



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS
DEL EQUIPO AUTOCLAVE DEL LABORATORIO DE
INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD
DE CARABOBO**

Autores:

Prof. Toni Espinoza

Tutor Académico

Prof. Jose Luciano

Co-Tutor Académico

Kelly Y. Caldera P.

José R. Escalona G.

Valencia, Febrero 2007.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL EQUIPO AUTOCLAVE DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO**, realizado por los bachilleres Kelly Y. Caldera P. C.I.: 14.576.593 y José R. Escalona G. C.I.: 16.563.290, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo y que no nos hacemos responsables de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación.

Prof. Tony Espinosa

Presidente

Prof. Angel Almarza

Jurado

Prof. Sergio Pérez

Jurado

Valencia, 2007



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



VEREDICTO

Los suscritos, Prof. Tony Espinoza, Prof. Angel Almarza y Prof. Sergio Pérez, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL EQUIPO AUTOCLAVE DEL LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO**, realizado por los bachilleres:

Kelly Y. Caldera P.

José R. Escalona G.

Para optar al título de Ingeniero Químico en la Ilustre Universidad de Carabobo, hacen constar que han examinado el mismo otorgándole la calificación de:

VEINTE PUNTOS

Valencia, Febrero de 2007.



DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso, por ser luz en mi vida, guía de mi camino, amigo fiel.

A mi familia, por ser apoyo incondicional, A mi mami por ser ejemplo luchador a seguir.
A mi papi, a ti más que a nadie le dedico este éxito. Los Amo.

A Reinaldo Pérez, por ser mi apoyo, mi vida, Mi AMOR.

KELLY CALDERA

A dios padre todopoderoso, quien nos concede el privilegio de la vida y nos ofrece lo necesario para lograr nuestras metas, quien me ha guiado cada día a crecer como persona y dar lo mejor de mi.

A mis padres, porque ellos siempre están en las buenas y en las malas; me educan, me aconsejan, me imparten valores para conducirme correctamente y me ofrecen el sabio consejo en el momento oportuno.

A mi abuela, a ti en especial por ser mi segunda madre y apoyarme durante la carrera y a pesar de que ya no me acompañes se que también este era tu sueño.

A toda mi familia y a todos mis amigos.

JOSÉ ESCALONA.



AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza y voluntad de alcanzar esta meta: Ser Ingeniero Químico.

A mis PADRES, por darme el apoyo para culminar esta etapa de mi vida, por estar siempre allí junto a mí brindándome su amor y comprensión.

A mi amor bello, REINALDO PÉREZ, por su paciencia, su apoyo, su comprensión, su amor, por ser un ejemplo a seguir, GRACIAS por tu compañía en esta etapa. A su mamá por hacer de su casa mi segunda casa.

Al Prof. Tony Espinoza y al Prof. José Miguel Luciano, tutores académicos, por ser guías en la realización de éste, mi Trabajo de Grado.

A Juan P. Capobianco y a Mary, por apoyarnos en la fase experimental y desarrollo de esta investigación, por su colaboración GRACIAS!!!.

A la Prof. Evelyn Yamal, por darnos sus consejos en la realización de este trabajo. Por compartir con nosotros el café de las mañanas.

A la Prof. Viky Mujica, por sus sabias palabras en momentos de angustia. Muchas gracias Profe!!!.

A Maria Fernanda Reyes de Caballero y su esposo, por hacer de su casa nuestro sitio de reunión por una corta temporada. Muchas gracias.

A mis amigos de **LA TROPA**, Jon, Juan, Mafer, Maria lechita, Vanesita, Jeison, Dianita, Yari, Nela, Ruben, Luisito; por acompañarme durante los años de carrera. Gracias por su amistad y por hacerme conocer que ser profesional es más que libros.

A mi compañero de trabajo, gracias por ser tan paciente en esta etapa que decidimos emprender juntos.

KELLY CALDERA



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por que me infundieron la ética y la responsabilidad que guían mi transitar por la vida. Por apoyarme en cada uno de los pasos que hasta los momentos he dado.

A mis hermanos Ezio, Gilda y Javier, por ser tan especiales y siempre confiar en mi.

A los profesores: Vicky Mujica, Marcos Silva y Evelyn Yamal por brindarnos su colaboración y su asesoría.

A mi co-tutor Jose Miguel y tutor Tony Espinoza por guiarnos en cada paso de la elaboración de nuestro trabajo.

A la tropa por acompañarnos a lo largo de la carrera y no permitir desmayar ante las adversidades que se presentaron durante la misma, por ser los mejores compañeros de clase.

Al laboratorio de Ingeniería Química, por prestarnos sus instalaciones para la elaboración de nuestro trabajo, y todas las personas que trabajan en él, por ayudarnos en todo momento.

A todos mis amigos y familiares, que me han ayudado de alguna forma.

JOSÉ ESCALONA.



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DEL
EQUIPO AUTOCLAVE DEL LABORATORIO DE
INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD
DE CARABOBO**

Trabajo Especial de Grado

Autor: Caldera, K y Escalona, J
Año: 2007

RESUMEN

El tratamiento térmico es un proceso efectivo para la conservación de alimentos, para la esterilización de material quirúrgico y para la industria metalúrgica. Actualmente, existen muchos estudios sobre el análisis y simulación de los mecanismos de transferencia de calor durante el tratamiento térmico, orientados al estudio de las relaciones y perfiles de tiempo-temperatura, refiriéndose a la transferencia de calor conductiva que ocurre en los envases que contienen el material a tratar, dejándose a un lado el análisis de los equipos que permiten llevar a cabo estos estudios, es por ello que surgió la necesidad de desarrollar un programa de simulación que permita predecir el comportamiento de las variables de operación del autoclave instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química. La investigación es experimental tipo evaluativa, se desarrolló un experimento de operación del autoclave tomando en cuenta variables manipulables y controlables del proceso; las cuales son presión de operación del equipo, con cinco niveles 5,10,15, 20 y 25 psig; temperatura de operación [T (°F)], cuyos valores se obtienen de las tablas de equilibrio de vapor saturado partiendo de la presión de operación: 218 °F, 230 °F, 242 °F, 250 °F y 258 °F; y la apertura de los aspersores de agua [Apertura (adim)], que afecta directamente la etapa de enfriamiento del equipo. De los experimentos, se determinaron las curvas que caracterizan al equipo, para hallar la correlación de mejor ajuste y así usarlas en el software seleccionado (Visual Basic) como modelos matemáticos que predicen la operación del equipo. Finalmente, se evalúa la confiabilidad del software, seleccionando valores de temperaturas de operación al azar, 224 °F, 236 °F, 254 °F; los datos obtenidos se someten a modelos matemáticos obtenidos de balances de materia y energía aplicados en el autoclave, a fin de comparar los valores arrojados por el software y los valores teóricos. Se cataloga las pérdidas de calor al ambiente como la variable más importante que arroja el software, del cual se obtuvo una desviación máxima de 11 %. Para finalizar, se recomienda usar temperaturas de operación en el rango de trabajo y condiciones ambientales de acuerdo a los parámetros del Municipio Naguanagua, Estado Carabobo.



ÍNDICE DE FIGURA

Figura	Pág.
1.1. Diagrama de flujo del equipo autoclave.....	5
2.1. Diagrama de tuberías e instrumentación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	17
2.2. Sistema con entrada y salida de energía.....	32
2.3. Transferencia de calor por conducción.....	34
3.1. Volúmenes de Control a aplicar en los balances de masa y energía.....	50
3.2. Secciones de la trampa de vapor para la zona 1.....	52
3.3. Secciones de la trampa de vapor para la zona 2.....	53
3.4. Secciones de la trampa de vapor para la zona 3.....	54
3.5. Secciones de la trampa de vapor para la zona 4.....	55
3.6. Ruta de cálculo a seguir para obtener las interacciones de calor asociadas al autoclave.....	57
3.7. Diagrama de entradas y salidas del simulador del comportamiento del autoclave.....	61
4.1. Curva de Calibración del manómetro bourdon PI-12.....	65
4.2. Comportamiento del flujo de condensado del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	72
4.3. Comportamiento de la temperatura de salida de condensado del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	72
4.4. Comportamiento de la temperatura interna respecto a la temperatura de operación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	74
4.5. Comportamiento de la temperatura de pared de la trampa de vapor respecto a la temperatura de operación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química....	75
4.6. Comportamiento del calor perdido al ambiente y del calor aprovechable respecto a la temperatura de operación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	75
4.7. Interacciones de las variables Temperatura de operación y aspersores en la etapa de enfriamiento del Autoclave.....	77



4.8. Curva de Regresión del tiempo de enfriamiento operando el autoclave con aspersores cerrados.....	79
4.9. Curva de Regresión del tiempo de enfriamiento operando el autoclave con aspersores abiertos.....	79
4.10. Comportamiento de la temperatura de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores cerrados.....	81
4.11. Comportamiento de la temperatura de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores abiertos.....	81
4.12. Ejemplo de ajuste de polinomios de Mínimos Cuadrados.....	82
4.13. Comportamiento del nivel de agua de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores cerrados.....	83
4.14. Comportamiento del nivel de agua de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores abiertos.....	84
4.15. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (218 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.....	86
4.16. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (218 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.....	86
4.17. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (230 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.....	87
4.18. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (230 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.....	87
4.19. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (242 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.....	88
4.20. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (242 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.....	88
4.21. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (250 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.....	89
4.22. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (250 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.....	89
4.23. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (258 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.....	90



4.24. Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (258 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.....	90
4.25. Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (218 ± 1) °F.....	91
4.26. Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (230 ± 1) °F.....	91
4.27. Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (242 ± 1) °F.....	92
4.28. Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (250 ± 1) °F.....	92
4.29. Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (258 ± 1) °F.....	93
4.30. Entrada de Temperatura de operación y condiciones ambientales.....	100
4.31. Selección de las pantallas y entrada de la apertura de los aspersores.....	100
4.32. Salida de la presión corregida y las condiciones internas del equipo.....	101
4.33. Salida de la etapa de venteo.....	101
4.34. Salida de la etapa de cocción.....	102
4.35. Salida de la etapa de enfriamiento.....	102
A.1. Trampa Serie 800 de Balde Invertido.....	122



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Introducción	1
Capítulo I Planteamiento del Problema	3
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	6
1.2.1 Situación actual.....	6
1.2.2 Situación deseada.....	7
1.3 Objetivos.....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Justificación.....	8
1.5 Limitaciones.....	8
Capítulo II Marco Teórico Referencial	9
2.1 Antecedentes de la investigación.....	9
2.2 Descripción del equipo y del proceso.....	12
2.2.1 Autoclave.....	12
2.2.2 Sistema de tuberías.....	13
2.2.3 Accesorios.....	14
2.2.4 Descripción del proceso.....	14
2.2.5 Metodología de operación.....	15
2.3 Bases teóricas.....	19
2.3.1 Simulación.....	19
2.3.2 Técnicas de simulación.....	19
2.3.3 Aplicaciones de la simulación.....	21
2.3.4 Ventajas y desventajas de la simulación.....	21
2.3.5 Lenguajes de programación.....	22
2.3.6 Autoclave.....	28
2.3.7 Balance de energía.....	32
2.3.8 Métodos numéricos.....	36



Capítulo III Marco Metodológico	39
3.1 Procedimientos y actividades desarrolladas.....	40
3.1.1 Diagnosticar el funcionamiento actual del autoclave, a fin de determinar el modo de operación y variables más importantes del equipo...	40
3.1.2 Caracterizar el equipo autoclave con la finalidad de conocer su comportamiento.....	42
3.1.3 Obtener los modelos matemáticos necesarios para simular el comportamiento real del autoclave del laboratorio de ingeniería química con el propósito de predecir los valores reales que opera el equipo.....	48
3.1.4 Seleccionar el software para la programación del simulador, a fin de obtener el más adecuado para el desarrollo del programa..	57
3.1.5 Desarrollar el módulo del programa de simulación con el objeto de incorporar los modelos matemáticos y cálculos del lenguaje de programación a utilizar..	60
3.1.6 Validar el software a fin de determinar su confiabilidad.	62
Capítulo IV Discusiones de Resultados	64
4.1 Diagnóstico del funcionamiento del autoclave.....	64
4.2 Caracterización del autoclave y modelos matemáticos asociados.....	68
4.3 Selección del software para la programación del simulador.....	93
4.4 Desarrollo del módulo de cálculo del programador.....	97
4.5 Validación del software de simulación.....	103
Conclusiones y Recomendaciones	109
Conclusiones.....	109
Recomendaciones.....	111
Bibliografía	112
Apéndice A Tablas bibliográficas	115
Apéndice B Procedimiento de cálculo	123
Apéndice C Tablas de Datos experimentales	135
Anexos.	180



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
3.1. Esquema de Formato de inspección.....	40
3.2. Temperatura de saturación a partir de la presión de operación del equipo.....	44
3.3. Niveles seleccionados de los factores a estudiar en la caracterización del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	44
3.4. Especificaciones de rangos de los instrumentos del equipo.....	45
3.5. Diseño de Experimento arrojado por el programa estadístico Minitab.....	46
3.6. Instrumento de recolección en la determinación de las energías calóricas implicadas en la etapa de operación con aspersores abiertos.....	47
3.7. Instrumento de recolección en la determinación de las energías calóricas implicadas en la etapa de operación con aspersores cerrados.....	47
3.8. Instrumentos de recolección de las variables que intervienen en la etapa de enfriamiento (Operando con aspersores abiertos y con aspersores cerrados).....	48
3.9. Matriz de los criterios relevantes integrados para la selección del software para la programación del simulador.....	60
3.10. Condiciones seleccionadas para la validación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	62
4.1 Evaluación del estado actual del Autoclave instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química.....	66
4.2. Identificación de lazos de control en el diagrama de tuberías e instrumentación..	67
4.3. Promedios de tiempo de estabilización de la temperatura interna del Autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	69
4.4. Flujo de condensado y temperatura de salida de condensado en la Etapa de cocción del Autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.....	71
4.5. Tiempo de enfriamiento de la etapa de enfriamiento del Autoclave para cada uno de los tratamientos.....	78
4.6. Análisis de varianza aplicado a los tiempos de enfriamiento del autoclave para cada uno de los tratamientos.....	78



4.7. Modelos Matemáticos obtenidos para caracterizar etapa de enfriamiento operando con aspersores cerrados.....	85
4.8. Modelos Matemáticos obtenidos para caracterizar etapa de enfriamiento operando con aspersores abiertos.....	85
4.9. Matriz de los criterios relevantes integrados para la selección del software para la programación del simulador.....	96
4.10. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a (224 ± 1) °F.....	105
4.11. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a (224 ± 1) °F con aspersores cerrados.....	105
4.12. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a (224 ± 1) °F con aspersores abiertos.....	105
4.13. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a (236 ± 1) °F.....	106
4.14. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a (236 ± 1) °F con aspersores cerrados.....	106
4.15. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a (236 ± 1) °F con aspersores abiertos.....	106
4.16. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a (254 ± 1) °F.....	107
4.17. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a (254 ± 1) °F con aspersores cerrados.....	107
4.18. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a (254 ± 1) °F con aspersores abiertos.....	107
4.19. Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a (204 ± 1) °F con carga.....	108
A.1. Propiedades del vapor de agua.....	115
A.2. Propiedades del aire.....	118
A.3. Valores del factor de Fisher al 95 % de Probabilidad.....	119
A.4. Valores del factor de Fisher al 99 % de Probabilidad.....	120
A.5. Correlación para estimar coeficiente convectivo en convección natural.....	121



A.6. Especificaciones de la trampa de vapor Serie 800 Armstrong.....	122
C.1. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de operación de $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$	136
C.2. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de operación de $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$	137
C.3. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de operación de $(230 \pm 1) ^\circ\text{F}$	138
C.4. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de operación de $(230 \pm 1) ^\circ\text{F}$	139
C.5. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de operación de $(242 \pm 1) ^\circ\text{F}$	140
C.6. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de operación de $(242 \pm 1) ^\circ\text{F}$	141
C.7. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de operación de $(250 \pm 1) ^\circ\text{F}$	142
C.8. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de operación de $(250 \pm 1) ^\circ\text{F}$	143
C.9. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de operación de $(258 \pm 1) ^\circ\text{F}$	144
C.10. Datos experimentales implicados en la etapa de cocción del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de operación de $(258 \pm 1) ^\circ\text{F}$	145
C.11. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$	146
C.12. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$	148
C.13. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de $(230 \pm 1) ^\circ\text{F}$	149
C.14. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de $(230 \pm 1) ^\circ\text{F}$	152
C.15. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de $(242 \pm 1) ^\circ\text{F}$	154



C.16. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de (242 ± 1) °F.....	157
C.17. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de (250 ± 1) °F.....	159
C.18. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de (250 ± 1) °F.....	162
C.19. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados a una temperatura de (258 ± 1) °F.....	165
C.20. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos a una temperatura de (258 ± 1) °F.....	169
C.21. Dimensiones tomadas de la trampa de vapor Serie 800 Armstrong.....	172
C.22. Datos experimentales de la etapa de cocción para la validación del software operando el equipo con aspersores cerrados.....	173
C.23. Datos experimentales de la etapa de cocción para la validación del software operando el equipo con aspersores abiertos.....	174
C.24. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos para la validación del software.....	175
C.25. Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados para la validación del software.....	177



INTRODUCCIÓN

La investigación realizada tiene como finalidad desarrollar un programa de simulación para el análisis de las variables de operación del equipo autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Carabobo. Para el desarrollo de la investigación es necesario diagnosticar el funcionamiento actual del autoclave, a fin de determinar el modo de operación y las variables más importantes del equipo. También se requiere caracterizar el autoclave con la finalidad de determinar las variables críticas y sus curvas características. Además de obtener los modelos matemáticos necesarios para simular el comportamiento real del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química con el propósito de predecir los valores con los cuales opera el equipo. Siendo necesario seleccionar el software para la programación del simulador, a fin de obtener el más adecuado para el desarrollo del programa y desarrollar el modulo del programa de simulación con el objeto de incorporar los modelos matemáticos y cálculos al lenguaje de programación a utilizar. Finalmente, se valida el software a fin de determinar su confiabilidad

Es por esto que, las áreas de estudio abarcadas en este trabajo corresponden a los fenómenos de transporte, simulación de procesos y control de procesos químicos.

A objeto de simular al equipo en condiciones de operación diferentes se desarrollo un experimento con treinta (30) tratamientos en el cual se toman en cuenta la presión de operación del equipo [$P_{op}(psig)$], la temperatura de operación [$T (^{\circ}F)$], y la apertura de los aspersores de agua [Apertura (adim)] como variables fundamentales e influyentes en la operación del equipo. De los experimentos realizados se obtienen las correlaciones que representan las curvas características del equipo y luego usarlas como modelos matemáticos en el software seleccionado para realizar la simulación. Finalmente, se realizan experimentos de validación con valores al azar a fin de determinar la confiabilidad del software.

Para una mejor comprensión de este trabajo se estructura en cuatro capítulos: el capítulo I, en el cual se plantea el problema en estudio, especificándose su propósito, la



situación actual y deseada, así como los objetivos general y específicos de la investigación, justificación y limitaciones. El capítulo II expone y cita una serie de trabajos, investigaciones y proyectos con fines semejantes a la presente investigación, además se presentan algunos fundamentos y conceptos básicos relacionados con la simulación de procesos químicos, software que se usan en la actualidad para elaborar simuladores de procesos, el autoclave y sus ventajas, los procesos de transferencia de calor que se presentan en el equipo, así como teoría referente a los balances de energía y los tipos de calores asociados al fenómeno que ocurre en el autoclave, además se presenta una descripción del equipo objeto de esta investigación y del proceso que en él ocurre. En el capítulo III se muestra la metodología llevada a cabo para el cumplimiento de los objetivos formulados, así como las técnicas y herramientas manejadas durante su ejecución. En el capítulo IV se presentan la discusión y análisis de cada uno de los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones y aportes más relevantes alcanzados durante el desarrollo de la investigación, así como las recomendaciones pertinentes.

Esta investigación es de gran importancia ya que, representa un aporte teórico a la Universidad de Carabobo y a otras casas de estudio. Asimismo, permitirá adquirir conocimientos en el diseño de software y el manejo de este equipo, proveerá al Laboratorio de Ingeniería Química de una herramienta que le permita conocer el comportamiento del equipo a diferentes condiciones de trabajo. Además, contribuirá con la enseñanza de los estudiantes debido a que les proporcionará información previa del equipo, lo que permitirá crear un procedimiento experimental para este equipo.



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En esta sección se presenta la descripción del problema en estudio, su situación actual y deseada, el objetivo general y los específicos de la investigación. Seguidamente, se indican las razones que justifican el estudio y las limitaciones de la investigación.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las universidades como centro de desarrollo social de un país, abordan la solución de problemas científicos, tecnológicos, sociales, culturales a través de la investigación; la Universidad de Carabobo por igual enfrenta esta situación y prepara a sus egresados en la solución de problemas. Como parte de esa preparación existe en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo el Laboratorio de Ingeniería Química (LIQ), en cuyas instalaciones se imparten las clases prácticas de las cátedras de Laboratorio de Ingeniería Química I, Laboratorio de Ingeniería Química II y Control de Procesos Químicos de la Escuela de Ingeniería Química, en las cuales se desarrollan experimentos que permiten comprobar y validar los conocimientos adquiridos en las cátedras Fenómenos de Transporte I, Fenómenos de Transporte II y Operaciones Unitarias.

