededor de cero y con intervalo cercano a la unidad) para lograr sobrepasos máximos pequeños y reducir las oscilaciones. Además de elegir rangos pequeños para las variables, también es necesario redefinir la base de reglas para lograr reducir el control con mayor rapidez y evitar grandes sobrepasos de la salida.

Para reducir las pérdidas de calor en la celda de desplazamiento, sin alterar el perfil natural de las temperaturas internas, es necesario calentar las mantas externas de la celda en la medida en que se calienta el interior de la celda por efectos del vapor. Para evitar suministrar calor adicional al proporcionado por el vapor, también deben mantenerse las consignas de los controladores de las mantas externas algunos grados por debajo de la temperatura interna.

Luego de probar con dos métodos para controlar la calidad del vapor se comprobó que, debido a los bajos flujos manejados en la unidad de inyección alterna de vapor, en esta unidad debe aplicarse un método no invasivo. Al usar el calorímetro de estrangulación para estimar la calidad del vapor a la salida del punto de mezcla, se comprobó que al tomar la muestra del vapor se produce una caída importante en la presión de la línea de la mezcla, produciéndose una variación en la temperatura de saturación. Además de lo anterior, en el calorímetro no se logró obtener vapor sobrecalentado como lo requiere el método. Los resultados anteriores son atribuidos a los bajos flujos manejados en la unidad, para los cuales pequeñas pérdidas de calor son muy representativas.

Dados los resultados obtenidos con el calorímetro de estrangulación, se demostró que el método basado en el balance de masa y energía en el punto de mezcla es el más adecuado para el proceso a escala de laboratorio, donde se manejan bajos flujos de vapor.

El método de inyección alterna de vapor involucra muchas variables que deben controlarse para lograr la calidad del vapor húmedo idónea, que permita incrementar el factor de recobro de crudos pesados y extrapesados. El sistema de control y monitoreo desarrollado para la unidad de inyección alterna de vapor a escala de laboratorio introduce grandes mejoras al controlar la calidad del vapor, así como otras variables del proceso, permitiendo la obtención de resultados más aproximados durante las pruebas de levantamiento de crudo y la evaluación correcta de los diferentes aditivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Abilov, Z. Zeybek, O. Tuzunalp y Z. Telatar, “Fuzzy temperature control of industrial refineries furnaces through combined feedforward/feedback multivariable cascade systems,” *Chemical Engineering and Processing*, vol. 41, N° 1, pp. 87-98, 2002.
- [2] J. Aguilar y F. Rivas, *Introducción a las Técnicas de Computación Inteligente*. Mérida, Venezuela: Meritec, 2001.
- [3] H. Alboudwarej et al., “La importancia del petróleo pesado,” *Oilfield Review*, pp. 38-59, 2006.
- [4] D. Alvarado, *Recuperación Térmica de Petróleo*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela, 2002.
- [5] A. Ambardar, *Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales*. México, D.F., México: Thomson Learning, 2002.
- [6] Y. Araujo, *Principios de Recuperación Mejorada - Nivel Básico*. Los Teques, Venezuela: CIT PDVSA, 2004.
- [7] A. Banerjee, C. Mitra, y M. Woodmansee, “Apparatus and method for measuring steam quality,” U.S. Patent 7 381 954, Jun. 03, 2008.
- [8] E. Barberii, *El Pozo Ilustrado*. Caracas, Venezuela: Binev, 2001.
- [9] G. Beer, “Method for steam quality measurement,” U.S. Patent 5 663 491, Sep. 2, 1997.
- [10] Y. Cengel, *Transferencia de Calor*. México, D.F., México: McGraw-Hill, 2004.
- [11] J. Davidson y J. Partin, “Optical steam quality measurement system and method,” U.S. Patent 2004/ 0056 197, Mar. 25, 2004.

- [12] W. Fredricks, "Steam Quality Sensor," U.S. Patent 5 327 772, Jul. 12, 1994.
- [13] W. Haberman y J. John, *Termodinámica para Ingeniería con Transferencia de Calor*. México, D.F., México: Trillas, 1996.
- [14] E. Hanzlik. (2009, Sep. 12). *Tecnologías para desarrollar yacimientos de crudo pesado* [Online]. Disponible en: <http://opsur.wordpress.com/2009/09/12/tecnologias-para-desarrollar-yacimientos-de-crudo-pesado/>
- [15] K. Hong y S. Griston, "Best practice for the distribution and metering of two-phase steam," *SPE Production & Engineering*, pp. 173-180, Ago. 1997.
- [16] P. Liang, J. Yu, G. Zu, X. Li, Y. Shen, L. Qian y L. Zou. (2005, Feb.). Optic-fiber sensor for steam quality measurement. *SPIE Digital Library* [Online]. 5634(507), pp. 507-514. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1117/12.570245>
- [17] L. Ljung, *System Identification - Theory for the User*. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [18] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*. México, D.F., México: Prentice Hall, 1998.
- [19] J. Palmar, "Automatización de la prueba de recuperación de petróleo por inyección de vapor," tesis de grado del IUPFAN no publicada, 1992.
- [20] K. Passino y S. Yurkovich, *Fuzzy Control*. Menlo Park, California: Addison-Wesley, 1998.
- [21] N. Rondón, "Estudio y evaluación de variables que intervienen en el proceso de inyección alterna de vapor como método de recuperación térmica de crudos pesados a escala de laboratorio," tesis de grado de la UCV no publicada, 2010.
- [22] J. Salager, *Recuperación mejorada del petróleo. Cuaderno FIRP N° S357C*. Mérida, Venezuela: ULA, 2005.