El laboratorio cuenta con diversos equipos para el desarrollo de las clases prácticas, entre los cuales están el equipo de pérdidas de energía, el equipo de bombas centrífugas, una torre de absorción, una torre de enfriamiento, una extrusora, torres de rectificación de platos y de relleno, además, cuenta con una gama de equipos de transferencia de calor tales como: el equipo de aislantes y aletas, un generador de vapor, el equipo evaporador-condensador vertical, un autoclave, entre otros.

Este trabajo se centra en el estudio de uno de los equipos de intercambio de calor llamado autoclave, que según la enciclopedia wikipedia (Abril, 2006):

...la palabra autoclave se utiliza para referirse a una olla a presión de gran talla, utilizada para cocimiento en procesos industriales. En especial, se utilizan para la esterilización de conservas y alimentos enlatados cuyas características requieren un tratamiento por encima de los 100 grados centígrados....

El autoclave instalado en el LIQ consta de un recipiente cilíndrico con una tapa semiesférica acoplada al cilindro y que se cierra con unas pinzas de presión, tiene conectada tres tuberías de fluidos importantes como lo son: la de vapor de agua



saturado, agua y aire (Figura 1.1); un sistema de control semiautomático, y una serie de medidores conectados al controlador del sistema.

Las bases fundamentales del funcionamiento de este equipo son sus etapas de operación, llamadas etapa de venteo, calentamiento y enfriamiento. En la primera etapa (venteo) se procede a ingresar vapor de agua saturado con el fin de desalojar el aire contenido en su interior. Luego, iniciando la segunda etapa (calentamiento), se mantiene el flujo de vapor de agua de forma continua a fin de mantener la temperatura constante dentro del equipo. Finalmente, se suministra un flujo de agua subenfriada para disminuir la temperatura dentro del autoclave para cumplir la tercera etapa (enfriamiento), esto se hace conjuntamente con la admisión de aire comprimido para que la disminución de la temperatura sea a presión constante a fin de evitar deformaciones en la estructura del equipo. Además, cada etapa se lleva a cabo en un espacio de tiempo determinado según el proceso que se esté realizando.

En lo que se refiere al aporte didáctico de este equipo se encuentra el estudio de los lazos de control, abarcando el área de control de procesos propiamente dicha.

En la industria alimenticia, médica y farmacéutica el uso de éste equipo es cotidiano y primordial en sus procesos de producción haciendo necesario el estudio de éste equipo en el laboratorio. Sin embargo, no existe un experimento de laboratorio diseñado para el desarrollo de prácticas por parte de los estudiantes, y solo es usado para llevar a cabo los proyectos de evaluación de la cátedra del Laboratorio de Ingeniería Química II.

Por otra parte, la simulación de los equipos industriales representa una herramienta de gran importancia, puesto que mediante esta se pueden realizar pruebas de manera virtual, a fin de determinar las mejores condiciones de operación del proceso, sin la necesidad de hacer modificaciones reales al mismo y sin los costos asociados a éstas. Además, se puede estudiar el comportamiento del equipo con respecto a diversas variables y la sensibilidad del mismo.

En la actualidad el equipo autoclave no cuenta con una herramienta que prediga su comportamiento ante ciertas situaciones, generando dificultades a la hora de realizar cambios de diseño, familiarizar a los estudiantes con el equipo antes de realizar la práctica en el mismo y analizar con mayor profundidad los fenómenos



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

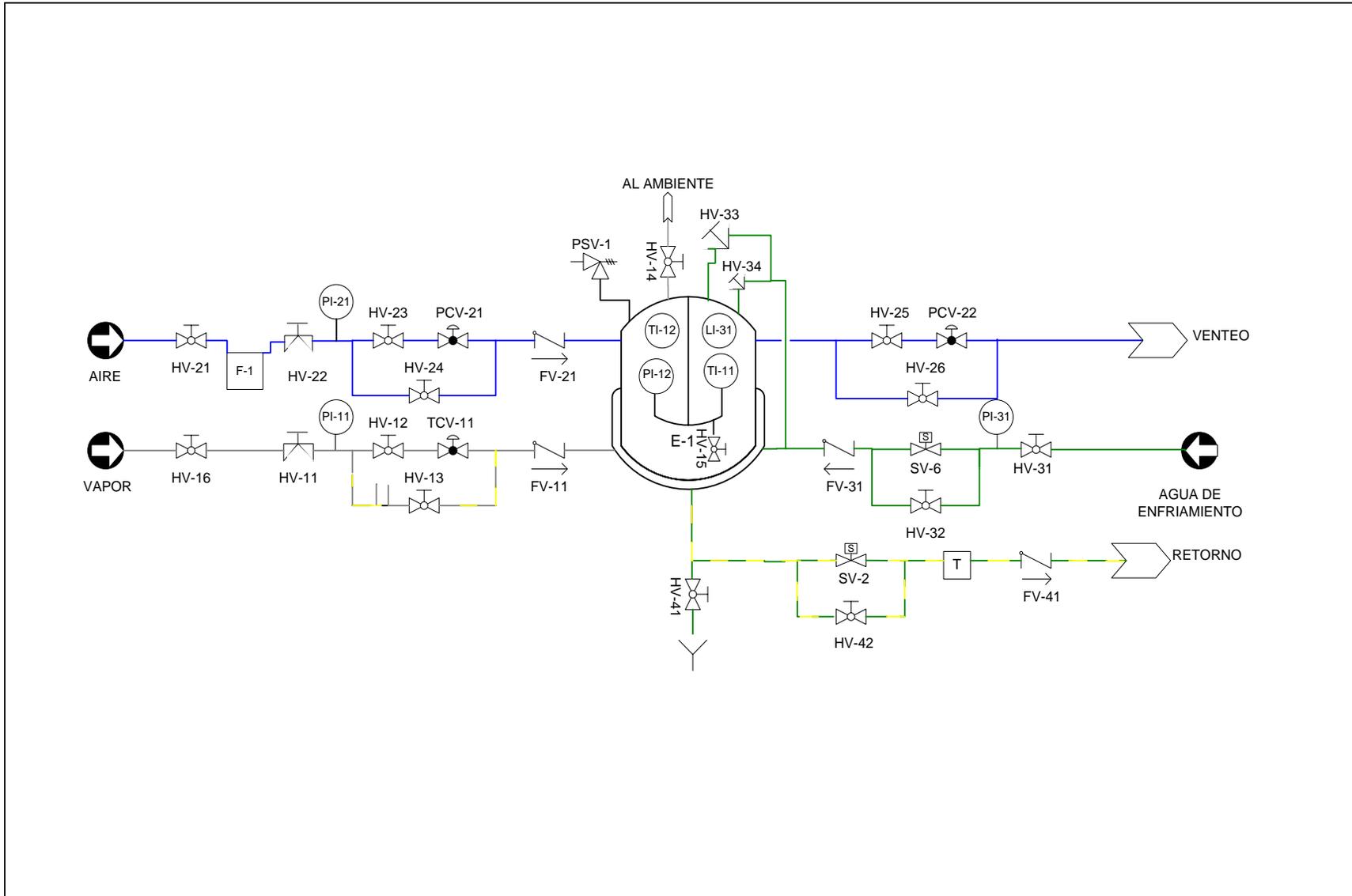


Figura 1.1 Diagrama de flujo del equipo autoclave



que en él ocurren.

Tomando en cuenta esta situación, se requiere ofrecer una herramienta que cubra las necesidades antes descritas, a través de un software de simulación del equipo autoclave con el propósito de brindar una herramienta didáctica, operativa y de investigación.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad en el laboratorio hay equipos que no cuentan con herramientas que le permita verificar el comportamiento de estos ante condiciones determinadas. El autoclave no escapa a esta situación generando un total desconocimiento de su comportamiento trayendo como consecuencia la incapacidad de realizar cambios de diseño y analizar los fenómenos que en él ocurren.

Tomando en cuenta esta situación, se plantea la posibilidad de simular el sistema mediante la obtención de modelos matemáticos que representen el comportamiento del mismo; con la finalidad de ofrecer una herramienta que permita hacer cambios en las condiciones de operación, comprender y analizar los fenómenos que ocurren en la operación del equipo.

1.2.1 Situación Actual

En la actualidad el autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química, carece de una herramienta que permita obtener su caracterización a determinadas condiciones de operación, además de un sistema de control muy complejo por lo que este equipo es operado solo para proyectos de la asignatura de Laboratorio de Ingeniería Química II.

Por otra parte los resultados que se obtienen del autoclave quedan siempre fijados a modelos matemáticos netamente bibliográficos y a valores obtenidos experimentalmente, lo que conlleva a que exista cierta discrepancia entre estos los valores, debido a que en los primeros no se toma en cuenta el diseño real del equipo.



1.2.2 Situación Deseada

Disponer de una herramienta de cálculo práctica que le permita al Laboratorio no solo predecir los parámetros característicos del autoclave de forma rápida ante modificaciones en las condiciones de operación, sino también se obtenga mediante está resultados adaptados a las condiciones reales del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.

En cuanto al alcance, se creará un programa que presente una interfaz gráfica amena para el usuario y que le permita obtener los valores necesarios para el cumplimiento de objetivos en las prácticas del Laboratorio de Ingeniería Química.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un programa de simulación para el equipo Autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química con el objeto de crear una herramienta eficaz aplicable para la operación y análisis del mismo.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar el funcionamiento actual del autoclave, a fin de determinar el modo de operación y las variables más importantes del equipo.
2. Caracterizar el autoclave con la finalidad de determinar las variables críticas y sus curvas características.
3. Obtener los modelos matemáticos necesarios para simular el comportamiento real del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química con el propósito de predecir los valores que opera el equipo
4. Seleccionar el software para la programación del simulador, a fin de obtener el más adecuado para el desarrollo del programa.
5. Desarrollar el módulo del programa de simulación con el objeto de incorporar los modelos matemáticos y cálculos al lenguaje de programación a utilizar
6. Validar el software a fin de determinar su confiabilidad.



1.4 JUSTIFICACIÓN

A nivel socioeducativo esta investigación es importante porque se proveerá al laboratorio de una herramienta que le permita conocer el comportamiento del equipo a diferentes condiciones de trabajo. Además, contribuirá con la enseñanza de los estudiantes ya que les proporcionará información previa del equipo, lo que permitirá crear un procedimiento de operación de este equipo.

Representa un aporte teórico a la Universidad de Carabobo y a otras casas de estudio, ya que permitirá adquirir conocimientos en el diseño de software y el manejo de este equipo. Así como, la posible utilización como software comercial, debido al uso industrial del equipo, lo que dejaría un aporte económico a la universidad. También, permitirá el análisis del equipo para las posibles modificaciones de diseño sin que represente un costo a la universidad.

Por otro lado, en la elaboración de esta investigación se llevarán a cabo actividades que permitirán reforzar los conocimientos y habilidades adquiridas en el transcurso de la carrera de Ingeniería Química, enfatizándose en las áreas de manejo de instrumentos y equipos de laboratorio, fenómenos de transporte, así como también incrementar conocimientos en el manejo de lenguajes de programación esenciales para la elaboración del simulador.

Esta investigación presenta un aporte metodológico debido a que proporcionará un método para la operación de este equipo, así como una data previa de condiciones de trabajo que permitirán a los docentes evaluar el desempeño de los estudiantes.

1.5 LIMITACIONES

En la presente investigación se encontrarán algunas condiciones desfavorables que pudieran limitar, su correcta y satisfactoria realización, como por ejemplo la poca experiencia en la operación del equipo, por lo cual se cuenta con el apoyo de los docentes y técnicos del LIQ.

También, debido a que se pretende el uso de varios lenguajes de programación, la falta de conocimiento avanzando de estos representa una limitación, lo que implicaría por parte de los autores un aprendizaje autodidáctico de los mismos.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En este capítulo se señalan las referencias de investigaciones realizadas con anterioridad, las cuales sirvieron de apoyo a los planteamientos presentados esta investigación. Además se presentan algunos fundamentos y conceptos básicos relacionados con la simulación, lenguajes de programación, el autoclave.

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de Candelario (2000) se realizó con el objetivo de elaborar un software usando Visual Basic para una torre de tiro inducido se determinan las propiedades de la mezcla agua-aire sin recurrir a la carta psicrométrica. Para alcanzar este objetivo analizaron los tipos de torres de enfriamiento, sus componentes y métodos de operación. Seleccionando una torre de tiro inducido, la cual es diseñada el software que construyeron en Visual Basic a partir de las condiciones obtenidas inicialmente por el mismo software.

Concluye que con el programa solo se pueden analizar torres de tamaño piloto por condiciones de diseño de la aplicación. Además, comprobaron que el sistema diseñado representa una ventaja económica comparado con un equipo importado si se tomaban en cuenta las condiciones de diseño

La principal semejanza de este proyecto con la investigación desarrollada es que ambos trabajos persiguen el diseño de un software de simulación por computadora empleando Visual Basic. Pero se diferencia de la presente investigación en el proceso evaluado, en nuestro caso es un equipo de intercambio térmico y el caso aquí expuesto analizan torres de enfriamiento, así también el uso del software es diferente, ya que en esta investigación se pretende diagnosticar el equipo a diferentes condiciones de operación virtualmente.

Por otra parte el trabajo de investigación de Contasti (2001) tiene como objetivo general desarrollar un módulo de cálculo de diseño de intercambiadores de calor de tubo y coraza compatible con el programa SIMESTUC.

Como principal similitud con el presente trabajo, se encuentra que los dos tratan de representar y predecir el comportamiento de un equipo de transferencia de calor



en condiciones de operación controladas. Como diferencia se encuentra que en el trabajo de Contaste, se comprobarán los resultados con valores reportados por un simulador comercial mientras que en esta investigación se determinará la desviación con valores obtenidos experimentalmente usando el simulador diseñado por los autores.

El estudio de Abbas (2004), plantea el análisis y desarrollo de modelos de simulación para optimizar el diseño de los ensayos clínicos. En este estudio se trata de integrar áreas específicas, la simulación, la estadística, la evaluación económica y el desarrollo de ensayos clínicos, a fin de determinar el diseño que optimiza el costo y el tiempo de desarrollo de un ensayo clínico, analizando los resultados hipotéticos antes de su realización real. La diferencia con este trabajo de grado se refiere al contexto de estudio, y la semejanza radica en que se requiere obtener resultados hipotéticos antes de ejecutar la experiencia práctica. La conclusión más importante de este trabajo es que los modelos de simulación tienen gran flexibilidad para ajustarse a diversos contextos de optimización.

La investigación representa un antecedente muy valioso debido a su aporte teórico para la nuestra, ya que el desarrollo de la metodología de ensayos y construcción de modelos ejecutables por ordenador es muy completo.

La investigación de Celis y Guin (2003) presenta como objetivo general el desarrollo de un software que determine los balances de masa y energía de cualquier proceso químico basado en módulos cálculos.

En el desarrollo de este trabajo se obtuvo un programa de simulación en estado estacionario como herramienta pedagógica en la enseñanza de algunas materias de ingeniería química, desarrollado en lenguaje Visual Basic 6.0, además comprobaron la confiabilidad del programa ya que obtuvieron 0% de desviación respecto a los datos bibliográficos.

La diferencia con este trabajo de grado radica en que Celis y Guin realizaron un programa para simular el comportamiento de 24 equipos, en nuestro caso será el mismo equipo variando las condiciones de operación.



Este trabajo representa un valioso soporte puesto que coincide con la presente investigación en que se pretende crear un software, lo cual permite que su metodología de trabajo sea importante para este trabajo.

Del mismo modo la investigación de García, Gil, Rodríguez y Tovar (2005) tiene como objetivo caracterizar el equipo de intercambio térmico (Autoclave) del Laboratorio de Ingeniería Química, con la finalidad de crear una referencia de la capacidad de operación de este equipo. Esta investigación es un aporte a este trabajo en cuanto a la finalidad ya que ellos construyeron diferentes curvas características bajo condiciones favorables de operación. La diferencia radica en la metodología de trabajo, ya que en esta investigación se pretende proporcionar una herramienta que permita obtener las mismas curvas características haciendo uso de un programa de simulación por computadora.

Concluyen que el calor disponible y el calor total fueron aumentando con el incremento de la temperatura y que la eficiencia térmica del equipo sin aislar estuvo alrededor del 30%.

Otra investigación importante de resaltar es la de Ramos y Villamizar (2004). La cual tiene como objetivo rediseñar el modo de operación del sistema de control automático del Autoclave a través de la implementación de un controlador lógico programable. Concluyen que la implementación del PLC influyen directamente en el proceso que se realiza en el autoclave.

Esta investigación es un aporte a este trabajo debido a que el PLC facilitará el manejo de las variables en estudio, así como el estudio de los lazos de control del equipo. En cuanto a la diferencia de ese trabajo y el de Ramos y Villamizar se basa en el área de conocimiento desarrollada, en ese caso se caracterizará el autoclave para simularlo y ellos añadieron el sistema de control al equipo.

Finalmente el objetivo de la investigación de Uvieda y Vargas, (2006) es desarrollar un módulo de cálculo para simular el banco de intercambiadores de calor mediante el simulador comercial HYSYS.



Sus conclusiones se basaron en la comparación del comportamiento de cada intercambiador de calor (tubo y coraza, doble tubo, con serpentín interno etc.) en cuanto a perfil de temperatura, pérdidas de calor al ambiente, operación en paralelo o contracorriente, obteniendo pues, diferentes conclusiones según la comparación.

La semejanza de este trabajo con el presente, es la metodología de trabajo para obtener los valores experimentales, ya que en ambos trabajos se manipulan variables controladamente para evaluar el efecto en otras dependientes.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO Y DEL PROCESO

El autoclave instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química, presenta la configuración de una olla de presión, consta de un sistema de tuberías, válvulas y accesorios que se describen a continuación.

2.2.1 Autoclave

Tal como se mencionó anteriormente, la palabra autoclave se utiliza para referirse a una olla a presión de gran talla, utilizada para cocimiento en procesos industriales. En especial, se utilizan para la esterilización de conservas y alimentos enlatados cuyas características requieren un tratamiento por encima de los 100 °C.

El equipo instalado en LIQ es una unidad de procesos cuya parte física se conforma de un cilindro contenedor de los fluidos circulantes en su interior, en su parte superior se adjunta una rodela que sirve como tapa, a través de la cual se deja introducir agua hacia el interior de dicho equipo por medio de unas mangueras que dispensan el fluido a unos dispersores del fluido que ingresa a la unidad y tiene instalada un válvula de descarga de presión de vapor. Adjunto al cilindro contenedor, se encuentran instalados dos tomas de presión, una envía una señal al registrador y la otra se conecta a un manómetro tipo bourdon; un indicador de nivel de agua, dos termocupla tipo K una envía una señal al registrador y la otra se conecta a un equipo indicador de temperatura.

En su parte interior se encuentran un cilindro tipo malla, donde se colocan los objetos a procesar y en el fondo de este una cruz perforada para la distribución del vapor.



Por otro lado, se tiene el sistema de circulación de fluidos adjunto al equipo compuesto de una serie de arreglos de tuberías, las cuáles se encuentran identificadas con diferentes colores indicando el tipo de fluido que circula en el interior de las mismas, ver Figura 1.1: Agua líquida subenfriada (verde), vapor de agua saturado (gris) y aire (azul). Las dos últimas tuberías tienen instalada una válvula de control automático, las cuales son dirigidas desde el panel de control.

2.2.2 Sistema de Tuberías

Como se mencionó anteriormente, el equipo tiene un sistema de tuberías de tres fluidos: agua líquida subenfriada, aire y vapor de agua saturado, ver Figura 2.1. La conexión de admisión de agua líquida saturada se encuentra en la parte inferior de este y proviene de Hidrocentro. En esta línea se encuentra una válvula solenoide (SV-6) que permite o no el paso del fluido y una de válvula de paso rápido (HV32), cuando se requiera el ingreso de agua de forma manual. El agua líquida saturada también ingresa al Autoclave por medio de una manguera conectada a la tubería de admisión de dicho fluido hacia un sistema de rociadores (HV33, HV34) colocados en la tapa del equipo.

La tubería de admisión de aire comprimido se encuentra en la parte superior izquierda de la unidad. Este fluido proviene del compresor reciprocante, instalado en el laboratorio, el cual puede generar presiones superiores a 30 psig (presión máxima que soporta el equipo). En esta línea se encuentran acopladas dos válvulas; una manual (HV24) para aquellos casos donde la unidad se opera de forma manual, y la válvula neumática cerrada en falla (PCV-21) y que necesita energía neumática para abrir, indispensable cuando el equipo se opera de forma automática o semiautomática.

La tubería de admisión de vapor de agua saturado se encuentra en la parte inferior izquierda del equipo, y está cubierta por un material aislante. En esta línea de admisión del fluido se encuentra conectada una válvula neumática cerrada en falla la cual necesita aire para abrir (TCV-11), con la cual se regula la cantidad de vapor de agua saturado que ingresa a la unidad en modo automático o semiautomático,



también cuenta con una válvula manual (HV13) con la cual se puede regular manualmente el ingreso de vapor al autoclave.

Además de estas tuberías de admisión de fluidos; se encuentran las líneas de expulsión o descarga de fluidos. Una se encuentra en la parte inferior axial del Autoclave y es por donde se descarga el agua alimentada o el agua producto de la condensación debida al intercambio térmico entre los fluidos, la expulsión se hace por medio de una válvula manual conectada en esta tubería (HV41). También está la tubería de descarga de vapor condensado (con cierto grado de inclinación para que el condensado salga por gravedad), en la cual se encuentra conectada una válvula solenoide (SV-2) y una trampa de vapor colocada al final de esta línea, en donde se recolecta el condensado.

La tubería de descarga de aire se encuentra en la misma dirección que la tubería de entrada de este mismo fluido; en la cuál se encuentra conectada una válvula neumática (PCV-22) abierta en falla la cual necesita aire para cerrar. Es aquí por donde se expulsa el aire alimentado en las etapas de venteo y enfriamiento.

2.2.3 Accesorios

El equipo cuenta con un sistema de control, el cual permite la operación del equipo en forma semiautomática o automática. Este sistema consta de: Registrador Controlador de temperatura y presión (TRC-11 y PRC-11, respectivamente), un sistema de control automático mediante un PLC instalado en la caja secuencial de control (KS-01), que tiene instalado también los interruptores que permiten el control manual del equipo. En la Figura 2.1 se observa la disposición de estos componentes.

2.2.4 Descripción del proceso

El autoclave opera en tres etapas: etapa de venteo, calentamiento y enfriamiento. En la primera etapa (venteo) se procede a ingresar vapor de agua saturado con el fin de desalojar el aire contenido en su interior. Luego, iniciando la segunda etapa (calentamiento), se mantiene el flujo de vapor de agua saturado de forma continua a fin de mantener la temperatura constante dentro del equipo. Finalmente se suministra un flujo de agua subenfriada para disminuir la temperatura dentro del autoclave para



cumplir la tercera etapa (enfriamiento), esto se hace conjuntamente con la admisión de aire comprimido para que la disminución de la temperatura sea a presión constante a fin de evitar deformaciones en la estructura del equipo. Además, cada etapa se lleva a cabo en un espacio de tiempo determinado por el proceso que se esté realizando.

En la Tabla 2.1 se presentan los datos técnicos del equipo.

Tabla 2.1 Datos técnicos del autoclave instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química.

Orientación:	Vertical
Medio de calentamiento:	Vapor de agua saturado
Capacidad aproximada	0,2834 m ³ (283,4 L)
Presión máxima de operación:	30 psig
Diámetro del cilindro exterior:	60,2 cm
Material	Acero

2.2.5 Metodología de operación

En esta sección se presentan los pasos a seguir para llevar a cabo la fase experimental de la investigación, apoyados en la Figura 2.1.

Arranque

2.2.5.1 Verificar que el generador de vapor este en funcionamiento, y que la presión de vapor generada sea mayor a 30 psig.

2.2.5.2 Verificar que el compresor recíprocante este en funcionamiento, y que la presión de aire generada sea mayor a 25 psig.

2.2.5.3 Cerrar la tapa del equipo, apretando las clavijas de seguridad por pares diametralmente opuestas. En el caso de realizar alguna actividad como esterilización o cocción de algún alimento, ingresarlos en el equipo antes de cerrar la tapa.

2.2.5.4 Verificar que todas las válvulas del equipo estén cerradas.



- 2.2.5.5 Abrir las válvulas HV-21 y HV-23.
- 2.2.5.6 Abrir la válvula de diafragma HV-22, girando el vástago en sentido horario hasta que el indicador PI-21 señale 34 psig.
- 2.2.5.7 Abrir la válvula HV-12.
- 2.2.5.8 Abrir la válvula de diafragma HV-11, girando el vástago en sentido horario hasta que el indicador PI-11 señale 40 psig.
- 2.2.5.9 Abrir la válvula HV-41 para drenar cualquier líquido que se encuentre dentro del autoclave.
- 2.2.5.10 Abrir la válvula HV-25 para permitir que salga el aire que será expulsado en la etapa de venteo.
- 2.2.5.11 Cerrar la válvula HV-41.
- 2.2.5.12 Abrir la válvula HV-31.
- 2.2.5.13 Abrir las válvulas HV-35 y HV-36 para visualizar el nivel de líquido dentro del equipo a través del indicador LI-31.
- 2.2.5.14 Ajustar el set point de la variable temperatura en la caja de control dando vuelta a la perilla roja y establecer el valor deseado.
- 2.2.5.15 Encender el panel de control secuencial en modo semiautomático accionando el interruptor ubicado en la parte lateral inferior del panel de control a la posición OFF.
- 2.2.5.16 Verificar que las válvulas de los aspersores (HV-33 y HV-34) estén cerradas, en caso de que no se vayan a utilizar.

Operación

- 2.2.5.17 Activar el interruptor 1 para alimentar aire al sistema de control automático y activar el cronómetro (# 1) para medir el tiempo de venteo.
- 2.2.5.18 Activar el interruptor 2 para enviar una señal neumática a la válvula solenoide SV-2 que permite el paso de condensado.
- 2.2.5.19 Al observar vapor en la línea de salida de aire, activar el interruptor 3 para enviar una señal neumática directa a la válvula PCV-22 para que se cierre. Desactivar el cronómetro (# 1) y anotar este tiempo como tiempo de venteo.
- 2.2.5.20 Simultáneamente al paso anterior, activar el cronómetro (# 2).

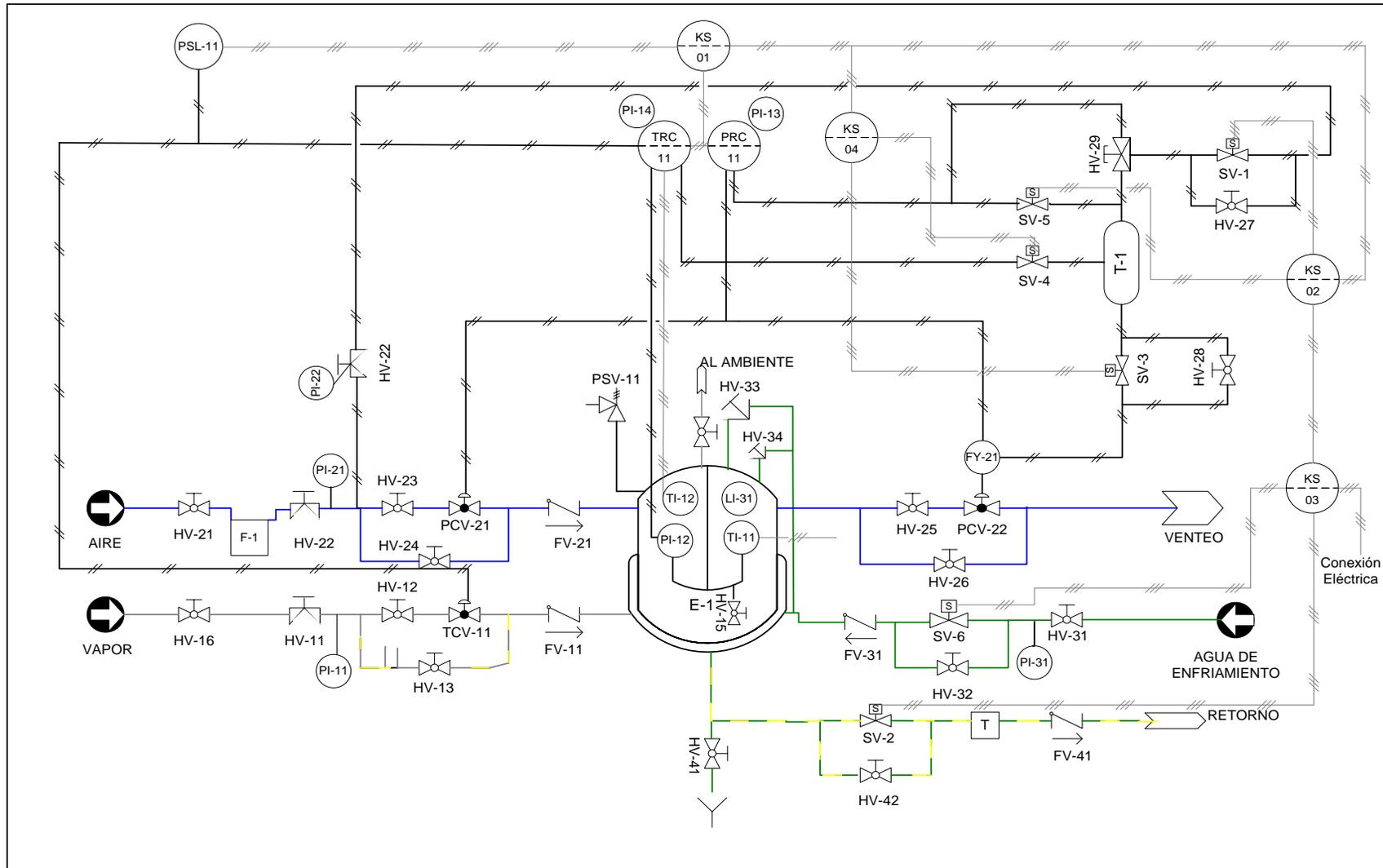


Figura 2.1 Diagrama de tuberías e instrumentación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.

Fuente: Acosta, 2003.



- 2.2.5.21 Esperar que la temperatura de operación se mantengan constantes a lo largo del tiempo. Desactivar el cronómetro (# 2) y anotar este tiempo como tiempo de estabilización.
- 2.2.5.22 Anotar el valor de temperatura que indique el indicador TI-1 y el valor de presión que indique el indicador PI-12.
- 2.2.5.23 Medir el flujo másico condensado tres veces a la salida del equipo, específicamente a la salida de la trampa de vapor.
- 2.2.5.24 Medir tiempo de recolección de cada condensado.
- 2.2.5.25 Ajustar el set point de la variable presión en la caja de control hasta la presión de operación.
- 2.2.5.26 Desactivar el interruptor 2 para evitar el paso de condensado y desactivar el interruptor 3 para cortar la señal directa a la válvula PCV-22.
- 2.2.5.27 Activar el interruptor 4 para controlar la presión interna a través de la válvula PCV-21.
- 2.2.5.28 Seguidamente se procede a activar el interruptor 5 para cortar el suministro de vapor al equipo.
- 2.2.5.29 Activar el interruptor 6 para suministrar agua de enfriamiento al equipo.
- 2.2.5.30 Simultáneamente al paso anterior, activar el cronometro (# 3).
- 2.2.5.31 Tomar temperatura interna del equipo y nivel de líquido cada 30s.
- 2.2.5.32 Repetir el paso 2.2.6.30 hasta que la temperatura de operación llegue a 110°F.
- 2.2.5.33 Desactivar el interruptor 6 para cortar el suministro de agua y anotar este tiempo como tiempo de enfriamiento.

Parada

- 2.2.5.34 Ajustar el set point de la variable presión al valor mínimo.
- 2.2.5.35 Esperar que la presión interna del equipo sea igual al valor ajustado.
- 2.2.5.36 Desactivar el interruptor 4.
- 2.2.5.37 Desactivar el interruptor 1.
- 2.2.5.38 Desenroscar las 8 clavijas de seguridad que sujetan la tapa del equipo.
- 2.2.5.39 Levantar la tapa.
- 2.2.5.40 Medir Temperatura y presión ambiente.



2.2.5.41 Repetir el procedimiento ajustando un nuevo valor de temperatura de operación.

2.3 BASES TEÓRICAS

2.3.1 Simulación

La simulación se define como el estudio de un sistema o sus partes mediante manipulación de su representación matemática o de su modelo físico. La mayoría de los procesos presentan situaciones cuyas soluciones requieren la experimentación con el sistema mismo, lo cual acarrea ciertas condiciones que lo hacen inviable: factores de costos, seguridad, de tiempo, de espacio. Es por eso que generalmente, se reemplaza el sistema original por otro sistema que, en la mayoría de los casos, es una versión simplificada. Este último sistema se denomina modelo y se utiliza para llevar a cabo las experiencias necesarias sin los inconvenientes planteados anteriormente.

Al proceso de experimentar con un modelo se denomina simulación. Al dispositivo completo utilizado, modelo y accesorios (sensores, registradores, indicadores, etc.), se llama simulador o programa de simulación. (Tarifa, 1997).

Un concepto que se ajusta a esta investigación es proporcionado por Shannon, R. (citado en Coss, 1998): Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

Actualmente la simulación presta un invaluable servicio en casi todas las áreas posibles, algunas de ellas son: procesos de manufacturas, plantas industriales, sistemas públicos, sistemas de transportes, construcción, diseño. Y las que se consideran importantes para este trabajo son educación y capacitación, pues ayuda a comprender un sistema real, y además es capaz de brindar información sobre variables que no pueden ser medidas en el sistema real.

2.3.2 Técnicas de Simulación



Existen básicamente tres técnicas disponibles para simular un proceso: la aproximación modular secuencial, la aproximación modular simultánea y la aproximación orientada a objeto. A continuación se describen estas técnicas:

La *aproximación modular secuencial* es el método comúnmente usado en los procesos de simulación. Es similar al método tradicional de cálculo manual de una unidad de proceso. Para cada unidad de proceso en el diagrama de flujo existe un módulo unitario.

Dados los valores de entrada (corrientes de entrada y salida, composición, caudales, temperaturas, presiones, propiedades de las corrientes y parámetros del equipo) el módulo unitario calculará las propiedades de las corrientes de salida. Las corrientes de salida de una unidad, constituirán las corrientes de entrada a otra unidad, el ciclo se repite hasta que el proceso esté completo.

La ventaja de este tipo de método es que la distribución en módulos de las distintas unidades de proceso, hace que los simuladores muy flexibles y fácilmente ampliables. Por el contrario, y como desventaja los problemas de simulación resueltos con este tipo de técnica son normalmente lentos, requieren de muchas iteraciones debido a la inicialización de variables y sus métodos de convergencias deben ser de convergencia lenta.

La *aproximación modular simultanea* consiste en un método híbrido desarrollado a partir de la técnica precedente. Este método implica una serie de pasos que van desde estimaciones iniciales hasta que dos iteraciones de valores supuestos convergen dentro de una tolerancia admitida.

En tanto que en la *aproximación orientada a objetos* el diseño y la optimización son llevadas a cabo simultáneamente por el mismo programa. La base de este método consiste en que todo proceso puede ser representado mediante una colección de ecuaciones diferenciales y algebraicas no lineales que son resueltas simultáneamente.

Estas ecuaciones consisten en modelos, ecuaciones de interconexión, especificaciones de diseño y correlaciones de propiedades físicas y termodinámicas.



Esta técnica admite la utilización de métodos de cálculo mucho más sofisticados que los anteriores, admite estrategias simultanea más sofisticadas. Como desventaja, requiere una herramienta informática mucho más potente que los anteriores para ser capaz de manejar el enorme y complejo conjunto de ecuaciones planteado.

2.3.3 Aplicaciones de la simulación

La simulación es de utilidad en las siguientes situaciones:

- No existe una formulación matemática: muchos sistemas reales no pueden ser modelados matemáticamente con las herramientas actualmente disponibles
- Existe una formulación matemática pero es difícil obtener una solución analítica: los modelos matemáticos utilizados para modelar un reactor nuclear o una planta química son imposibles de resolver en forma analítica sin realizar serias simplificaciones.
- No existe el sistema real: es el problema del ingeniero que tiene que diseñar un equipo nuevo o una nueva planta. El diseño del sistema mejorará notablemente si se cuenta con un modelo adecuado para realizar experimentos.
- Los experimentos son imposibles debido a impedimentos económicos, de seguridad, de calidad o éticos: en este caso, el sistema real está disponible para realizar experimentos, pero la dificultad de los mismos hace que se descarte esta opción.
- El sistema evoluciona muy lentamente o muy rápidamente. (Tarifa, 1997)

2.3.4 Ventajas y desventajas de la simulación

La simulación es una de las técnicas más comúnmente usadas porque ofrece las siguientes ventajas:

1. A través de la simulación se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de las alteraciones en el comportamiento del sistema.



2. Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
3. Esta técnica puede ser usada para experimentar con nuevas situaciones sobre las cuales se tiene poca o ninguna información, ya que a través de la experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos. (Coss, 1998)

Entre las posibles desventajas de la simulación se pueden citar:

1. El desarrollo de un modelo puede ser costoso, laborioso y lento: El desarrollo de un simulador implica tiempo, esfuerzo y dinero.
2. Existe la posibilidad de cometer errores: Nunca se debe olvidar que la experimentación se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema real; entonces, si el modelo está mal o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos.
3. No se puede conocer el grado de imprecisión de los resultados: Por lo general, el modelo se utiliza para experimentar situaciones nunca planteada en el sistema real; por lo tanto, no existe información previa para estimar el grado de correspondencia entre la respuesta del modelo y la del sistema real.

2.3.5 Lenguajes de programación

En la actualidad se disponen de una gran cantidad de programas comerciales para la simulación de procesos dirigidos a la industria química y petroquímica, tales como HYSYS, Aspen Plus, Súper Pro etc. Sin embargo, esta lista resulta limitada en el caso de programas de simulación para procesos no convencionales, como es el caso del análisis de autoclaves.

Los lenguajes de programación son herramientas que nos permiten crear programas que nos permiten optimizar o diseñar procesos de la industria química o petroquímica, por lo que esta aplicación ha alcanzado un alto grado de aplicación a nivel académico e industrial. Según la enciclopedia wikipedia (2006), un lenguaje de programación es una técnica estándar de comunicación que permite expresar las



instrucciones que han de ser ejecutadas en una computadora. Consiste en un conjunto de reglas sintácticas y semánticas que definen un lenguaje informático.

Los lenguajes de programación se dividen en dos tipos fundamentales: lenguajes de bajo nivel y lenguajes de alto nivel, cada uno de los cuales tiene características y campos de aplicación definidos.

En los lenguajes de bajo nivel los programas se expresan en forma relativamente próxima a aquellos que el procesador de la computadora puede ejecutar directamente. En cuanto a los lenguajes de alto nivel son orientados al programador; mientras más alto sea el nivel más accesible será al programador. Existen lenguajes de programación que son muy utilizados en ingeniería, alguno de ellos se explicarán brevemente.

QuickBasic

Microsoft QuickBASIC (frecuentemente abreviado, como QB) es un descendiente del lenguaje de programación Basic que Microsoft Corporation desarrolló para su uso con el sistema operativo MS-DOS. Esta ligeramente basado en GW-Basic pero añade tipos definidos por el usuario, estructuras de programación mejoradas, mejores gráficos y soporte de disco, y un compilador además del intérprete. Microsoft sacó a la venta QB como un paquete de desarrollo comercial.

Microsoft publicó la primera versión de QB el 18 de agosto de 1985, en un único disquete de 5.25". QB usaba un entorno de desarrollo integrado (IDE) radicalmente diferente al que acompañaba a las versiones anteriores de Basic. Los números de línea ya no eran necesarios puesto que los usuarios podían insertar y quitar líneas directamente mediante un editor de textos en pantalla. La última versión de QB fue la 4.5 aunque se siguió desarrollando como el Professional Development System (PDS), cuya última versión fue la 7.1. A la versión PDS también se le llamó a veces QB Extendido.

DELPHI

Es un entorno de desarrollo ágil de software diseñado para la programación de propósito general con énfasis en la programación visual. En Delphi se utiliza como



lenguaje de programación una versión moderna de Pascal llamada Object Pascal. Es producido comercialmente por la empresa estadounidense Borland. En sus diferentes variantes, permite producir archivos ejecutables para Windows, GNU/Linux y la plataforma .NET. El principal uso de Delphi es para el desarrollo de aplicaciones visuales y de bases de datos cliente-servidor. Debido a que es una herramienta de propósito múltiple, se usa también para proyectos de casi cualquier tipo, incluyendo aplicaciones de consola, CGI y servicios del sistema operativo. Algunas de sus características principales:

- **Borland Database Engine (BDE):** Es un motor de conexión a bases de datos de uso bastante amplio y que permite manejar bases de datos de escritorio como dBase, Foxpro y Paradox, además de ofrecer la capacidad para conectarse a servidores SQL locales y remotos
- **Desarrollo visual:** Como entorno visual, la programación en Delphi consiste en diseñar los formularios que componen al programa colocando todos sus controles (botones, etiquetas, campos de texto, etc.) en las posiciones deseadas, normalmente usando un ratón. Luego se asocia código a los eventos de dichos controles y también se pueden crear módulos de datos, que regularmente contienen los componentes de acceso a datos y las reglas de una aplicación.
- **Entorno Integrado de Desarrollo (EID):** O IDE en inglés (Integrated Development Environment), es el ambiente de desarrollo de programas de Delphi. Se trata de un editor de formularios (que permite el desarrollo visual), un potente editor de textos que resalta la sintaxis del código fuente, la paleta de componentes y el depurador integrado, además de una barra de botones y un menú que nos permite la configuración de la herramienta y la gestión de proyectos.
- **Depurador integrado:** Es una potente característica que nos permite establecer puntos de ruptura (breakpoints), la ejecución paso a paso de un programa, el seguimiento de los valores de las variables y de la pila de



ejecución, así como la evaluación de expresiones con datos de la ejecución del programa.