[23] R. Segovia, “Crudo pesado,” presentado en la III Colombia Oil and Gas Investment Conference, Cartagena, Bol., Feb. 4, 2008.

[24] R. Silva, P. Shirley, J. Lemos y A. Goncalves, “Adaptive regulation of super-heated steam temperature: a case study in an industrial boiler,” *Control Engineering Practice*, vol. 8, pp. 1405-1415, May. 2000.

[25] D. Burghardt, *Ingeniería Termodinámica*. México, D.F., México: Harla, 1984.

Apéndice A

Medición de la calidad del vapor mediante calorímetro de estrangulación

A.1. Montaje realizado en el laboratorio

En la Figura A.1 se muestra el esquema del calorímetro fabricado y probado en el laboratorio. El calorímetro de estrangulación fue fabricado según descripción presentada en [25], en donde se explica este método de medición de la calidad del vapor.

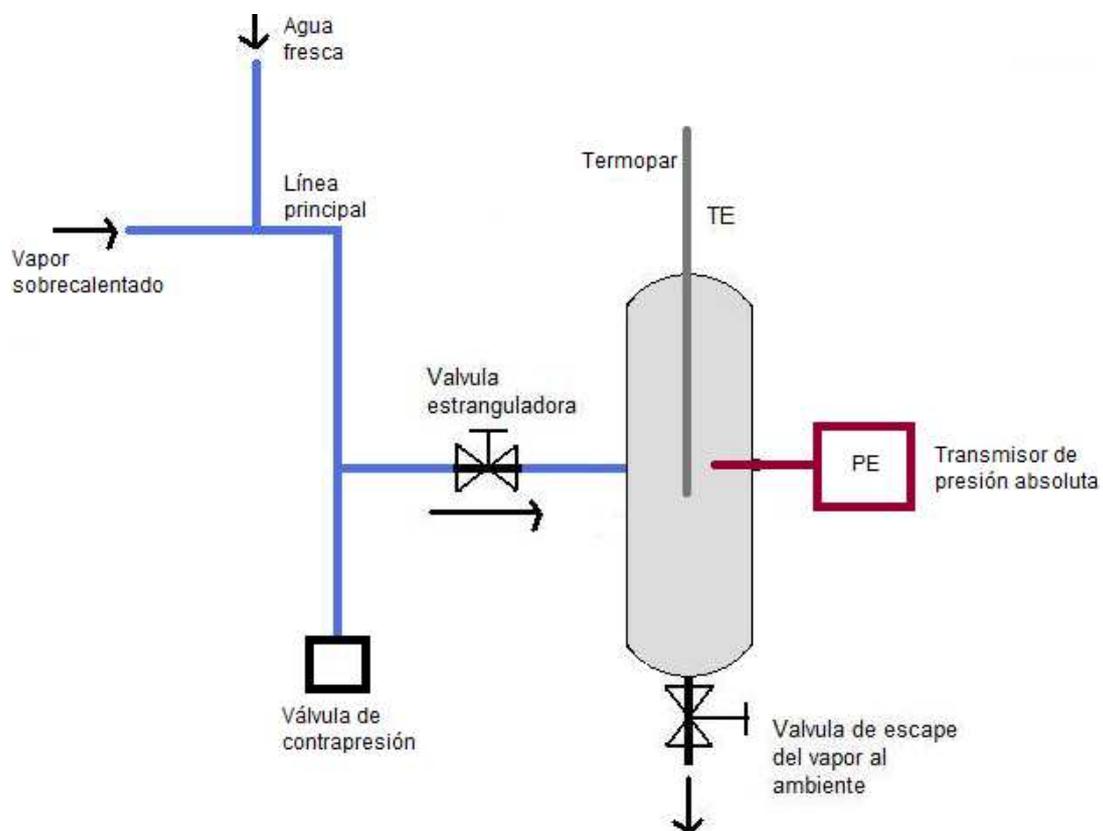


Figura A.1. Calorímetro de estrangulación instalado en la unidad IAV

A.2. Instrumentación usada en el calorímetro

En la Figura A.2 se muestra el calorímetro de estrangulación fabricado con la instrumentación respectiva. Como se aprecia en la Figura A.2 el calorímetro consta de una cámara cilíndrica en donde se instaló un termopar y un transductor de presión absoluta. A la entrada del calorímetro se tiene una válvula micrométrica que fue usada para hacer la estrangulación con diferentes aperturas. Las dimensiones de la cámara del calorímetro se muestran en la Figura A.3.