Microsoft Excel

Es un programa de hoja de cálculo escrito y distribuido por Microsoft para ordenadores usando como sistema operativo Microsoft Windows y Apple Macintosh. Actualmente, es la hoja de cálculo más utilizada para estas plataformas y lo ha sido desde su versión 5 (lanzada en 1993) formando parte del paquete ofimática Microsoft Office. Algunas de las funciones que trae incorporado el programa son:

- **Funciones lógicas:** funciones que nos permiten "preguntar" sobre el valor de otras y actuar según la respuesta obtenida.
- **Funciones estadísticas:** permiten realizar cálculos estadísticos como desviación estándar y funciones de probabilidades
- **Funciones matemáticas:** funciones tales como promedio, coseno, seno, mínimo, máximo, etc.
- **Funciones financieras:** permiten el cálculo de intereses
- **Funciones de fecha y hora:** manejo de diferencia de hora y tiempo, como días, meses y años.

Además cuenta con herramientas que permiten programar automáticamente los cálculos y el manejo de datos en las hojas de trabajo.

Lenguaje de programación C

Es un lenguaje de programación creado en 1969 por Ken Thompson y Dennis M. Ritchie en los Laboratorios Bell como evolución del anterior lenguaje B. Al igual que B, es un lenguaje orientado a la implementación de Sistemas Operativos, concretamente Unix. C es apreciado por la eficiencia del código que produce y es el lenguaje de programación más popular para crear software de sistemas, aunque también se utiliza para crear aplicaciones. Uno de los objetivos de diseño de este lenguaje fue que sólo fueran necesarias unas pocas instrucciones en lenguaje máquina para traducir cada elemento del lenguaje, sin que hiciera falta un soporte intenso en tiempo de ejecución. Es muy posible escribir C a bajo nivel de



abstracción; de hecho, C se usó como intermediario entre diferentes lenguajes. C tiene las siguientes características de importancia:

- Un núcleo del lenguaje simple, con funcionalidades añadidas importantes, como funciones matemáticas y de manejo de ficheros, proporcionadas por bibliotecas.
- Es un lenguaje muy flexible que permite programar con múltiples estilos. Uno de los más empleados es el estructurado no llevado al extremo.
- Un sistema de tipos que impide operaciones sin sentido.
- Usa un lenguaje de preprocesado, el preprocesador de C, para tareas como definir macros e incluir múltiples ficheros de código fuente.
- Acceso a memoria de bajo nivel mediante el uso de punteros.
- Un conjunto reducido de palabras clave.
- Los parámetros se pasan por valor. El paso por referencia se puede simular pasando explícitamente el valor de los punteros.
- Punteros a funciones y variables estáticas, que permiten una forma rudimentaria de encapsulado y polimorfismo.

Visual Basic

Es un lenguaje de programación con un dialecto de BASIC con importantes añadidos. Su primera versión fue presentada en 1991 con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y en cierta medida también la programación misma.

Es un lenguaje de fácil aprendizaje pensado tanto para programadores principiantes como expertos, guiado por eventos, y centrado en un motor de formularios poderoso que facilita el rápido desarrollo de aplicaciones gráficas. Su principal innovación, que luego fue adoptada por otros lenguajes, fue el uso de un tipo de dll, llamado inicialmente vbx y posteriormente ocx, que permiten contener toda la funcionalidad de un control y facilitar su rápida incorporación a los formularios.



Su sintaxis, derivada del antiguo Basic, ha sido ampliada con el tiempo al agregarse las características típicas de los lenguajes estructurados modernos. Se ha agregado una implementación limitada de la Programación Orientada a Objetos (los propios formularios y controles son objetos), aunque si que admite el polimorfismo mediante el uso de los Interfaces no admite la herencia. No requiere de manejo de punteros y posee un manejo muy sencillo de cadenas de caracteres. Posee varias bibliotecas para manejo de bases de datos, pudiendo conectar con cualquier base de datos a través de ODBC (Informix, DBase, Access, MySQL, SQL Server, PostgreSQL ,etc) a través de ADO.

A continuación se presentan resúmenes de las ventajas y desventajas de los programas descritos anteriormente:

QUICKBASIC

Ventajas	Desventajas
Sintaxis sencilla	Pocas funciones y herramientas.
Buena interfaz	Obsoleto.
Excelente fichero de ayuda	Lento.
Gratuito	

DELPHI

Ventajas	Desventajas
Fácil de programar	Sintaxis compleja.
Muy rápido	Poco difundido.
Interfaz amigable y sencilla	Ayuda en inglés.

MICROSOFT EXCEL

Ventajas	Desventajas
Facilidad de manejo y potencia	Precio elevado.
Útil en cálculos matemáticos	Los programas ocupan más espacio.
Buen entorno gráfico	Muy básico.
Rápido	

LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN C

Ventajas	Desventajas
Muy eficiente	Sintaxis compleja.



Es un lenguaje universal
Realiza programas modulares
Excelentes herramientas
Es orientado a objetos
Muy rápido

Difícil de aprender, como primer lenguaje de programación.
Muy costoso.

VISUAL BASIC

Ventajas

Lenguaje simple y por tanto fácil de aprender.
La sintaxis es sencilla.
Soporta el uso de componentes COM y ActiveX.
Permite crear controles personalizados fácilmente del mismo modo que el diseño de formularios.
Interfaz amigable y sencilla.
Es muy conocido.

Desventajas

Sólo genera ejecutables para Windows.
Los ejecutables generados son relativamente lentos.
Es costoso.
No es adecuado para aplicaciones grandes, multimedia, videojuegos, editores gráficos, etc.
No permite características de programación avanzada.

2.3.6 Autoclave

Son equipos de forma cilíndrica, utilizados para cocimiento en procesos industriales. En especial, se utilizan para la esterilización de conservas y alimentos enlatados cuyas características requieren un tratamiento por encima de los 100 grados centígrados. Se pueden encontrar en disposición vertical (carga por la parte superior) y horizontal (carga frontal) que se cargan y descargan cada vez que se procesa un lote.

Este equipo presenta una alta variedad en el mercado, debido a la diversificación de procesos a los que se destina; encontrándose tanto estáticos (más comunes) o giratorios. Entre ellos se encuentran:

- Esterilizadores discontinuos o por cargas



- Esterilizadores continuos

Dependiendo del fluido calefactor, destinado a aplicar calor al alimento, podemos encontrar:

- Autoclaves para tratamiento con agua
- Autoclaves para tratamiento con vapor
- Autoclaves para tratamiento con mezcla vapor / aire, denominados generalmente Autoclaves a sobrepresión.

Aplicaciones

1. En función del fluido que utilicen como medio calefactor:

Autoclaves para tratamiento con agua:

Las técnicas de agua en forma de lluvia o por inmersión, requieren el empleo de un sistema externo de inyección de vapor o de un sistema de intercambiador de calor fuera del ambiente directo del autoclave.

- Con agua pulverizada

El aporte de calor se realiza gracias a un pequeño volumen de agua, almacenado en la parte baja del autoclave, que es bombeado con una bomba de fuerte caudal y pulverizado sobre los envases. Este volumen de agua pasa a través de un intercambiador donde se calienta por inyección de vapor.

- Inmersión en agua

El aporte de calor se realiza a partir de un volumen de agua precalentado a una temperatura determinada y almacenado en un tanque encima del autoclave, éste inunda la cámara de tratamiento y está bombeado en circuito cerrado. Este volumen de agua se calienta también por la acción de un vapor.

Autoclaves para tratamiento con vapor

La esterilización con vapor saturado es el método universal más utilizado, aplicable a todos aquellos artículos que pueden soportar el calor y la humedad. Para conseguir una perfecta relación entre la temperatura de esterilización y la presión del vapor saturado, hay que eliminar eficazmente el aire del interior del autoclave.



Autoclaves para tratamiento con mezcla vapor / aire

Denominados generalmente Autoclaves a sobrepresión. El vapor está directamente introducido en el autoclave y distribuido por acción de una turbina de ventilación que genera una circulación constreñida del vapor y fortalece la homogeneidad de temperatura durante el tratamiento térmico. La presión se regula independientemente de la temperatura por inyección o escape de aire comprimido

2. En función del movimiento en el interior del autoclave:

Autoclaves estáticos

Los envases permanecerán en el interior del autoclave en la misma posición que fueron incluidos durante todo el periodo del proceso de esterilización.

Autoclaves giratorios o rotativos

El movimiento del rotor da lugar a la evacuación previa del aire en el espacio de cabeza del recipiente, debido a la agitación axial del envase. Se utiliza en alimentos líquidos especialmente si son viscosos.

Generalmente, este tipo de equipos se destina a empresas fabricantes de productos alimenticios conservados mediante tratamiento térmico después del envasado. De entre todas ellas, destacan las destinadas a la fabricación de conservas, empresas lácteas, empresas de mermeladas, fábricas de bebidas, etc.

Además del sector alimentario, existe otro en el cual el autoclave es imprescindible como método de trabajo, el sector sanitario, donde todo el material utilizado ha debido ser esterilizado previamente. Este tipo de autoclaves son de menor tamaño, y generalmente sólo operan con vapor, como fluido calefactor.

Ventajas competitivas

Ventajas de los Autoclaves para tratamiento con agua

- Recuperación importante de energía.



- El volumen de agua usado para el tratamiento térmico está almacenado y utilizado en el ciclo siguiente.
- Facilita el control de la temperatura
- Limita el choque térmico durante la calefacción y el enfriamiento.

Ventajas de los Autoclaves para tratamiento con vapor

- El vapor de agua ofrece una velocidad de calefacción superior a la que se podría alcanzar con agua caliente.
- Menor consumo energético, de hecho el agua se calienta por inyección de vapor de agua.

Ventajas de los sistemas a sobrepresión

- Economías de energía con consumos optimizados de vapor gracias a la inyección directa de vapor.
- Ningún fluido intermediario consumidor de energía es necesario para calentar los productos.
- Rapidez del calentamiento.
- Homogeneidad de temperatura independiente de la forma y de la disposición de los envases en los cestos gracias a la circulación constreñida. Proceso ideal para los productos pasteurizados, la ausencia de agua en la parte baja del autoclave prohíbe todo desarrollo microbiano en el mismo.
- Posibilidad de realizar cocciones de productos a granel en el caso que el vapor sea de calidad alimenticia.

Ventajas e inconvenientes de los sistemas en disposición horizontal frente a los de disposición vertical.

- Se suele preferir el autoclave en disposición horizontal, por ser de más fácil acceso y mantenimiento que uno vertical, además de ofrecer una mayor facilidad para dotar al equipo de un sistema de agitación.
- Por razones de espacio suele ser más habitual colocar un autoclave en disposición vertical.



2.3.7 Balance de Energía

Se debe considerar que la energía existe en muchas formas distintas. Himmelblau (1997) considera seis tipos de energía: trabajo, calor, energía cinética, energía potencial, energía interna y entalpía.

En este caso, la energía implicada en el proceso es el calor. Este se define como la parte del flujo total de energía a través de la frontera de un sistema que se debe a una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. Si se quiere evaluar la transferencia de calor cuantitativamente, a menos que se de a priori, se debe aplicar el balance de energía o utilizar una fórmula empírica para estimarla.

El balance de energía es un principio físico basado en la ley de la conservación de la energía. Es un proceso contable donde se mide la energía entrante y saliente de un sistema, de manera que balancean o igualan las entradas con las salidas.

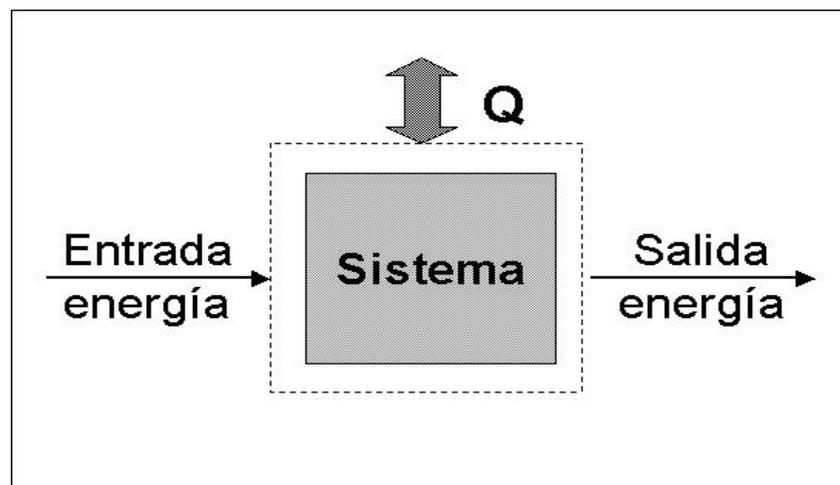


Figura 2.2 Sistema con entrada y salida de energía.

Fuente: Propia, 2006.

El concepto del balance de energía macroscópico puede enunciarse de la siguiente manera:



$$\left[\begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Transferencia} \\ \text{de energía} \\ \text{al sistema} \\ \text{a través} \\ \text{de su frontera} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Transferencia} \\ \text{de energía} \\ \text{fuera del} \\ \text{sistema} \\ \text{a través} \\ \text{de su frontera} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Generación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Consumo} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right]$$

Ecuación 2.1 Balance Global de Energía.

Fuente: Himmelblau 1997

Calor latente

La diferencia entre la entalpía de un líquido saturado y de un vapor saturado, designadas h_f y h_g respectivamente, se conoce como calor latente de vaporización y se define como la cantidad de calor necesario para vaporizar una unidad de masa de líquido, y el calor añadido no produce ningún cambio de temperatura.

Una interpretación física del calor latente que se adapta al proceso que ocurre en un autoclave, es el que se aplica a un sistema de flujo estable. Es decir, si aplicamos la primera ley a un flujo estable cuasi equilibrio, proceso a presión constante, sin trabajo y sin cambios en la energía potencial o cinética, se nota que el calor añadido para evaporar un líquido saturado a vapor saturado bajo estas condiciones es un calor latente. Esta propiedad se tabula con frecuencia. (Jones, 1997)

Calor Sensible

En el caso de una sola fase, la entalpía varía en función de la temperatura. Los cambios de entalpía que tienen lugar en una sola fase se conocen como cambios de calor sensible. (Himmelblau, 1997). Por lo que podría definirse como la cantidad de calor que cede o absorbe un cuerpo sin cambiar de estado.

Transferencia de calor

La transferencia de calor, en física, es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura (Díaz, 2005); En tanto que, Incropera y DeWitt (1999) la definen como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura.



Existen tres procesos básicos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación, estos procesos pueden ocurrir por separado o simultáneamente. En el proceso que se dispone a investigar en este trabajo, son importantes solo la conducción y la convección. A continuación se presenta las bases teóricas de estos procesos.

Conducción

Es la transferencia de calor a través de un material estacionario, tal como un sólido o un fluido en reposo o régimen laminar. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como Ley de Fourier, esta expresa que la velocidad de transferencia de calor de un cuerpo por unidad de área transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo con el signo cambiado. El factor de proporcionalidad se llama conductividad térmica, y depende del material del compuesto. Esto se puede ilustrar en la siguiente figura:

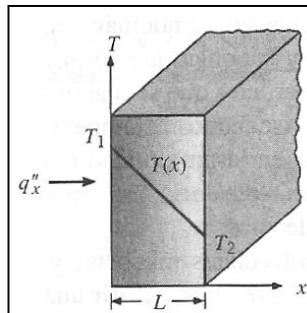


Figura 2.3 Transferencia de calor por conducción

Fuente: Incropera, 1999.

El calor se transfiere en dirección x perpendicular a la dirección de transferencia. Para la pared plana que se muestra en la Figura 2.3, el modelo se expresa como:

$$q''_x \cong k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.2) \quad (\text{Incropera, 1999})$$

Donde:

q''_x : flujo de calor a través de la pared

k : Conductividad térmica de la pared



A: Área transversal de la pared

T: Temperatura de la pared en una distancia x

x: espesor de la pared

Convección

Es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla, produciendo un movimiento del fluido el cual puede ser forzado o natural. Si el movimiento del fluido es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencia de densidad ocasionadas por la variación de temperatura se habla de convección natural. En cambio hablamos de convección forzada, cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o vientos atmosféricos.

La convección se modela matemáticamente mediante la Ley de enfriamiento de Newton, que expresa que el flujo de calor es proporcional a la diferencia de temperaturas de la superficie y del fluido, y la constante de proporcionalidad se coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual depende de las condiciones en la capa límite, la naturaleza del movimiento del fluido. La expresión de esta ley es:

$$q' = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_f) \quad (2.3) \quad (\text{Incropera, 1999})$$

Donde:

q'' : Flujo de calor

h: Coeficiente de transferencia de calor por convección

A_s : Área de la superficie de transferencia

T_s : Temperatura de la superficie

T_f : Temperatura del fluido.

Radiación

Es la transferencia de calor debida a la energía emitida por todos los cuerpos en forma de ondas electromagnéticas viajando a la velocidad de la luz y propagándose aún en el vacío. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no necesita un medio de transmisión y puede ocurrir en el vacío.



La radiación es un fenómeno volumétrico, sin embargo, en algunos cuerpos (sólidos) llamados opacos, la radiación no se transmite dentro del cuerpo y por lo tanto la radiación emitida proviene únicamente de la superficie.

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro (radiador ideal) a la misma temperatura y está dado por

$$q_n'' = E_g = \varepsilon \sigma A_s T^4 \quad (2.4) \text{ (Incropera, 1999)}$$

Donde:

E_g = Potencia emisiva de un cuerpo no negro (gris).

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, $0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h ft}^2 \text{ R}^4$)

ε = Emisividad ($0 < \varepsilon < 1$), Para un cuerpo negro $\varepsilon = 1$

A_s = Área de la superficie emisora.

T = Temperatura superficial del cuerpo.

En el caso de superficies que transfieren calor tanto por convección como por radiación a los alrededores, se puede decir que la transferencia de calor desde la superficie es:

$$q = q_{conv} + q_{rad} \\ q = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.5) \text{ (Incropera, 1999)}$$

Donde:

T_∞ = Temperatura del medio.

2.3.8 Métodos Numéricos

Muchos planteamientos matemáticos sobre situaciones problemáticas, en procesos químicos, son de difícil solución analítica y hacen que el ingeniero químico tenga que recurrir a los métodos numéricos para encontrar una respuesta a sus casos de estudio. Una necesidad muy frecuente es la de representar un conjunto de datos experimentales tomados en forma discreta ajustados a una expresión analítica que permita de forma más fácil la estimación de, por ejemplo, valores intermedios, sumatorias o integrales y variaciones o razones de cambio entre ellos.



Por métodos numéricos se entiende como el conjunto de métodos matemáticos utilizados para generar soluciones numéricas, generalmente dadas por aproximación, de problemas cuya solución analítica es usualmente difícil, trabajosa o imposible de hallar. (Hernández, 2002)

Los términos de interpolación y aproximación se refieren a dos operaciones fundamentalmente distintas. La interpolación se usa para obtener datos intermedios a partir de una tabla en la cual los valores del conjunto de llegada (y_i) son conocidos con gran precisión. En contraparte, la aproximación se utiliza para generar una función matemática a partir de un conjunto de datos conocidos (generalmente experimentales), con un cierto grado de error o incertidumbre.

Los métodos de aproximación permiten obtener una expresión analítica que ajusta lo mejor que se pueda ajustar a todos los puntos del conjunto de datos utilizados. No pasa a priori por ninguno de los puntos experimentales, pero tampoco se aleja mucho de ninguno. La técnica de los mínimos cuadrados, aplicada a distintas formulaciones se presenta a continuación. (Ledanois et col, 2000)

Mínimos Cuadrados

Este método se basa en la suposición, que la mejor curva representativa es aquella para la cual la suma de los cuadrados de los residuos (errores) es un mínimo. Los residuos son elevados al cuadrado para eliminar lo que concierne a su signo. Este método es mucho más complicado para polinomios de mayor grado y se usa para polinomios no mayores de segundo grado. El polinomio es el tipo de función más simple utilizado en regresión. Si el orden del mismo ya está fijado, el problema se reduce a determinar los valores de los coeficientes que minimicen la sumatoria de los cuadrados de los errores.

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2. \quad (2.6) \text{ (Tarifa, 1997)}$$

Si el orden del polinomio debe también ser determinado, entonces el orden óptimo y los coeficientes surgen de minimizar la varianza de los errores de la muestra, es decir de resolver el siguiente problema de optimización más general; donde se desea ajustar los coeficientes a y el orden M del polinomio P que es



función de x para que los valores devueltos minimicen la varianza de los errores de una muestra con N puntos experimentales (xi,yi)

$$\begin{aligned}
 & \underset{M,a}{\text{Min}} S^2 \\
 & \text{s.a:} \qquad \qquad \qquad (2.7) \text{ (Tarifa, 1997)} \\
 S^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - P(M, a, x_i))^2}{N - M - 1}
 \end{aligned}$$

Donde:

S²: Varianza

a: coeficientes del polinomio P

M: Grado del polinomio a usar, i= 1....n

N: muestra de números experimentales (xi, yi)

La obtención de los valores de los coeficientes que minimizan esta la función es un problema que se puede resolver recurriendo a la derivación parcial de la función en términos de los coeficientes, de esta forma se obtienen ecuaciones llamadas ecuaciones normales del modelo que pueden ser resueltas por cualquier método ya sea igualación o matrices para obtener los valores de los coeficientes.

Formula de Interpolación de Thiele

En matemáticas, interpolación de Thiele es una formula de interpolación para una función, la cual se expresa como una fracción continua, donde existe un termino que representa la diferencia reciproca. La formulación de este método se presenta a continuación, en la ecuación 2.8.

$$f(x) = f(x_1) + \frac{x - x_1}{\rho(x_1, x_2) + \frac{x - x_2}{\rho_2(x_1, x_2, x_3) - f(x_1) + \frac{x - x_3}{\rho_3(x_1, x_2, x_3, x_4) - \rho(x_1, x_2) + \dots}}} \quad (2.8) \text{ (Weisstein, 2007)}$$



CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se define el tipo de investigación y se presenta el desarrollo de las actividades que permitieran el logro de cada uno de los objetivos específicos propuestos en este proyecto.

Este trabajo se puede clasificar a nivel de diseño como una investigación experimental, ya que, como indica Tamayo (1988), se manipulan variables a diferentes condiciones de operación con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación, lo cual constituye una de las características fundamentales del procedimiento o técnica experimental. El experimento provocado por el investigador, le permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas.

A nivel de profundidad, esta investigación es del tipo evaluativa, ya que según Tamayo (1988), consiste en obtener información sistemática y objetiva sobre un fenómeno y en interpretar esta información con la finalidad de relacionar las variables. Es por ello que se estudia el comportamiento del equipo en experimentación a condiciones de operación diferentes y finalmente comparar los datos obtenidos a través del simulador con aquellos obtenidos experimentalmente, comprobando la confiabilidad del software.

Para el desarrollo de la investigación se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diagnóstico del funcionamiento actual del equipo autoclave.
- Caracterización del equipo.
- Obtención de los modelos matemáticos necesarios para simular el comportamiento real del autoclave
- Selección del software para la programación del simulador.
- Desarrollo del modulo del programa de simulación.
- Validación del software para determinar su confiabilidad.



3.1 PROCEDIMIENTOS Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En esta sección se describen los actividades a seguir para el cumplimiento de los objetivos planteados, presentando además los diferentes instrumentos de recolección de información necesaria para desarrollara cada objetivo.

3.1.1 Diagnosticar el funcionamiento actual del autoclave, a fin de determinar el modo de operación y variables más importantes del equipo

Reconocimiento de las partes que componen al equipo

Mediante las visitas al laboratorio y las entrevistas al personal capacitado se recopilan todos los datos importantes que cumplen la etapa de reconocimiento. Se evalúa las condiciones del equipo mediante observación directa y mediante una operación inicial en el equipo, y se lleva un registro de las condiciones encontradas que se presentan en la Tabla 3.1.

- **Diagnóstico del equipo:** se identifica y comprende cada una de las partes que lo componen: las líneas de entrada y salida: aire, agua y vapor; los sensores instalados, sistema de control automático, válvula de descarga de vapor; y se elabora el diagrama de flujo del equipo. (ver Figura 1.1).
- **Diseño del equipo:** se identifican las características del equipo: proveedor, material de construcción, dimensiones, medio de calentamiento y orientación del equipo. Este apartado se describe en el capítulo II.
- **Operación del equipo:** Se realiza una revisión de los trabajos anteriores, bibliografía especializada y se establece que el equipo trabaja en tres etapas: etapa de venteo, etapa de calentamiento y etapa de enfriamiento. Además, se realiza una operación preexperimental a fin de conocer los rangos de operación del equipo, tomando en cuenta el método de operación establecido en el Capítulo II de esta investigación.

Tabla 3.1 Esquema de Formato de inspección

Equipo	Componente	Estado	Observación
	Modelo		

Cabe destacar que en esta etapa se realiza la calibración necesaria a los instrumentos de medición y la revisión del estado general de las válvulas.



Recopilación de los fundamentos teóricos que sustenten los fenómenos presentes.

El fenómeno que se lleva a cabo dentro del autoclave es un equilibrio líquido-vapor de una sustancia pura (no mezcla); los aspectos más importantes pueden resumirse a continuación:

1. Características del autoclave.
2. Balance de energía, que involucra calor sensible y calor latente.
3. Transferencia de calor: convección y conducción.

En el capítulo II de este trabajo se presentan los fundamentos teóricos involucrados, los cuales se basan principalmente en el planteamiento de los modelos matemáticos que representan los fenómenos termodinámicos y de transferencia de calor que ocurren durante la experimentación.

Identificación y análisis de las variables que intervienen durante la operación del equipo

Para identificar las variables se realizó una evaluación de investigaciones previas realizadas en el equipo, entrevistas con los técnicos, personal capacitado en la operación del equipo y revisión de bibliografía especializada.

A partir de esto se llevó a cabo un proceso de tormentas de ideas donde se plantean todas las variables posibles que intervienen en el proceso y se dividieron en variables que afectan la operación y se pueden controlar, variables que afectan la operación y no se pueden controlar.

Establecimiento de las variables más importantes

Se toman en cuenta tres variables fundamentales e influyentes en el proceso de operación del autoclave; dichas variables son presión de operación [psia], temperatura de operación [°F] y apertura de las válvulas de los aspersores [abierta o cerrado]. Éstas se escogen debido a que en la bibliografía consultada y en trabajos realizados anteriormente, se ha determinado que son los factores con mayor influencia en el proceso de equilibrio líquido vapor, y en el proceso de enfriamiento del equipo, además son variables manipulables y controlables en el proceso.



3.1.2 Caracterizar el equipo autoclave con la finalidad de conocer su comportamiento.

Para caracterizar el equipo se planifica una evaluación experimental, donde se reunirá la información necesaria para llevar a cabo el objetivo. Aplicando las fases correspondientes a la metodología de diseño de experimento:

Planificación del experimento: En esta fase se define el equipo con el cual se va trabajar para el desarrollo y ejecución del experimento, basado en las variables independientes seleccionadas anteriormente, estableciendo los objetivos del mismo, con la finalidad de plantear una secuencia lógica de actividades y tareas; para el monitoreo y control del experimento.

Diseño de experimento: Esta fase consiste en ubicar el tipo de procedimiento experimental que se adecue al objetivo general de la investigación, a fin de evaluar el número necesario de tratamiento.

Conducción del experimento: En esta fase se establecerán las condiciones en las cuales se realizará el experimento, población y muestra a la que se va a realizar la experimentación; así como los equipos a utilizar, se elaborarán los instrumentos de recolección de datos donde se llevarán a cabo todas las anotaciones para monitorear el proceso.

Análisis de resultado del experimento: Donde se estudiarán e interpretarán los resultados obtenidos con la finalidad de caracterizar al equipo.

Planificación del experimento:

Identificación de las variables involucradas en la toma de datos

Partiendo del análisis de variables realizado en el objetivo anterior y de los fenómenos que intervienen en el equipo, se toma cada una de las variables que puedan estar involucradas en los balances de energía, además de aquellas que se usan para un fin específico y que puedan ser medidas en la experimentación. Las variables se tomarán por etapa, y se pueden mencionar:

- **Etapas de venteo:** tiempo de venteo, presión y temperatura ambiente.



- **Etapa de calentamiento:** tiempo de estabilización, temperatura interna del autoclave, presión interna del autoclave, masa de condensado, tiempo de recolección de condensado, temperatura del condensado y temperatura de pared de la trampa de vapor.
- **Etapa de enfriamiento:** nivel del agua, temperatura interna, tiempo de enfriamiento, temperatura final del agua de enfriamiento, presión de agua subenfriada.

Diseño de Experimento

Para llevar a cabo el desarrollo experimental se usó como apoyo el arreglo factorial de tipo cuantitativo debido a que los niveles de prueba pueden tomar cualquier valor dentro de cierto intervalo, además se cuenta con una herramienta estadística que permite la aleatorización de los experimentos.

Cabe destacar que el análisis de las variables se hará por cada etapa de operación, por lo que el uso del diseño de experimento factorial ayuda a interrelacionar las etapas entre si, más sin embargo no es la herramienta adecuada para este tipo de proceso donde las variables son independientes en cada etapa, acotando que el objetivo de este trabajo es obtener una herramienta que simule el comportamiento real del equipo más no se busca obtener una combinación de variables que optimicen ninguna variable respuesta en específico.

A fin de obtener los niveles de la variable temperatura de operación, se procede a tomar el rango de presión manométrica del registrador de presión, el cual resultó ser de 0 psig a 30 psig (placas de PRC-TRC), para obtener la presión de operación, la cual se determina por medio de la ecuación (3.1):

$$P_{absoluta} = P_m + P_{amb} \quad (3.1) \quad (\text{Himmelblau, 1997})$$

Donde:

P_{absoluta}: Presión absoluta, en este caso Presión de operación (psia).

P_m : Presión manométrica (psig).

P_{amb}: Presión ambiente (mmHg).



Con el valor obtenido en la ecuación 3.1, se busca en las tablas de propiedades del vapor de agua (Apéndice A, Tabla A.1) la temperatura de saturación del vapor, los resultados de este procedimiento se observan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Temperatura de saturación a partir de la presión de operación del equipo

Presión Manométrica (Pm ± 1) psig	Presión Ambiente (Pamb ± 0,05) mmHg	Presión de operación inicial (Popi ± 1) psia	Temperatura de Saturación (Tsat ± 1) °F	Temperatura de Operación (Tope ± 1) °F
5	709,27	19	224	217
10	709,27	24	237	230
15	709,27	29	248	241
20	709,27	34	257	250
25	709,27	39	265	258

Las temperaturas de saturación obtenidas por este procedimiento se corrigieron restándole un factor de corrección de 7 °F, debido a que la temperatura máxima del registrador instalado en el equipo es de 258 °F, siete grados menor a la temperatura de saturación para la presión manométrica de 25 psig. Además, debido a que la apreciación del registrador es de 2 °F, los valores impares se ajustaron a su valor par inmediato superior.

Luego de la revisión de los aspectos que modifican las variables independientes, se logran establecer cinco niveles para temperatura de operación y dos niveles para la apertura de los aspersores, valores que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Niveles seleccionados de los factores a estudiar en la caracterización del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química

Factores	Niveles	Valores
Temperatura (°F)	T ₁	218
	T ₂	230
	T ₃	242
	T ₄	250
	T ₅	258
Apertura de aspersores (adim)	A ₁	Si
	A ₂	No



Conducción del Experimento:

Identificación de los valores y rangos de las variables para definir las condiciones de operación.

A partir de la toma de datos de placas de los accesorios y de los instrumentos de medición instalados en el equipo se obtuvieron los límites de medición y operación de estos. Así, partiendo de estos valores límites se determinaron los rangos de operación del autoclave, bajo la condición de realizar las mediciones durante la operación del equipo de forma segura tanto para el equipo como para los operadores. Los rangos obtenidos en esta etapa se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Especificaciones de rangos de los instrumentos del equipo.

Variable a manipular	Instrumento	Rango
Temperatura de operación	Registrador TRC11 y PR11	100 – 260 °F
Aspersores	Válvulas HV-33 y HV-34	Abierto – Cerrado
Presión de Operación	Manómetro Bourdon	0 – 160 psig
Válvula de seguridad	Presión de disparo	32 psig

La realización de los experimentos se lleva a cabo mediante el apoyo el programa estadístico MINITAB que permite diseñar experimentos. En cuanto a las especificaciones del experimento se definen 3 replicas por tratamiento, con la finalidad de disminuir los errores experimentales y tener una representación estadística de los datos.

Tabla 3.5. Diseño de Experimento arrojado por el programa estadístico Minitab

Orden Aleatorio	Orden de Corrida	Temperatura	Aspersores
2	1	218	NO
4	2	230	NO
29	3	258	SI
26	4	242	NO
17	5	250	SI
1	6	218	SI
22	7	218	NO
14	8	230	NO



Tabla 3.5. Diseño de Experimento arrojado por el programa estadístico Minitab (Continuación)

Orden Aleatorio	Orden de Corrida	Temperatura	Aspersores
18	9	250	NO
10	10	258	NO
8	11	250	NO
21	12	218	SI
25	13	242	SI
15	14	242	SI
30	15	258	NO
13	16	230	SI
28	17	250	NO
12	18	218	NO
11	19	218	SI
24	20	230	NO
20	21	258	NO
7	22	250	SI
3	23	230	SI
5	24	242	SI
16	25	242	NO
9	26	258	SI
23	27	230	SI
19	28	258	SI
27	29	250	SI
6	30	242	NO

Cabe destacar, que para iniciar cada corrida es necesarios mantener las mismas condiciones iniciales, como son: la temperatura interior del equipo en un valor de 30 °C (86 °F) aproximadamente, la presión de entrada de vapor en un valor de 54 psig y que la presión de entrada de aire a 36 psig.

Diseño de los instrumentos de recolección de datos

Luego de tener las variables importantes identificadas y los rangos a operar se construyen los instrumentos de recolección de datos necesarios para el experimento. Estos instrumentos se presentaran en las tablas a continuación, y los datos recolectados se muestran en el Apéndice C.



Tabla 3.6 Instrumento de recolección en la determinación de las energías calóricas implicadas en la etapa de operación con aspersores abiertos

Tratamiento	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$)°F	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) °F	Presión de operación ($P_{OP} \pm 1$) Psig	Masa de condensado ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) °C	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
		<i>Modelo</i>				

Presión ambiente: ($P_{amb} \pm 0,05$) mmHg Tiempo de venteo: ($t_v \pm 0,01$) s

Temperatura ambiente: ($T_{amb} \pm 0,5$) °C Tiempo de estabilización: ($t_e \pm 0,01$) s

Masa del beacker 1: ($m_{b1} \pm 0,0001$) kg

Masa del beacker 2: ($m_{b2} \pm 0,0001$) kg

Temperatura de pared de la trampa de vapor: ($T_{tr} \pm 0,1$) °F

Tabla 3.7 Instrumento de recolección en la determinación de las energías calóricas implicadas en la etapa de operación con aspersores cerrados

Tratamiento	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$)°F	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) °F	Presión de operación ($P_{OP} \pm 1$) Psig	Masa de condensado ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) °C	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
		<i>Modelo</i>				

Presión ambiente: ($P_{amb} \pm 0,05$) mmHg Tiempo de venteo: ($t_v \pm 0,01$) s

Temperatura ambiente: ($T_{amb} \pm 0,5$) °C Tiempo de estabilización: ($t_e \pm 0,01$) s

Masa del beacker 1: ($m_{b1} \pm 0,0001$) kg

Masa del beacker 2: ($m_{b2} \pm 0,0001$) kg

Temperatura de pared de la trampa de vapor: ($T_{tr} \pm 0,1$) °F



Tabla 3.8 Instrumentos de recolección de las variables que intervienen en la etapa de enfriamiento (operando con aspersores abiertos y aspersores cerrados)

Tratamiento*	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
			<i>Modelo</i>		

Presión ambiente: ($P_{amb} \pm 0,05$) mmHg

Temperatura ambiente: ($T_{amb} \pm 0,5$) °C

Presión de agua subenfriada: ($P_{agua} \pm 1$) psig

* Indica aspersores cerrados.

Análisis de resultados

Caracterización del equipo autoclave

Determinación de las curvas que representen el comportamiento de las variables involucradas en el proceso:

Una vez realizadas las corridas, se procede a obtener las curvas que representen el comportamiento de las variables tales como: temperatura interna, tiempo de venteo, tiempo de estabilización, flujo de condensado, temperatura de la gota de condensado, tiempo de enfriamiento, temperatura interna en el enfriamiento y nivel de entrada de agua.

3.1.3 Obtener los modelos matemáticos necesarios para simular el comportamiento real del autoclave del laboratorio de ingeniería química con el propósito de predecir los valores reales con los cuales opera el equipo.



Identificación de las variables que afectan el proceso.

Luego de haber estudiado todas las variables presentes en el proceso y basados en proyectos realizados anteriormente en el equipo, se comprueba que la presión de operación, temperatura de operación, apertura de las válvulas de los aspersores, la presión y temperatura ambiente son las variables que perturban el proceso.

Planteamiento de los modelos matemáticos obtenidos de la bibliografía asociados a los fenómenos de transferencia de calor presente.

En esta etapa se plantea las ecuaciones necesarias para el cálculo de los objetivos, relacionados con la transferencia de calor, balances de materia y energía. Tomando en cuenta que una vez estabilizado el sistema en la etapa de cocción es que nos interesan tales modelos.

✓ Calor aprovechable en el interior del autoclave.

Para una temperatura de operación se debe calcular el calor aprovechable generado por el vapor que entra al autoclave.

$$Q_A = \dot{m}_T (hg_{Pop} - hf_{Tsat}) \quad (3.2)$$

Donde:

m_T : Flujo másico total, lb/s.

Hg_{Pop} : Entalpía del vapor de agua saturado suministrado al proceso; evaluada a la temperatura de operación, BTU/ lb.

hf_{Tsat} : Entalpía del líquido saturado; evaluada a la temperatura de saturación, BTU/lb.

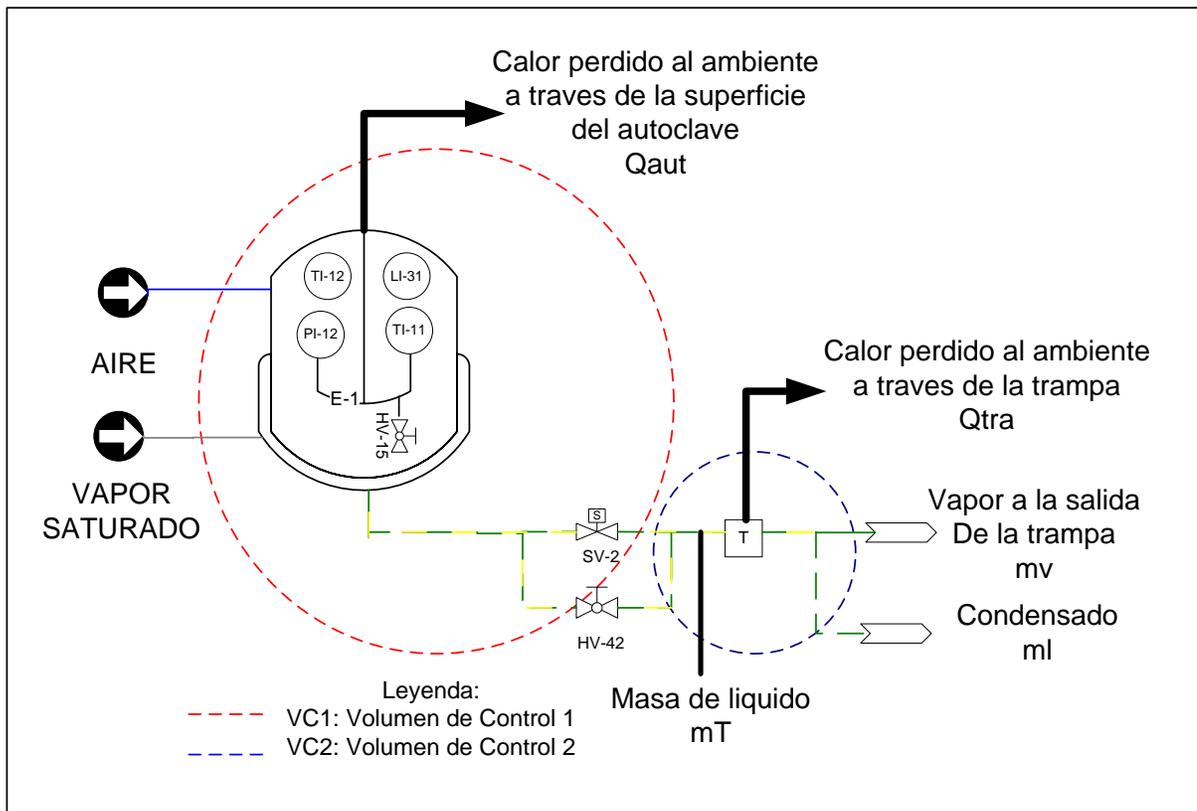


Figura 3.1 Volúmenes de Control a aplicar en los balances de masa y energía.