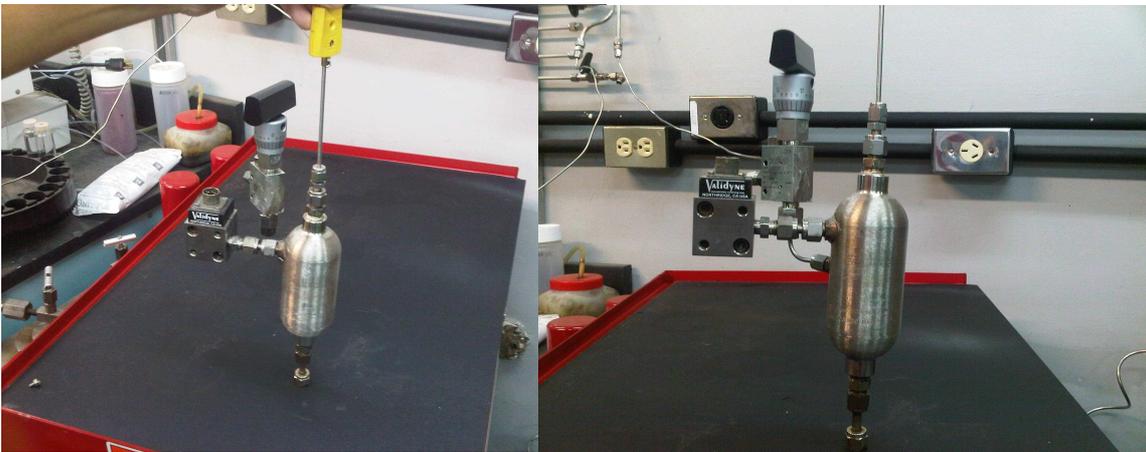


Figura A.2. Calorímetro de estrangulación con su instrumentación

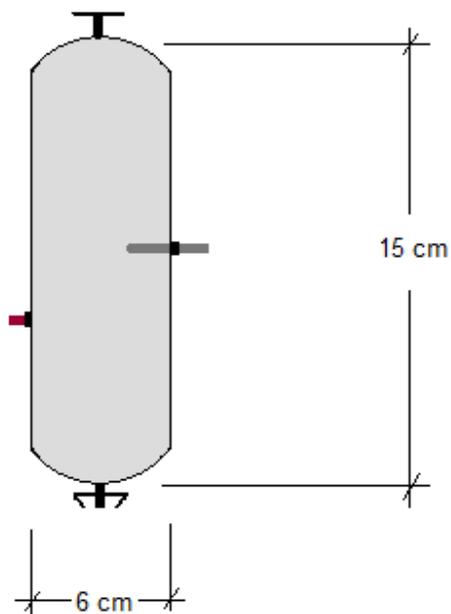


Figura A.3. Dimensiones de la cámara del calorímetro de estrangulación

La cámara del calorímetro, consistente en el recipiente cilíndrico, fue aislada mediante fibra de vidrio dispuesta a su alrededor, la cual se extendió también a la válvula estranguladora y a la válvula de escape.

A.3. Estimación de la calidad mediante el calorímetro

La estimación de la calidad se hizo mediante procedimiento descrito en [25] y que es basado en la primera ley de la termodinámica, la cual establece el principio de conservación de la energía. El proceso de estrangulación consiste en una caída de la presión al reducirse el área de flujo mediante una válvula. Al aplicar la primera ley de la termodinámica en la válvula de estrangulación se tiene que las entalpías antes y después de la válvula son iguales. Si se disminuye suficientemente la presión, el vapor se sobrecalienta en la cámara a una temperatura y una presión bajas [25].