✓ **Calor perdido al ambiente.**

Para cada temperatura se calcula el calor que se pierde al ambiente, se usa como guía la Figura 3.1. Aplicando la ecuación 2.1, se considera que en el equipo no hay acumulación ni generación de energía, queda:

$$E_{entra} - E_{sale} = 0 \quad (3.3)$$

Para el volumen de control 1 se toman las siguientes consideraciones:

1. La energía que entra al autoclave es la proporcionada por el vapor de agua saturado.
2. La energía que sale, se debe a la energía que se transfiere al ambiente por la superficie del equipo.

Así, tomando las consideraciones anteriores y aplicando la ecuación 3.3 queda:

$$\dot{m}v_e \cdot hg|_{Pop} - \dot{m}l_T \cdot hf|_{Pop} - Q_{aut} = 0 \quad (3.4)$$



Donde:

$\dot{m}v_e$ = Flujo másico de vapor que ingresa al autoclave, lb/s

$\dot{m}l_T$ = Flujo másico de líquido total que condensa en el interior del autoclave, lb/s.

$hg|_{Pop}$ = Entalpía del vapor de agua saturado suministrado al proceso; evaluada a la presión de operación, BTU/lb.

$hf|_{Pop}$ = Entalpía de líquido saturado evaluada a la presión de operación, BTU/lb.

Q_{aut} = Calor que se transfiere al ambiente por la superficie del autoclave, BTU/s.

Aplicando un balance de masa al volumen de control 1 (ver Figura 3.1), queda:

$$\dot{m}v_e - \dot{m}l_T = 0 \rightarrow \dot{m}v_e = \dot{m}l_T = \dot{m}_T \quad (3.5)$$

Sustituyendo el resultado de la ecuación 3.5 a la ecuación 3.4, y debido a que las entalpías están evaluadas a la misma referencia, se puede decir que:

$$Q_{aut} = \dot{m}_T \cdot hfg|_{Pop} \quad (3.6)$$

Donde:

$hfg|_{Pop}$ = Entalpía de vaporización evaluada a la presión de operación, BTU/lb.

Para hallar la masa total se aplicarían los mismos balances de masa y energía a la trampa de vapor, volumen de control 2 (ver Figura 3.1), quedando lo siguiente:

Balance de masa:

$$\dot{m}_T = \dot{m}_v + \dot{m}_l \quad (3.7)$$

Balance de energía:

$$\dot{m}_T \cdot hf|_{Pop} = \dot{m}_v \cdot hg|_{Pamb} + \dot{m}_l \cdot hf|_{Tgota} + Q_{trampa} \quad (3.8)$$

De la ecuación 3.8 son incógnitas el flujo másico total, el flujo másico de vapor y el calor de la trampa, este último se calcula como una transferencia de calor al ambiente combinado (ecuación 2.5), quedando la siguiente ecuación:

$$Q_{trampa} = As \cdot ho \cdot (Tw - Tamb) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot As \cdot (Tw^4 - Tamb^4) \quad (3.9)$$



Para el calor por radiación, se asume que la trampa es un radiador ideal lo cual implica que $\varepsilon = 1$, así se calcula el máximo calor que se pierde al ambiente por la trampa.

A fin de completar los términos de la ecuación 3.9 primero es necesario obtener el área superficial de la trampa (A_s). Debido a que la trampa de vapor no tiene una forma geométrica sencilla, el cálculo de su área superficial debe realizarse por zonas, esta fue dividida en 4 zonas, la identificación y ubicación de las variables utilizadas en cada zona se presentan en el Apéndice C (Tabla C.21 y Figuras C.1)

Zona 1: Se considera el cilindro principal de la trampa junto a la entrada y salida de la trampa y el canal adjunto (ver Figura 3.2). Al área del cilindro se le debe restar el área de estos dos cilindros que se le unen, más un canal en forma rectangular

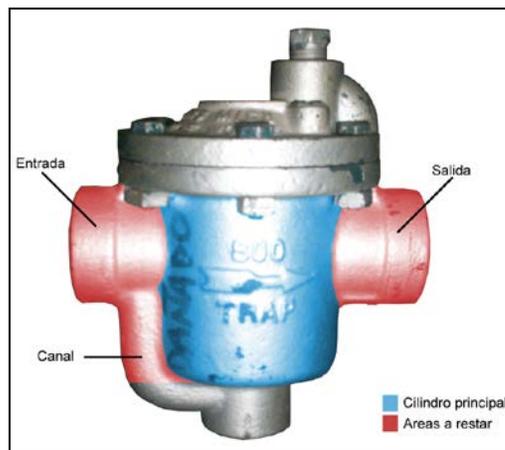


Figura 3.2. Secciones de la trampa de vapor para la zona 1.

$$A_{Z1} = A_{cilindroPr\ incipal} - A_{entrada} - A_{Salida} - A_{Canal} \quad (3.10)$$

$$A_{entrada} = A_{salida} = \pi \cdot r^2 = \pi \left(\frac{D_2}{2} \right)^2 \quad (3.11)$$

$$A_{cilindroPr\ incipal} = 2\pi \cdot r \cdot h = \frac{2\pi \cdot D_1 \cdot h_1}{2} = \pi \cdot D_1 \cdot h_1 \quad (3.12)$$

$$A_{canal} = L \cdot A \quad (3.13)$$



Sustituyendo las ecuaciones 3.11, 3.12 y 3.13 a la ecuación 3.10, se genera:

$$A_{z1} = \pi \cdot \left(D_1 \cdot h - \frac{D_2^2}{2} \right) - L \cdot A \quad (3.14)$$

Zona 2: Conformada por la tapa superior de la trampa, la cual se considera como plana para efectos de cálculos. En esta zona se encuentra dos tapas y un cilindro exterior formado por las dos tapas, una de las tapas (la inferior) se encuentra encima del cilindro de la zona1 (Ver Figura 3.3).

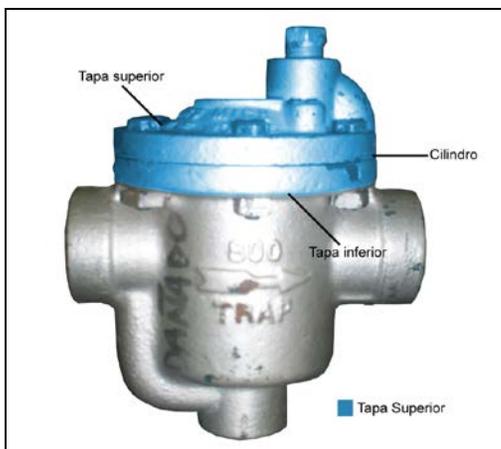


Figura 3.3. Secciones de la trampa de vapor para la zona 2.

$$A_{z2} = A_{cil} + A_{sup} + A_{inf} \quad (3.15)$$

$$A_{cil} = 2\pi \cdot r \cdot h = \frac{2\pi \cdot D_3 \cdot h_3}{2} = \pi \cdot D_3 \cdot h_3 \quad (3.16)$$

$$A_{sup} = \pi \cdot r^2 = \pi \left(\frac{D_3}{2} \right)^2 \quad (3.17)$$

$$A_{inf} = \pi \left(\frac{D_3 - D_1}{2} \right)^2 \quad (3.18)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.18 a la ecuación 3.15, se genera:

$$A_{z2} = \pi \cdot \left(D_3 h_3 + \frac{D_3^2}{4} + \frac{(D_3 - D_1)^2}{4} \right) \quad (3.19)$$



Zona 3: es la sección inferior de la trampa. Esta zona se conforma de una tapa a la que se le resta la unión de un cilindro (que posee la trampa en la parte inferior) y un canal rectangular (Ver Figura 3.4).

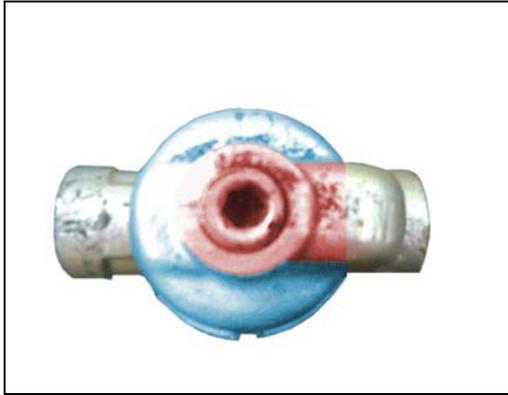


Figura 3.4. Secciones de la trampa de vapor para la zona 3.

$$A_{z3} = A_{tapa} - A_{cil} - A_{canal} \quad (3.20)$$

$$A_{tapa} = \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 \quad (3.21)$$

$$A_{cil} = \pi \left(\frac{D_4}{2} \right)^2 \quad (3.22)$$

$$A_{canal} = L \cdot A \quad (3.23)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.21, 3.22 y 3.23 a la ecuación 3.20, se genera:

$$A_{z3} = \pi \cdot \left(\frac{D_1^2}{4} - \frac{D_4^2}{4} \right) - L \cdot A \quad (3.24)$$

Zona 4: Esta conformada por los elementos que se encuentran adicionados al cilindro principal. Estos elementos son la entrada y salida a la trampa, el cilindro inferior y el canal rectangular (Ver Figura 3.5). Se considera el área superficial de cada elemento.

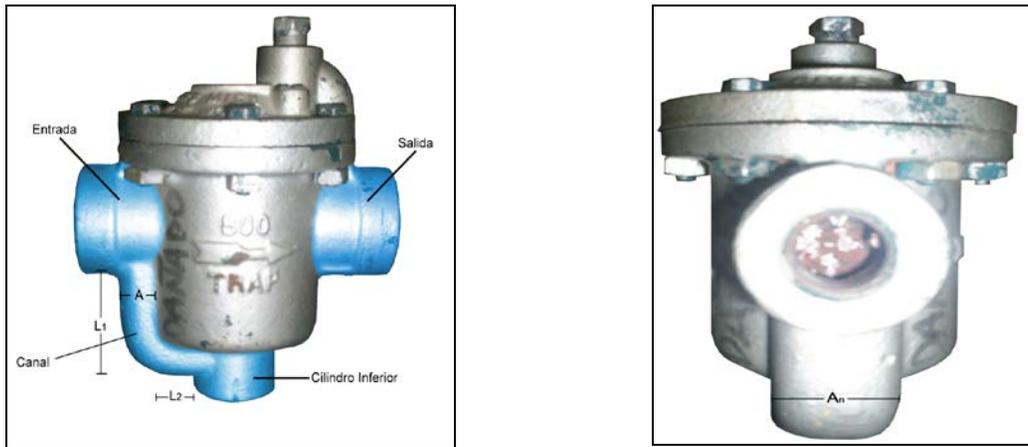


Figura 3.5. Secciones de la trampa de vapor para la zona 4.

$$A_{z4} = A_{entrada} + A_{salida} + A_{inf} + A_{canal} \quad (3.25)$$

$$A_{entrada} = A_{salida} = 2\pi \cdot r \cdot h = \pi \cdot D_2 \cdot h_2 \quad (3.26)$$

$$A_{inf} = 2\pi \cdot r \cdot h = \pi \cdot D_4 \cdot h_4 \quad (3.27)$$

$$A_{canal} = A_{lateral} + A_{tapa} \quad (3.28)$$

$$A_{canal} = (2 \cdot L_1 \cdot A + L_1 \cdot An) + (2 \cdot L_2 \cdot A + L_2 \cdot An)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.26, 3.27 y 3.28 a la ecuación 3.25 y simplificando, se genera:

$$A_{z4} = \pi \cdot (2D_2 h_2 + D_4 h_4) + (2 \cdot A + An) \cdot (L_1 + L_2) \quad (3.29)$$

Finalmente, el área superficial de la trampa de vapor se obtiene sumando las áreas de las cuatro zonas definidas.

El siguiente término a obtener es el coeficiente convectivo h_o , asumiendo convección natural al aire, la correlación correspondiente es:

$$h_o = C \cdot \left(\frac{T_w - T_\infty}{b} \right)^n \quad (3.30) \text{ (Incropera, 1999)}$$

Donde:

C, b y n: Constantes que dependen del número de Rayleigh (Ra), adim

T_w: Temperatura de pared de la superficie.

T_∞: Temperatura ambiental.



El número de Rayleigh (Ra) es un número adimensional producto de los números Grashof y Prandtl, y está relacionado con la ocurrencia de la transición en una capa límite de convección libre la cual depende de la magnitud de las fuerzas de empuje y viscosa del fluido, se calcula así:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.31) \text{ (Incropera, 1999)}$$

Donde:

Gr: Número de Grashof, adim

Pr: Número de Prandtl, adim

El número adimensional de Prandtl, aunque generalmente se encuentra tabulado, se calcula mediante la expresión.

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{K} \quad (3.32) \text{ (Incropera, 1999)}$$

Donde:

Cp: Capacidad calorífica del aire, (BTU/lb·°F)

μ : Viscosidad del aire, (lb/ft·s)

K: Conductividad térmica del aire, (BTU/h·ft·°F)

El número de Grashof, igualmente se encuentra tabulado, puede calcularse de la siguiente manera:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \rho^2}{\mu^2} \cdot D^3 \cdot (T_w - T_\infty) \quad (3.33) \text{ (Incropera, 1999)}$$

Donde:

g: aceleración de gravedad, (ft/s²)

β : Coeficiente de dilatación térmica, (1/°F)

ρ : Densidad del aire, (lb/ft³)

D: Diámetro externo del objeto expuesto al aire, (ft)

Cabe destacar que las propiedades de las ecuaciones 3.32 y 3.33 deben hallarse para la temperatura promedio entre la temperatura de pared del objeto y la temperatura ambiente, por lo que se genera la siguiente ecuación.



$$T_p = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad (3.34)$$

Donde:

T_p : Temperatura promedio, (°F).

La ruta de cálculo a seguir se presenta en la Figura 3.6.

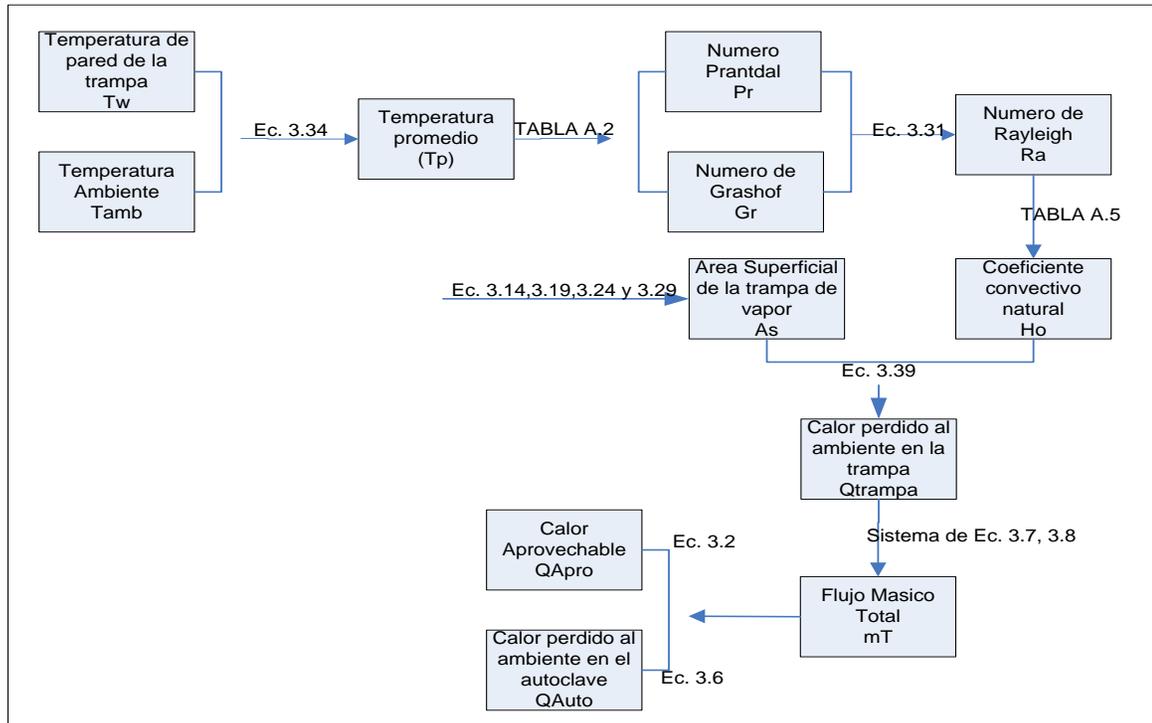


Figura 3.6 Ruta de cálculo a seguir para obtener las interacciones de calor asociadas al autoclave.

Establecimiento de los modelos matemáticos necesarios para la simulación.

Los modelos matemáticos necesarios para la simulación vienen dados por las etapas de operación del equipo. Una vez analizados los datos experimentales obtenidos, las curvas características del equipo y revisadas las referencias bibliográficas referentes a los métodos de ajuste de datos.

3.1.4 Seleccionar el software para la programación del simulador, a fin de obtener el más adecuado para el desarrollo del programa.



Búsqueda de los diferentes software de programación existentes en el mercado actual relacionados con esta área.

En esta fase de la investigación se busca toda la información referente a los lenguajes de programación que puedan ser usados para elaborar el programa objetivo. Apoyándonos de personas con experiencia en el área de programación y la investigación vía Internet, se pueden listar y dar referencias acerca de programas como: QuickBasic, Delphi, Visual Basic, Lenguaje C (C# y C++) y Excel.

Establecimiento de los criterios para la selección.

Para comparar los diferentes lenguajes de programación listados, es necesario definir algunos aspectos que servirán como punto de comparación entre dichos lenguajes. Basados en los objetivos que debe cumplir el programa se fija los siguientes criterios:

- Complejidad del lenguaje: no todos los códigos de programación son iguales, algunos poseen una sintaxis más difícil que otros.
- Velocidad de procesamiento: se puede definir este criterio como la velocidad con que se ejecutan los programas una vez desarrollados por el lenguaje de programación.
- Interfaz para el usuario: se refiere a que tan amigable se presenta la interfaz del programa para el usuario. Esta íntimamente relacionada con la facilidad de manejo del lenguaje de programación.
- Herramientas y funciones: algunos lenguajes presentan una gran cantidad de funciones y herramientas, otros solo los básicos. Este criterio es importante por que facilita la programación en algunos casos.
- Costo: se refiere al costo del paquete de programación.
- Ayuda al usuario: la ayuda que presta el lenguaje de programación al usuario. Algunos solo la prestan vía Internet otros en cambio poseen una especie de biblioteca interna con el conjunto de códigos del programa.
- Conocimientos sobre el programa: este se refiere a que tan conocido es el programa a nivel de programadores y personas que trabajan en este entorno. Es un criterio que no puede dejarse escapar, esto debido a que a la hora de



conseguir ayuda se pueda contar con personas diestros en el lenguaje de programación.

Análisis de cada software.

Como forma de análisis se establecen ventajas y desventajas de cada uno de los lenguajes de programación, basados en referencias personales e información extraída de la red, las cuales están señaladas en el marco teórico de esta investigación.

Construcción de la matriz.

Luego de definir cada lenguaje de programación con sus características específicas y de analizarlo según sus ventajas y desventajas se elabora la matriz de selección apoyándose de estos pasos.

Para elegir el software mas adecuado se toman en cuenta los siguientes criterios:

- Complejidad del lenguaje
- Velocidad de procesamiento
- Interfaz para el usuario
- Herramientas y funciones
- Costo
- Ayuda al usuario
- Conocimientos sobre el programa

Estos criterios son evaluados en una matriz de criterios relevantes integrados de acuerdo a un factor de jerarquía, el cual se asigna para calificar la importancia relativa de cada criterio y su incidencia en la selección del software para la programación del simulador. En la tabla 3.9 se presenta el formato de la matriz de selección aplicada.



Selección del programa.

Esta matriz de selección arroja como resultado el software para la programación del simulador más conveniente y el que mejor se adapta a los requerimientos, todo esto después de hacer una comparación cuantitativa entre cada una de los software analizados.

Tabla 3.9 Matriz de los criterios relevantes integrados para la selección del software para la programación del simulador

Parámetro	F	Software									
		QuickBASIC		DELPHI		EXCEL		LENGUAJE C		VISUAL BASIC	
		P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
TOTALES											

Modelo

F: Factor de jerarquía (0-100).

P: Ponderación (1 - 5), 5 es el valor mas favorable.

R: Producto entre el factor de jerarquía y la ponderación.

3.1.5 Desarrollar el modulo del programa de simulación con el objeto de incorporar los modelos matemáticos y cálculos del lenguaje de programación a utilizar.



Revisión del material bibliográfico existente sobre el lenguaje de programación

Luego de haber seleccionado el lenguaje de programación es necesario reunir la mayor información posible sobre el mismo. Mediante bibliografía especializada que expliquen como manejar el lenguaje y manuales de rápido aprendizaje disponibles en revistas y otros suplementos, se logra coleccionar la información suficiente necesaria.

Comprensión de las funciones y herramientas del lenguaje de programación

Con la información recolectada de libros y la ayuda de personas que han programado en el lenguaje seleccionado u otro lenguaje similar, se comprenden las herramientas y funciones que deben manipularse para la creación del código.

Elaboración de la estructura del programa

Para poder conocer como debe ir estructurado el programa es necesario construir un diagrama de las entradas y salidas mínimas del simulador, estas se representan en la siguiente figura:

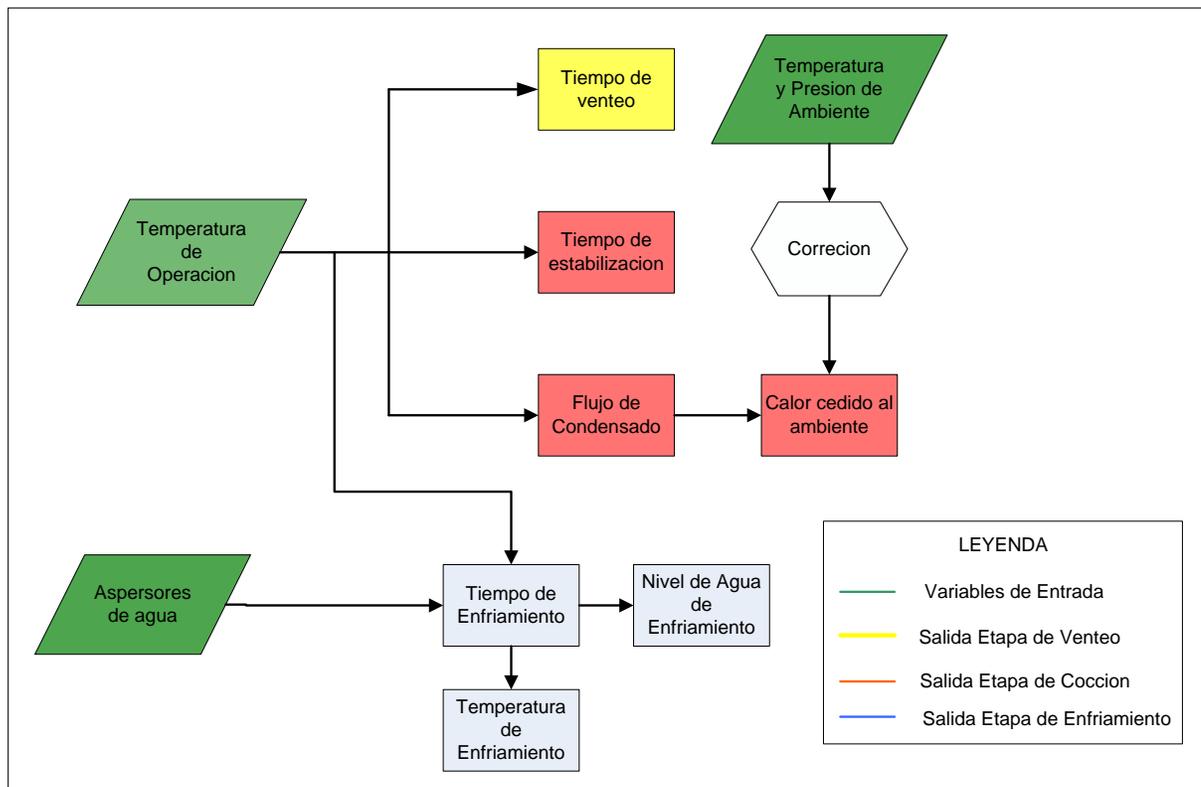


Figura 3.7 Diagrama de entradas y salidas del simulador del comportamiento del autoclave.



Desarrollo de la interfaz grafica del programa de simulación

Mediante la comparación con programas de simulación existentes y la consulta con el tutor, se elabora una interfaz sencilla y fácil de manipular.

Incorporación de los modelos matemáticos al código del lenguaje de programación

Finalmente luego de estar familiarizado con el lenguaje y de haber planteado la estructura, se pasan los modelos matemáticos obtenidos al ambiente de programación, para que de esta forma el programa pueda desarrollar los cálculos.

3.1.6 Validar el software a fin de determinar su confiabilidad

Determinación de las condiciones específicas (temperaturas, carga de masa en el equipo) bajo las cuales se realizará el experimento.

Se definen las condiciones bajo las cuales se realizaran los experimentos, tomando en cuenta que se encuentren en el rango de operación usado en la caracterización del equipo.

Como aporte adicional, se realiza una corrida adicional donde se operara el equipo con una masa de un alimento, a fin de analizar el comportamiento del equipo en estas condiciones. El alimento escogido fue la yuca la cual presenta un tiempo de cocción de 20 min por cada kilo a una presión de 86 kpa.

Tabla 3.10 Condiciones seleccionadas para la validación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química

Orden de Corrida	Temperatura	Aspersores
1	224	SI
2	224	NO
3	236	SI
4	236	NO
5	254	SI
6	254	NO
Con carga	204	SI



Creación de los instrumentos de recolección de datos.

Se sigue la misma metodología e instrumentos de recolección de datos usados en la caracterización del equipo.

Toma de datos.

La experimentación se llevara a cabo siguiendo el método de operación descrito en el Capítulo II, sección 2.2.

Simulación de las condiciones planteadas

Se simularan las mismas condiciones establecidas en el apartado 1 de este objetivo.

Comparación de los resultados por modelos matemáticos y los dados por el programa con los experimentos.

Se analizan los datos experimentalmente usando los modelos matemáticos planteados en el objetivo 3 de este trabajo de investigación, posteriormente se procede a comparar ambos valores (simulados y los experimentales).

Determinación del porcentaje de desviación de los resultados experimentales y los obtenidos por el software

Los datos que se presentan en la pantalla al usuario se someterán a la ecuación siguiente, a fin de determinar su desviación de acuerdo a la realidad.

$$\%Desviación = \frac{\text{Valor real} - \text{Valor Simulado}}{\text{Valor real}} \cdot 100 \quad (3.34)$$



CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presenta la discusión y análisis de cada uno de los resultados obtenidos, los cuales corresponden a los objetivos formulados en ésta investigación.

4.1 DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DEL AUTOCLAVE.

El autoclave instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química consta de un sistema de tuberías de agua subenfriada, aire y vapor saturado de agua; un sistema de control automático y un conjunto de válvulas y accesorios (ver Figura 1.1). Al realizar la revisión de información bibliográfica, así como las entrevistas con el personal y las revisiones generales realizadas en el equipo, se logra la comprensión del proceso de operación, las etapas de operación se describen en el Capítulo II de esta investigación.

El equipo en general presentó ciertas deficiencias necesarias de atacar como ausencia de fluido indicador de temperatura, obstrucción de tuberías y otras; las cuales iniciaron una evaluación del estado del equipo mediante observación directa, su estado físico y de sus partes, empleándose para esto un formato de evaluación que permite llevar un registro de las observaciones halladas (Tabla 4.1); completada con la puesta en marcha del equipo operando a la temperatura máxima que permitió el registrador-controlador, siendo esta de 258 °F.

Se realizó la revisión del panel de control secuencial, y se observó que el interruptor 1 encargado de abrir la válvula solenoide SV-1 que permite el ingreso de aire al sistema de control, se encontraba dañado debido a la ruptura de los cables de conexión eléctrica de este, una vez arreglado el cableado del interruptor se puso en funcionamiento el equipo.

En cuanto a la revisión de los instrumentos de medición instalados en el equipo, el manómetro indicador de la presión interna del equipo PI-12 se desinstaló a fin de determinar si presentaba desviación en los valores que indicaba, lo cual generó una



calibración del instrumento, de modo que fue necesario emplear una medida patrón proporcionada por el Laboratorio de Ingeniería de Química (Maleta de Calibración PenWalt de presión máxima de 35 psig), construyéndose una curva de calibración que se muestra en la Figura 4.1. En cuanto al termómetro TI-11, este no presentaba fluido indicador, por lo cual se diseñó una termocupla tipo K con las características parecidas al indicador instalado originalmente, además se adicionó un cable de 1 m de longitud para conectar un indicador de temperatura digital.

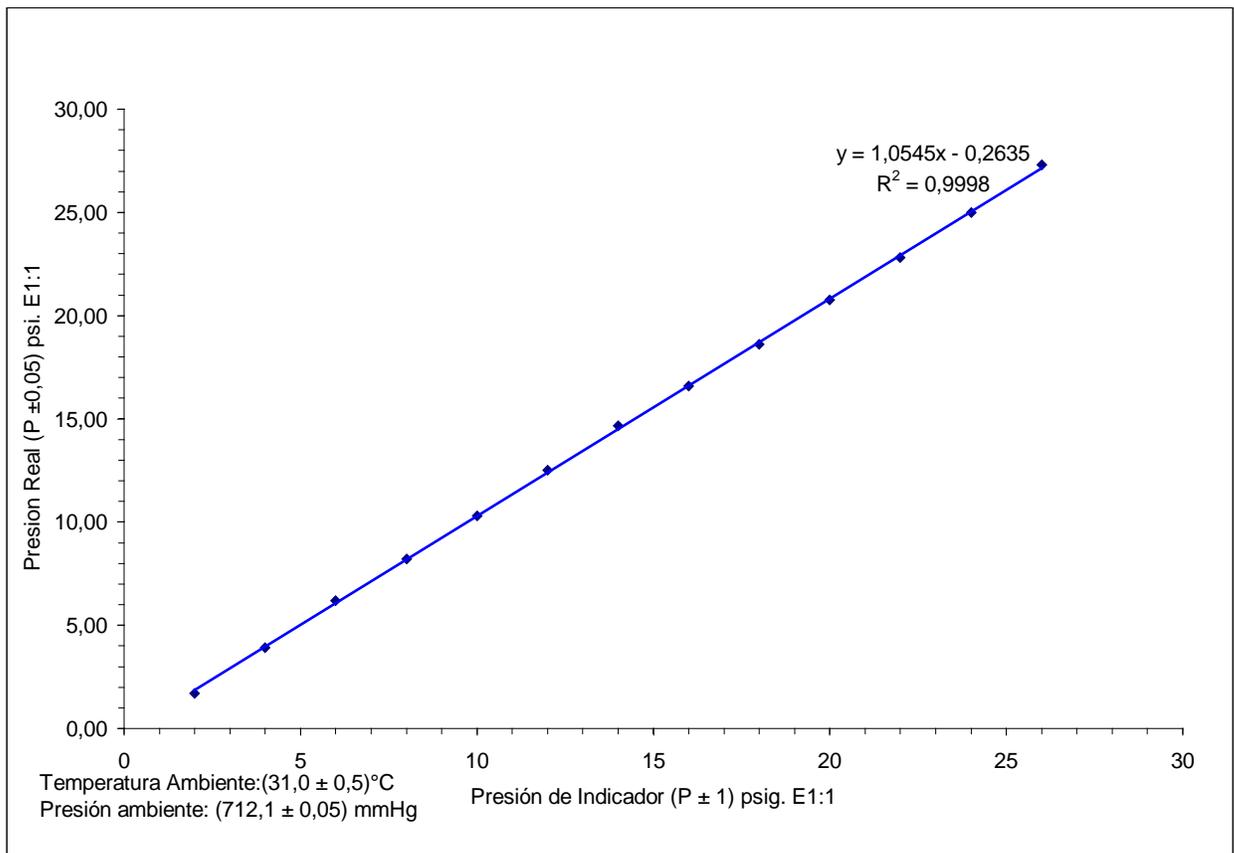


Figura 4.1 Curva de Calibración del manómetro bourdon PI-12.

En cuanto al estado de cada una de las tuberías del equipo, se halló que la tubería de desalojo de condensado no existía flujo de fluido, por lo cual se revisó el funcionamiento de la válvula solenoide instalada en esta tubería, obteniéndose una respuesta positiva de está válvula. Sin embargo, se procedió a la desinstalación de esta tubería a fin de verificar su estado interno, hallándose obstruida por óxido.



Tabla 4.1 Evaluación del estado actual del Autoclave instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química.

COMPONENTE	ESTADO	OBSERVACIONES
Identificación de válvulas	El equipo no presenta identificación de válvulas según normas ISA	Se elaboraron los identificadores de válvulas.
Interruptores del sistema secuencial de control.	Se observó que el interruptor 1 no funciona.	Se arreglaron los cables de conexión de este interruptor.
Tubería de desalojo de condensado	Al realizar una corrida pre-experimental, se observó que no había flujo de ningún fluido por esta tubería.	Se desacoplo del equipo y se revisó si presentaba obstrucción. Se limpio con un cepillo delgado.
Válvula solenoide (SV-6)	Por estar instalada en la tubería de desalojo de condensado, se presumió obstrucción en su interior.	Se desarmó la válvula, y se limpió su interior.
Manómetro Bourdon (PI-12)	Descalibrado.	Se calibró el manómetro a través de una medida patrón (Maleta de Calibración PenWalt de presión máxima de 35 psig).
Termómetro de mercurio (TI-12)	No se observó ningún fluido medidor en el interior del termómetro.	Se diseño una termocupla tipo K , cuyo valor de temperatura se indique en un indicador tipo K.
Válvula de seguridad	La válvula se observa en buenas condiciones. Presenta una placa de sus datos nominales, siendo el más importante su presión máxima permitida: 32 psi.	No se le hizo cambio alguno a esta válvula.
Goma de tapa	En la operación de prueba, presentó fuga en un lateral.	Se colocó una goma pequeña en el sitio donde se presentó la fuga.
Compresor Reciprocante	Un contactor del panel de control del compresor se quedaba adherido, y no hacia el contacto necesario para la operación continua del equipo.	Se esparció limpia contacto, solventado la situación momentáneamente. Este punto queda abierto.



Asimismo, se revisó la válvula solenoide SV-6 y también se hallaba obstruida. Como solución se limpió la tubería con un cepillo y agua; en cuanto a la válvula, se desarmó y se limpió su interior.

Antes de iniciar la puesta en marcha del equipo, se identificaron las válvulas e instrumentos del equipo con etiquetas según las normas ISA (Instruments Society of America), la cual consiste en letras y número, siguiendo las normas la primera letra identifica la variable que se controla, la segunda describe la función cumplida por el elemento en el proceso. A continuación se colocaron dos números, el primero identifica el lazo de control en el cual está localizado el instrumento, y el segundo indica el correlativo de instrumentos en el lazo. En este caso se elaboró una tabla para la identificación de los lazos de control (Tabla 4.2).

Tabla 4.2

Identificación de lazos de control en el diagrama de tuberías e instrumentación

Fluido	Numero asignado al lazo
Vapor	1
Aire	2
Agua	3
Condensado	4

Finalmente, el anillo de neopreno que evita la fuga de vapor o aire por el borde de la tapa del autoclave, presentaba fuga en un borde lateral, para lo cual se colocó un trozo de neopreno de espesor pequeño para solventar la situación de fuga. Sin embargo, queda la recomendación de cambiarlo por un anillo nuevo.

Un aspecto importante mencionado en la Tabla 4.1, se refiere al contactor del panel de control del compresor recíprocante, ya que al quedarse adherido no permite el funcionamiento adecuado del autoclave en la etapa de enfriamiento, trayendo como consecuencia que esta etapa tarde mucho en completarse, lo cual suministra un error instrumental a las mediciones de esta etapa. En el mismo orden de ideas, se



recomienda la revisión del panel de encendido del compresor y el posterior cambio de los contactores.

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AUTOCLAVE Y MODELOS MATEMÁTICOS ASOCIADOS.

Para caracterizar el equipo, se tomaron en cuenta tres variables influyentes, manipulables y controlables en el proceso de operación del autoclave; dichas variables son presión de operación [psia], temperatura de operación [°F] y apertura de las válvulas de los aspersores [abierta o cerrado]. Cada variable con niveles distintos de operación, 5 para la temperatura y 2 para los aspersores lo cual generó 10 experimentos, de los cuales se realizaron 3 replicas de manera aleatorias, (Ver Tabla 3.5). Realizada la fase experimental de esta investigación se procede a analizar los datos obtenidos y obtener los modelos matemáticos que se ajusten a los datos.

Tal como se explicó en el marco teórico, el equipo opera en tres etapas, etapa de venteo, etapa de cocción y etapa de enfriamiento, para cada una existen variables que presentan un comportamiento específico, el cual será representado mediante gráficas. Cabe destacar que para las dos primeras etapas la apertura de los aspersores no modifica ninguna condición, por lo que se tomó el promedio de los valores registrados de las variables indistintamente la posición de esta variable.

Para la etapa de venteo, se estableció como variable característica el tiempo de venteo, que se define como el tiempo que se consume para desalojar el aire contenido en el equipo. Esta variable a diferentes temperaturas de operación se mantuvo en un valor promedio de 92,5s, en un rango de $(82 \pm 0,01)$ a $(107 \pm 0,01)$ s; los valores recolectados en la experimentación están tabulados para cada temperatura de operación en el Apéndice C (Tablas C.1 a Tabla C.10).

Una vez verificado el desalojo del aire del interior del autoclave, inicia la etapa de cocción, si se quiere la etapa más importante de operación del equipo, ya que es la que define por completo el uso del autoclave. La primera variable característica de



esta etapa es el tiempo de estabilización, que define el tiempo necesario para que el equipo estabilice la temperatura en su interior, desde que se cierra la válvula automática de desalojo de aire. El comportamiento de esta variable es ascendente a medida que la temperatura de operación a alcanzar sea mayor, tal como se observa en las tablas C.1 a C.10 (Apéndice C). Como la posición de la variable aspersores no afecta esta etapa, se promedian los tiempos de estabilización de las corridas de cada temperatura de operación cuyos valores se tabulan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3
Promedios de Tiempo de estabilización de la temperatura interna
del Autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química

Temperatura de Operación ($Top \pm 1$) °F	Tiempo promedio de estabilización ($te \pm 0,01$) s
218	312,08
230	313,00
242	339,48
250	359,17
258	383,50

Para esta variable el modelo matemático obtenido es un sector de un polinomio de grado 2, valido en el rango de (218-258)°F, cuya ecuación se presenta a continuación.

$$test = 0,0476 \cdot Top^2 - 20,792 \cdot Top + 2582 \quad (4.1) \quad (\text{Propia, 2007})$$

Donde:

test: Tiempo de estabilización, (s)

Top: Temperatura de operación, (°F)

Una vez estabilizado el sistema, es decir, que la temperatura interna se mantiene constante, ocurre un proceso de condensación de vapor saturado producto del intercambio de calor con el exterior del equipo (pérdidas de calor al ambiente),



tomando en cuenta que no hay objetos a tratar en el interior del autoclave que puedan absorber el calor cedido por el vapor saturado que ingresa. De este análisis se obtienen dos variables asociadas, una la masa de condensado y la temperatura de salida de este condensado, cuyos valores se presentan en Apéndice C (Tablas C.1 a C.10).

Continuando con la etapa de cocción, en las ecuaciones generadas en los balances de masa y energía, la variable involucrada es el flujo másico de condensado sin embargo, en la parte experimental de la investigación se recolecta masa de condensado a la salida de la trampa de vapor, por lo que es necesario hallar el valor del flujo másico. Para conocer el valor del flujo de condensado puede hacerse uso de la determinación experimental, cuantificando el tiempo de recolección de cierta cantidad de masa del fluido, aplicando luego la ecuación.

$$\dot{m}_{cond} = \frac{m_{b_{LL}} - m_{b_v}}{t} \cdot FC1 \quad (4.2)$$

Donde:

\dot{m}_{cond} : Flujo másico de condensado, lb/s

$m_{b_{LL}}$: Masa del beaker lleno de fluido, kg

m_{b_v} : Masa del beaker vacío, kg

t: Tiempo de recolección del fluido, s

FC1: Factor de corrección de kg/s a lb/s.

Una vez obtenido el flujo másico para cada medición se procede a calcular el flujo másico promedio para cada temperatura de operación a través de la ecuación 4.3, los resultados obtenidos en la aplicación de esta ecuación se registran en la Tabla 4.4.

$$\dot{m}_p = \sum_{j=1}^n \frac{\dot{m}_j}{n} \quad (4.3)$$

Donde:

\dot{m}_p = Flujo másico promedio de i (kg/s).

n = Número de medidas.



Para la temperatura de salida de condensado, también se llevó a cabo una transformación a fin de tener consistencia de unidades, ya que los valores obtenidos experimental estaban en una unidad del sistema internacional (°C) y las tablas asociadas en unidades del sistema ingles (°F), para lo cual se aplica la ecuación 4.3, y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.4.

$$T_{cond}(^{\circ}F) = T_{cond}(^{\circ}C) * 1,8 + 32 \quad (4.4) \quad (\text{Himmelblau, 1997})$$

Donde:

Tcond (°F): Temperatura de salida de condensado, (°F)

Tcond (°C): Temperatura de salida de condensado, (°C) tomada experimentalmente.

El comportamiento del flujo de condensado y la temperatura de salida del condensado se presentan a continuación en las Figuras 4.2 y 4.3 respectivamente. Asimismo, a cada variable se le hallo el mejor ajuste arrojando los siguientes modelos matemáticos con coeficientes de correlación de 0,9946 y 0,9942, respectivamente.