Para determinar la entalpía a la salida de la válvula, que es igual a la entalpía inicial, se midió la presión en la cámara del calorímetro, mediante un transductor con diafragma, y la temperatura mediante un termopar, como se indica en la figura A.1. También se midió la presión y la temperatura en la línea principal del vapor húmedo. Los valores de presión y/o temperatura medidos fueron usados para calcular la entalpía del vapor en el calorímetro y las entalpías del líquido y vapor saturados presentes en la mezcla; luego, se estimó la calidad del vapor mediante la Ecuación (A.1) que relaciona las entalpías y la calidad de la mezcla líquido-vapor saturados [25].

$$h_{calorim} = h_l + x(h_g - h_l) \quad (A. 1)$$

donde:

x es la calidad del vapor húmedo en la línea principal

$h_{calorim}$ es la entalpía por unidad de masa del vapor en la cámara del calorímetro

h_g es la entalpía por unidad de masa del vapor saturado y se calcula en función de la temperatura de saturación (temperatura en la línea de la mezcla)

h_l es la entalpía por unidad de masa del líquido saturado y se calcula en función de la temperatura de saturación (temperatura en la línea de la mezcla)

A.4. Resultados obtenidos con el calorímetro de estrangulación

A.4.1. Resultados de la prueba 1

En la figura A.4 se muestra la temperatura de saturación de la mezcla de líquido y vapor saturados, la cual es calculada en función de la presión en la línea de dicha mezcla. Como se puede apreciar la temperatura de saturación presenta una gran variación y esta se debe a los cambios en la presión de la línea al tomar la muestra del vapor. Estos resultados comprueban que este método invasivo afecta en gran medida al proceso.

En la Figura A.5 se aprecia como varía el flujo de agua fría en función de la calidad del vapor deseada, dado un flujo constante de agua entrando al evaporador. En la Figura A.6 se muestra que la calidad estimada por el calorímetro es muy mala.

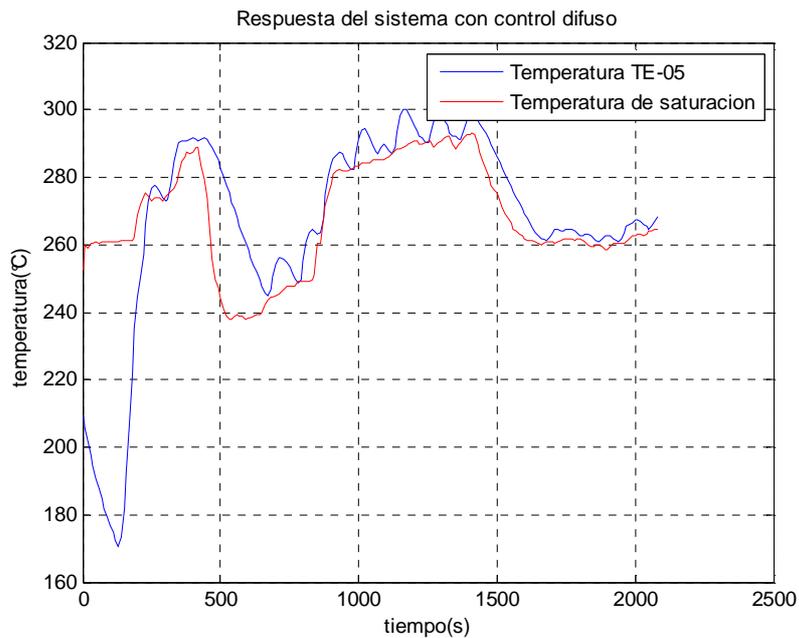


Figura A.4. Temperatura de saturación de la mezcla de vapor húmedo

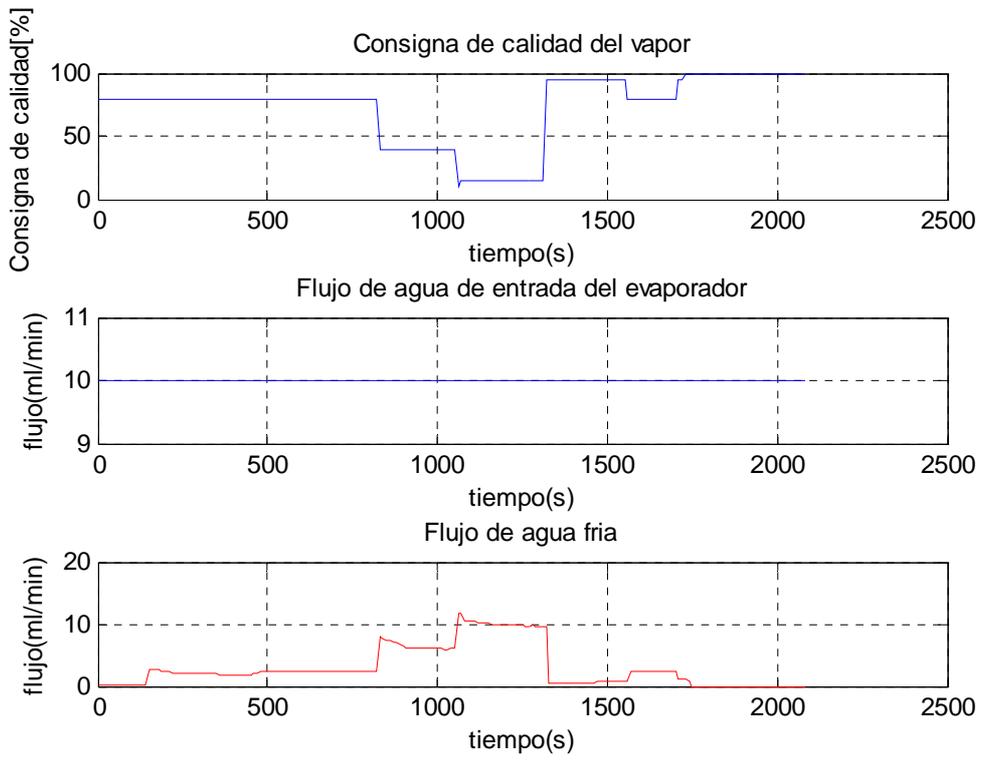


Figura A.5. Relación entre el flujo de agua fría y la calidad deseada

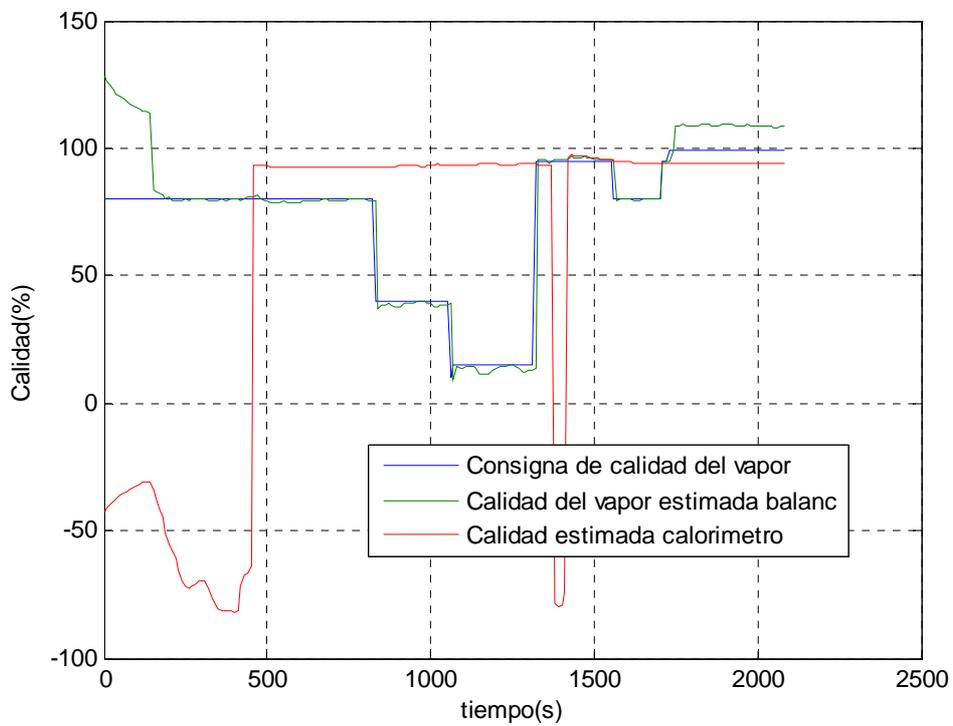


Figura A.6. Calidad del vapor medida mediante el calorímetro en prueba 1

En la Figura A.7 se muestra el comportamiento de la presión y la temperatura en el calorímetro, observándose que la presión y la temperatura corresponden a la saturación, por lo cual en el calorímetro no se obtuvo el vapor sobrecalentado requerido por el método, sino que se obtuvo fue una mezcla de líquido y vapor saturados; esto justifica los resultados observados en la Figura A.6, pues el método no es aplicable en este caso.

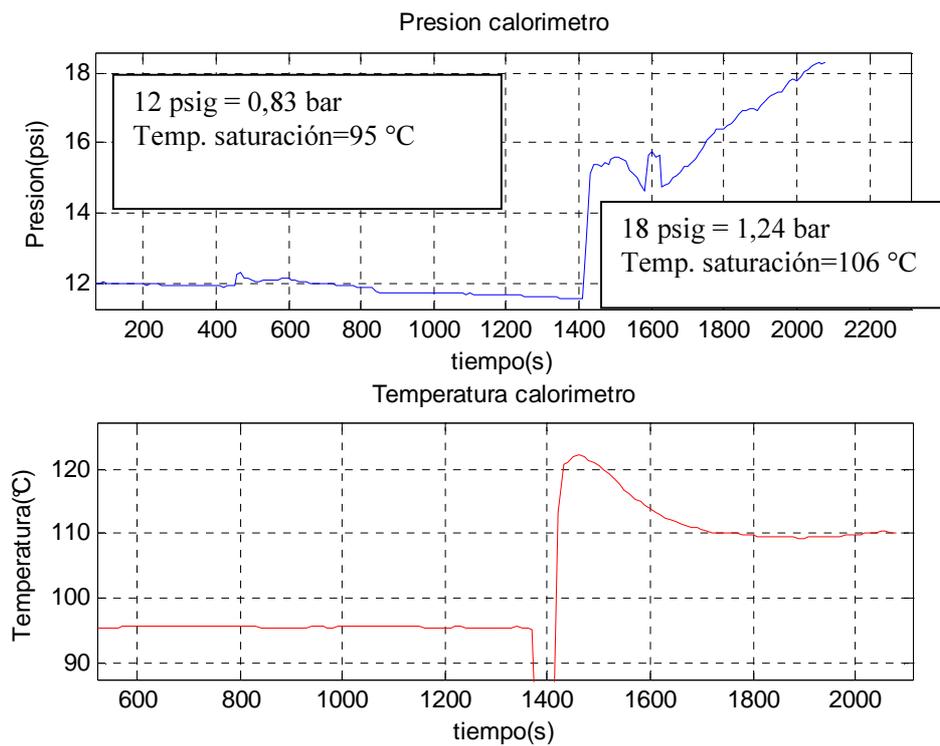


Figura A.7. Comportamiento de la presión y la temperatura en el calorímetro en prueba 1

A.4.2. Resultados de la prueba 2

En la Figura A.8 se muestran los resultados obtenidos en el calorímetro para la prueba 2, apreciándose que la calidad estimada por el calorímetro es muy mala. En esta segunda prueba se obtuvo, al igual que en la prueba 1, una mezcla de líquido y vapor saturados a la salida de la válvula de estrangulación.

En la Figura A.9 se muestra el comportamiento de la presión y la temperatura en el calorímetro, lo cual indica que en la cámara del calorímetro no se obtiene vapor sobrecalentado, sino una mezcla líquido - vapor.

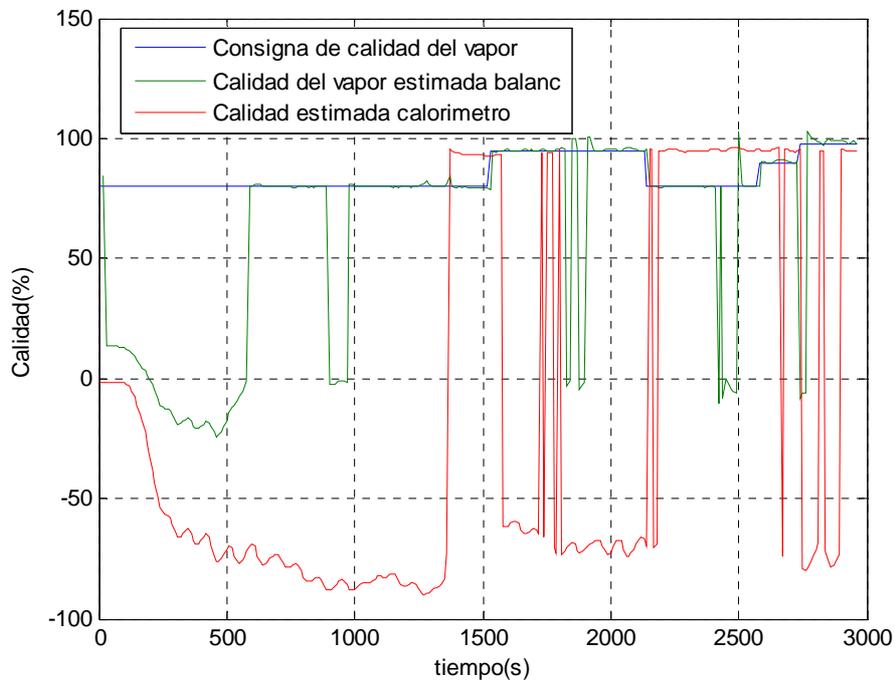


Figura A.8. Calidad del vapor medida mediante el calorímetro en prueba 2

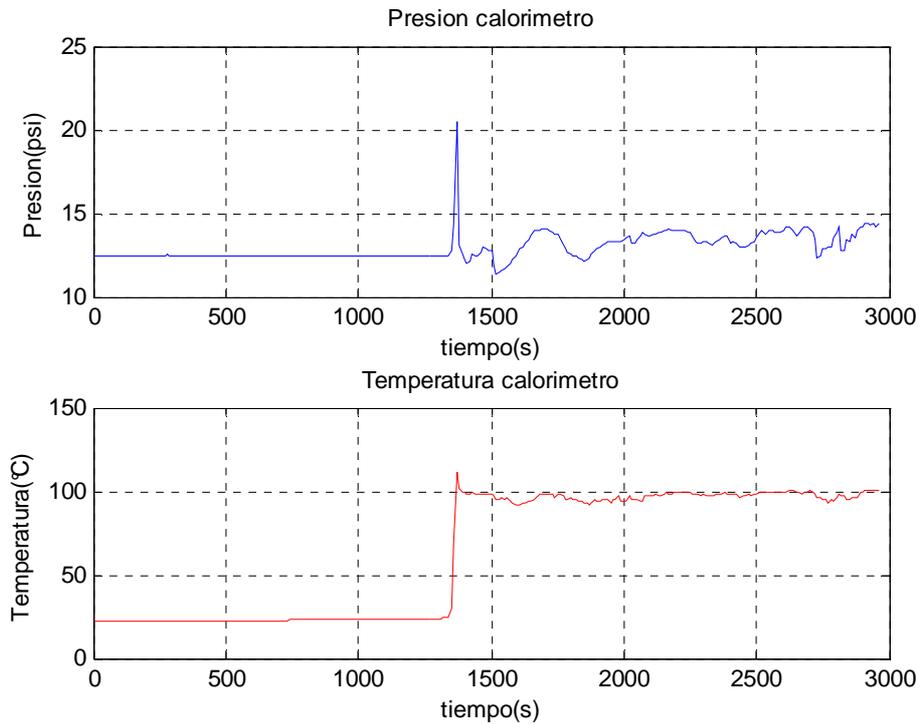


Figura A.9. Comportamiento de la presión y la temperatura en el calorímetro en prueba 2

A.4.3. Resultados simulación en PRO II

En la figura A.10 se muestra el proceso con el calorímetro simulado mediante la herramienta PRO II. La simulación se realizó con las mismas condiciones del proceso real en cuanto a presiones, flujos y temperaturas, y se varió la caída de presión en la válvula estranguladora con la finalidad de lograr las condiciones deseadas en la cámara del calorímetro. Sin embargo, no se encontró un proceso simulado que pudiera generar vapor sobrecalentado en el calorímetro, como lo exige el método para luego aplicar un balance de masa y energía.

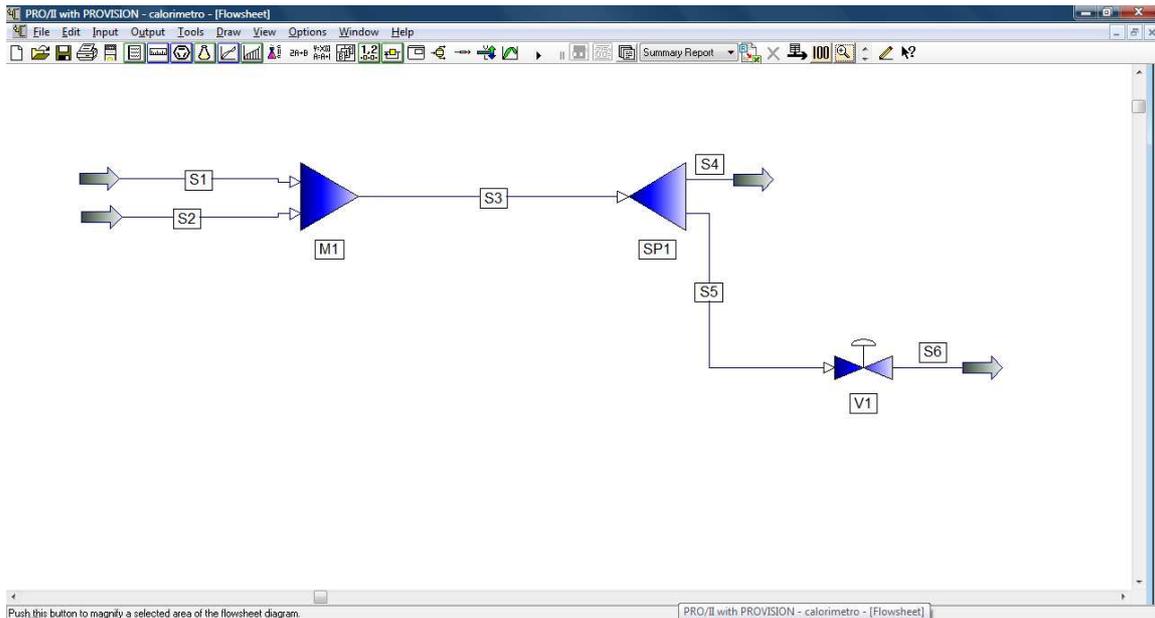


Figura A.10. Diagrama de simulación del calorímetro realizada en PRO II

Los resultados de una de las simulaciones realizadas se muestran en la Tabla A.1. Como se puede apreciar en dicha tabla, en el calorímetro no se obtiene vapor sobre calentado como debería ocurrir, sino que se obtiene es una mezcla (Mixed) de líquido y vapor saturado. Esto es lo mismo que se obtuvo en la práctica y no es satisfactorio.

S1= agua fría

S2 = vapor sobrecalentado

S3= vapor húmedo con calidad deseada

S5= muestra de vapor húmedo cuya calidad se quiere medir

S6= corriente en el calorímetro que es también una mezcla líquido – vapor (Mixed) y debería ser vapor sobrecalentado para poder medirse la calidad del vapor mediante este método.

Tabla A.1. Resultados de simulación del calorímetro de estrangulación

Stream (Summary)	UOM	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Name		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Description		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Phase		Liquid	Vapor	Mixed	Mixed	Mixed	Mixed
Thermodynamic System		IDEA01	IDEA01	IDEA01	IDEA01	IDEA01	IDEA01
Total Molar Rate	g-mol / min	138771088	555084351,8	693855439,8	49957591,08	194279528,9	194279528,9
Total Mass Rate	g / min	2499999973	1E+14	1,25E+14	9E+13	3500000067	3500000067
Temperature	C	3331499666	5731499971	543321299,9	543321299,9	543321299,9	3675816422
Pressure	psia	800000015	800000015,2	800000015,2	800000015,2	800000015,2	1200002679
Total Molecular Weight		1801527977	1801527977	1801527977	1801527977	1801527977	1801527977
Total Specific Enthalpy	BTU / g	2381809,93	2587592,585	2117710,267	2117710,267	2117710,267	2117710,267
Total Cp	BTU/lb-F	998475534	0	0	0	0	0
Total Molar Component Rates	g-mol / min						
H2O		138771088	555084351,8	693855439,8	49957591,08	194279528,9	194279528,9
Total Molar Component Fractions	fraction						
H2O		1	1	1	1	1	1
Vapor Molar Rate	g-mol / min	N/A	555084351,8	456454278,2	328647076,5	127807201,7	156735284
Vapor Mass Rate	g / min	N/A	1E+14	8,22315E+13	5920669028	2302482496	2823629992
Vapor Molecular Weight		N/A	1801527977	1801527977	1801527977	1801527977	1801527977
Vapor Mole Fraction	fraction	N/A	1	657852129	657852129	657852129	8067514109
Vapor Specific Enthalpy	BTU / g	N/A	2587592,585	2635851,059	2635851,059	2635851,059	2535144,149
Vapor CP	BTU/lb-F	N/A	0	0	0	0	398345870,1
Vapor Composition	fraction						
H2O		N/A	1	1	1	1	1

Apéndice B

Esquema de aterramiento de los termopares

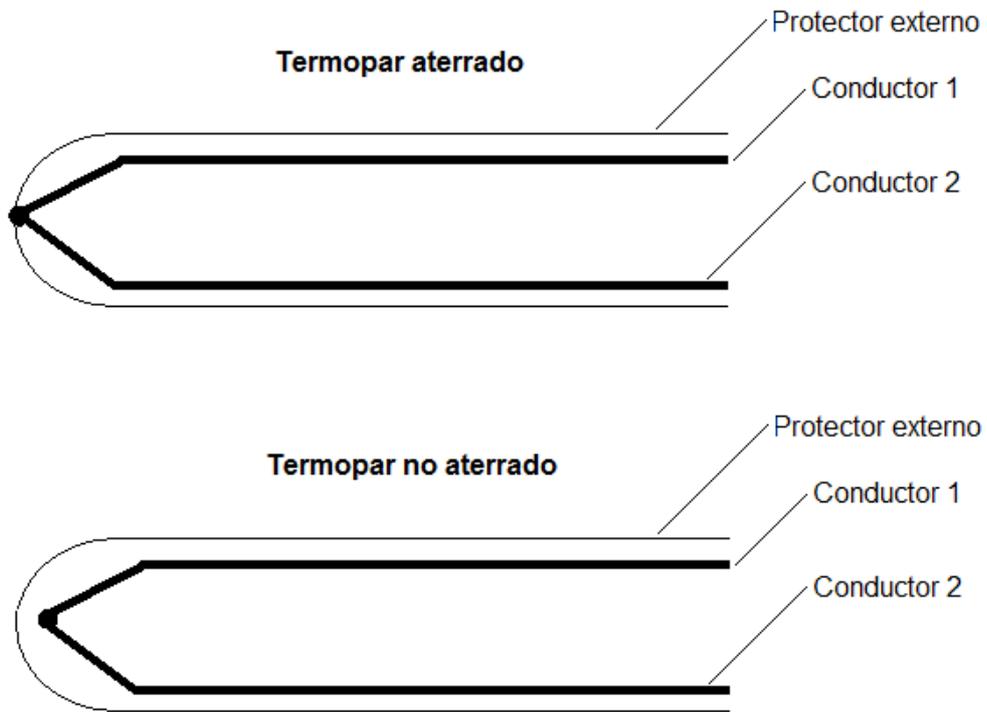


Figura B.1. Esquema de aterramiento de los termopares