Para el flujo de condensado se obtuvo:

$$m_{cond} = 0,00004 \cdot Top - 0,0038 \quad (4.5) \quad (\text{Propia, 2007})$$

Para la temperatura de salida de condensado se obtuvo:

$$T_{cond}(^{\circ}F) = 0,5847 * Top + 49,717 \quad (4.6) \quad (\text{Propia, 2007})$$

Tabla 4.4

Flujo de condensado y temperatura de salida de condensado en la Etapa de cocción del Autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química

Temperatura de operación (Top ± 1) °F	Flujo másico de Condensado Promedio (mcond ± 0,000008) lb/s	Temperatura de salida de condensado Tcond ± 1) °F
218	0,004398	177
230	0,004870	185
242	0,005213	192
250	0,005599	195
258	0,005916	201

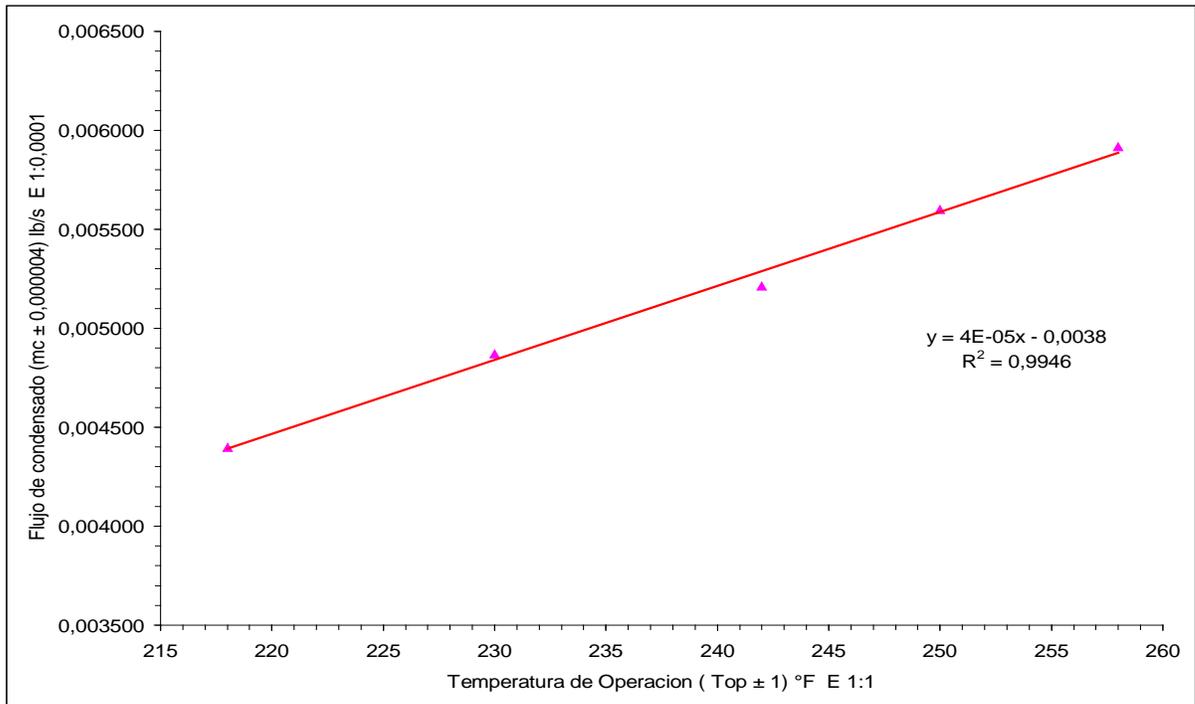


Figura 4.2: Comportamiento del flujo de condensado del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.

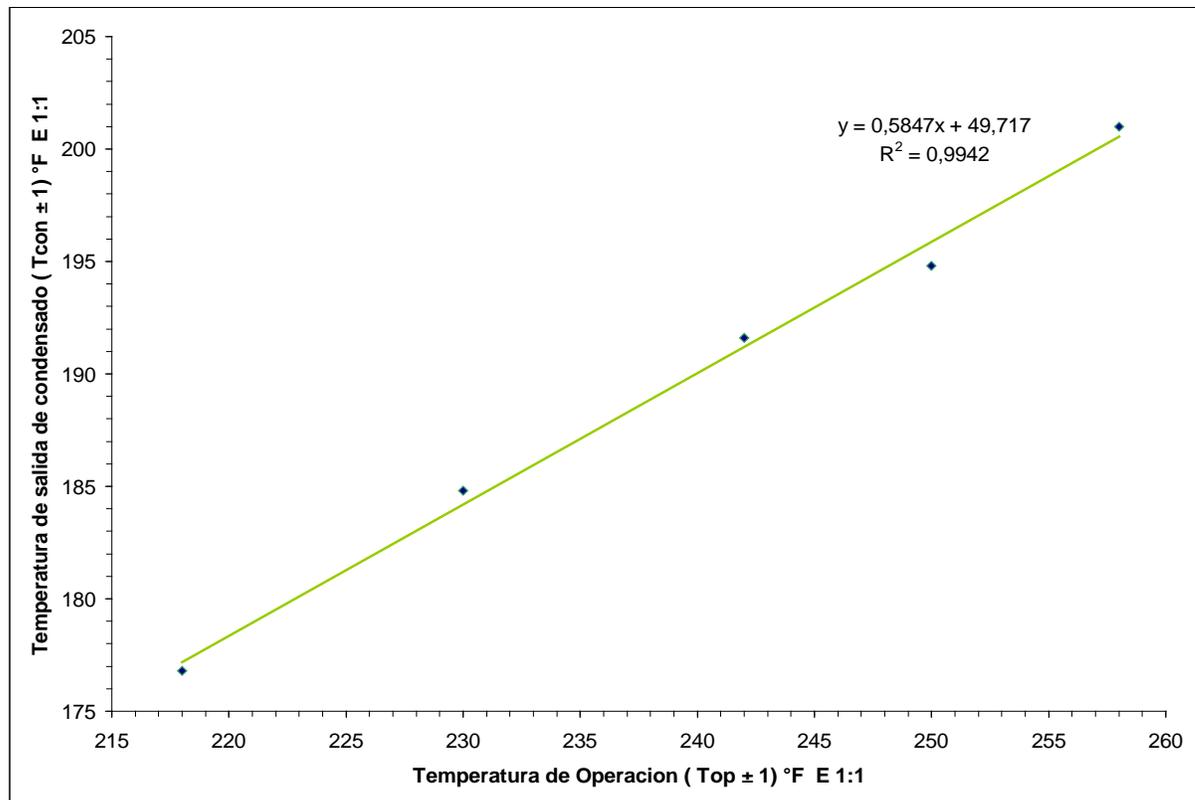


Figura 4.3: Comportamiento de la temperatura de salida de condensado del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.



Las propiedades de los fluidos involucrados en los balances de energía (ecuaciones 3.2, 3.6, 3.8) se evalúan a la presión de operación, la cual queda definida como la presión de saturación a la temperatura interna del equipo. Se considera realizar un ajuste a la temperatura de operación, ya que la temperatura medida en la experimentación como temperatura interna resultó distinta a la temperatura de operación (ver Tablas C.1 a C.10), lo cual difiere con la teoría del fenómeno que ocurre en el interior del equipo ya que, se esperaba que ambas temperaturas fuesen iguales. Cabe destacar que la temperatura de operación es la temperatura que se ajusta en el registrador controlador, y la temperatura interna es la que se lee en el indicador de temperatura, cuyo valor proviene de la termocupla instalada en el equipo.

Para la presión tomada de manera experimental, ocurrió lo mismo que con la temperatura interna, ésta resultó distinta a la presión de saturación a la temperatura interna del equipo. Por lo que se decidió no tomar en cuenta el valor tomado experimentalmente, ya que se comete menor error usando como referencia la temperatura (temperatura interna) para buscar datos termodinámicos.

Asimismo, se caracterizó la temperatura interna en función de la temperatura de operación (ver Figura 4.4), en la cual se puede observar que el modelo matemático generado entre estas dos variables es una línea recta, con un coeficiente de correlación de 0,999, lo que indica un ajuste de los datos a la curva obtenida.

En párrafos anteriores se explicaba el comportamiento de las variables controladas debido que además de las variables obtenidas experimentalmente existen otras más asociadas a la etapa de cocción, las cuales vienen dadas por la necesidad de evaluar el comportamiento total del autoclave. Estas variables tienen que ver con la transferencia de calor que cede el vapor, producto de la diferencia de temperatura del equipo respecto a su entorno, una de ellas se denominó calor aprovechable, que se consideró como la máxima interacción de calor que el equipo ofrece a las condiciones que se opera, el cual se obtiene aplicando la ecuación 3.2.



También está involucrada en las ecuaciones de transferencia de calor, las pérdidas de calor al ambiente, cuyas ecuaciones y método de resolución se presenta en el Capítulo III (ver Figura 3.9), en esas ecuaciones está involucrada la temperatura de pared de la trampa, cuyo comportamiento se observa en la Figura 4.5, con su respectivo modelo matemático asociado. Se espera que el calor aprovechable fuera mayor que el calor perdido al ambiente por autoclave, siendo esta una manera de definir que cantidad de calor queda en el equipo que se puede usar para el tratamiento que se requiera del equipo, (Ver Figura 4.6).

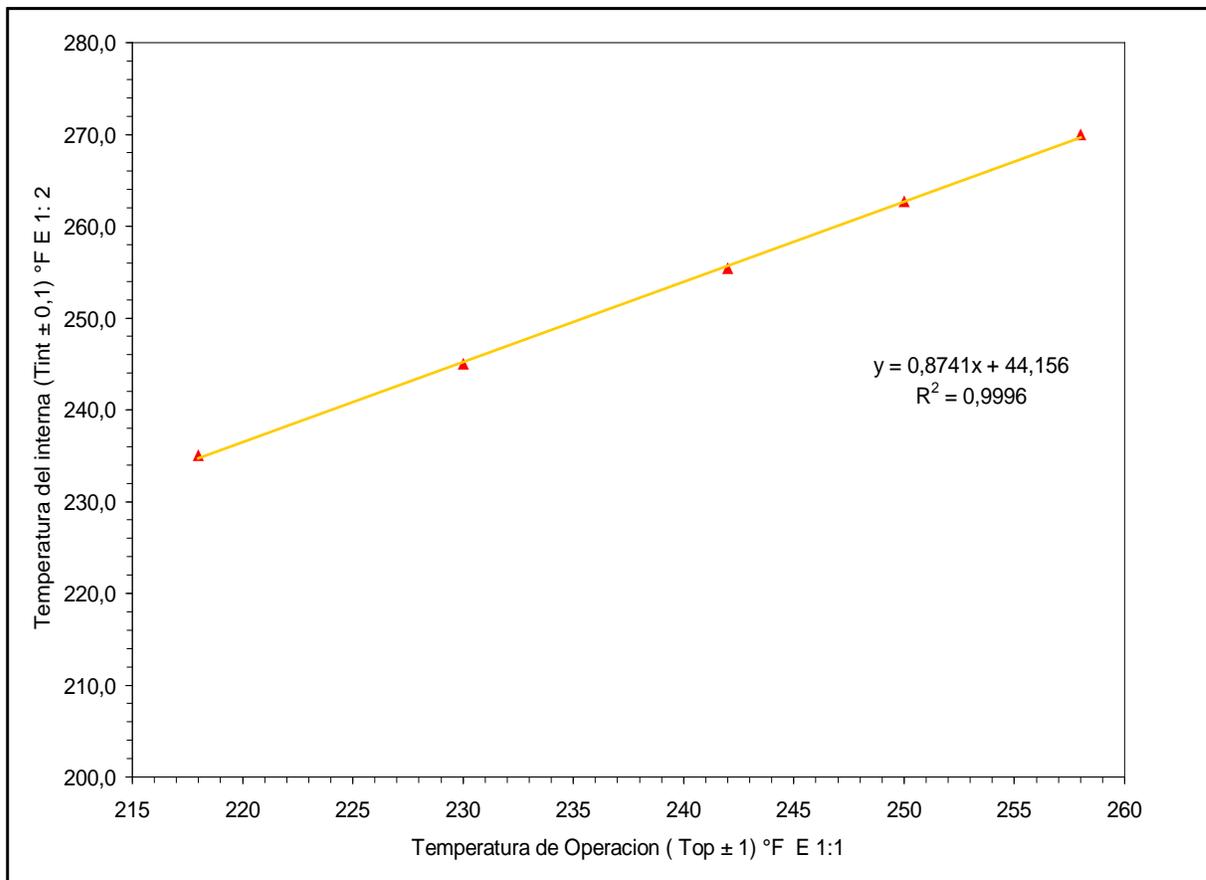


Figura 4.4: Comportamiento de la temperatura interna respecto a la temperatura de operación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.

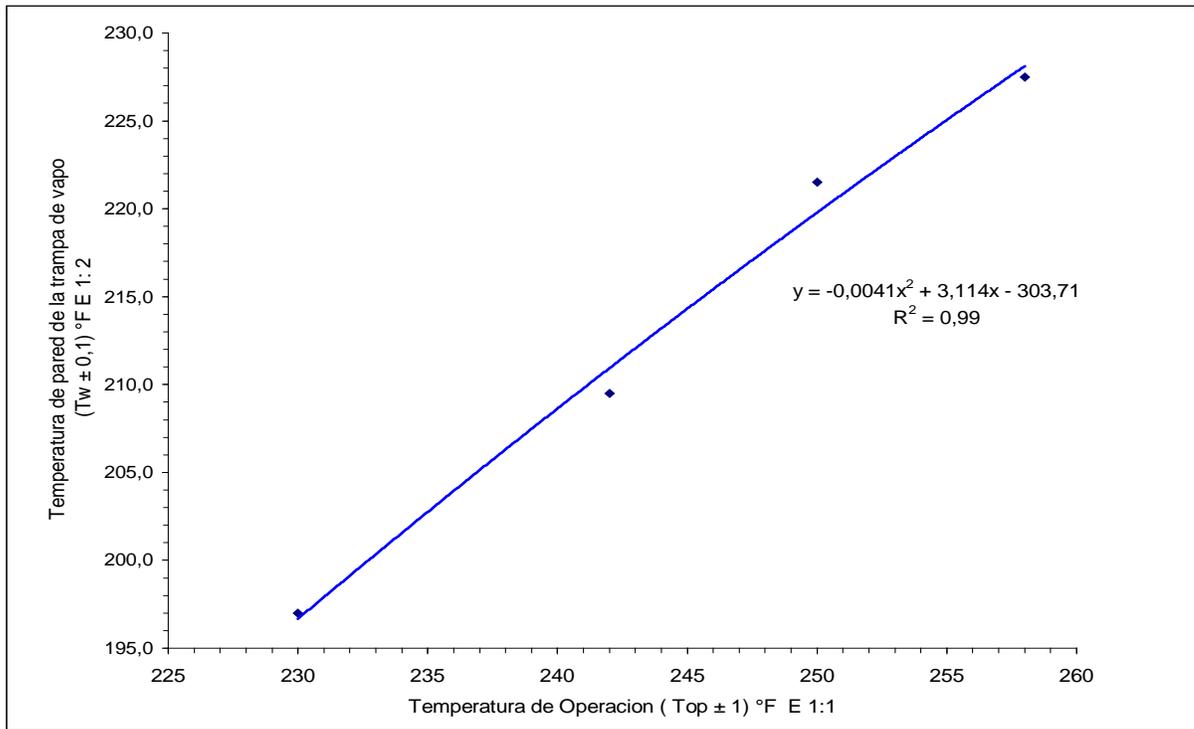


Figura 4.5: Comportamiento de la temperatura de pared de la trampa de vapor respecto a la temperatura de operación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.

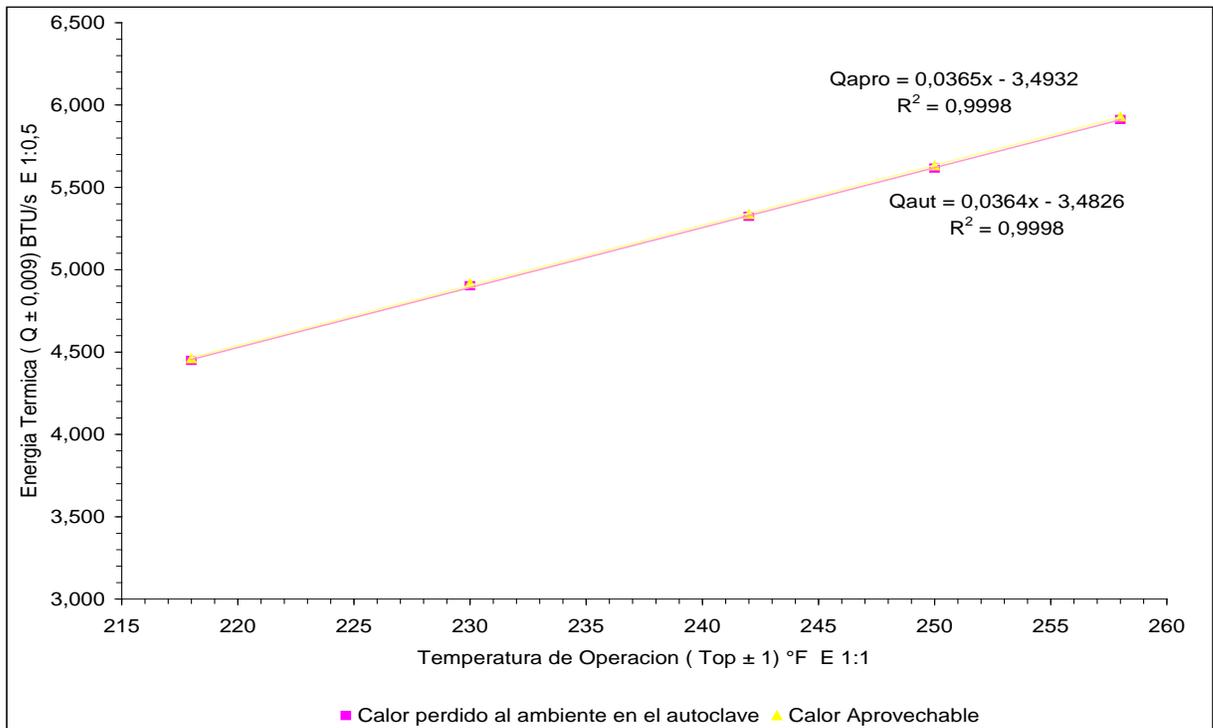


Figura 4.6: Comportamiento del calor perdido al ambiente y del calor aprovechable respecto a la temperatura de operación del autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química.



En cuanto a la etapa de enfriamiento hay tres variables involucradas, tiempo de enfriamiento, temperatura de enfriamiento y nivel de agua, de las cuales las últimas dos son dependientes del tiempo. De los resultados obtenidos que se presentan en la Tabla 4.5, se puede concluir que a medida que aumente la temperatura de operación aumentará el tiempo para que el equipo y lo que esta en su interior se enfríe.

Del análisis de varianza aplicado a los valores de tiempos de enfriamiento obtenidos (ver Tabla 4.6) se puede determinar que, individualmente, tanto la temperatura de operación (T_{op}) como la apertura de los aspersores influyen de manera significativa en la etapa de enfriamiento del equipo, ya que el factor de Fisher que se calcula, 9724,57 y 8701,71, respectivamente, es mayor a los teóricos para 95 y 99% de probabilidad (apéndice A.3 y A.4). Además, los valores de P (0,000 en ambos casos) son menores a $\alpha=0,05$, lo cual confirma que los valores que se obtienen son estadísticamente significativos. Esto indica, la temperatura de operación y la apertura de los aspersores, como factores aislados, son las variables que influyen marcadamente en los valores de tiempo de enfriamiento, en especial la temperatura de operación ya que su factor de Fisher calculado es el mayor de todos los obtenidos.

De igual forma, del análisis de varianza se puede determinar que las interacciones entre las variables también influyen significativamente en el tiempo que tarda el equipo en enfriarse, ya que los factores de Fisher calculados para esta, Temperatura-Aspersores (483,43) es mayor a los valores teóricos para 95 y 99% de probabilidad, y los valores de P (0,000) es menor a $\alpha=0,05$, lo cual corrobora que los valores que se obtienen son estadísticamente significativos. Finalmente, para complementar el análisis de varianza, se presenta el gráfico de interacciones en la Figura 4.7. En este gráfico se representa las interacciones entre variables, además se puede confirmar que existen interacciones significativas de las variables estudiadas, lo cual se observa al cambiar de pendiente una respecto a otra.

De todo lo anteriormente expuesto, se infiere que la interacción más significativa es la de temperatura de operación, ya que su factor de Fisher calculado es mayor. La



interacción de los aspersores en la variable respuesta aumenta a medida que aumenta la temperatura de operación por lo que se necesita menos tiempo para enfriar cuando los aspersores están abiertos.

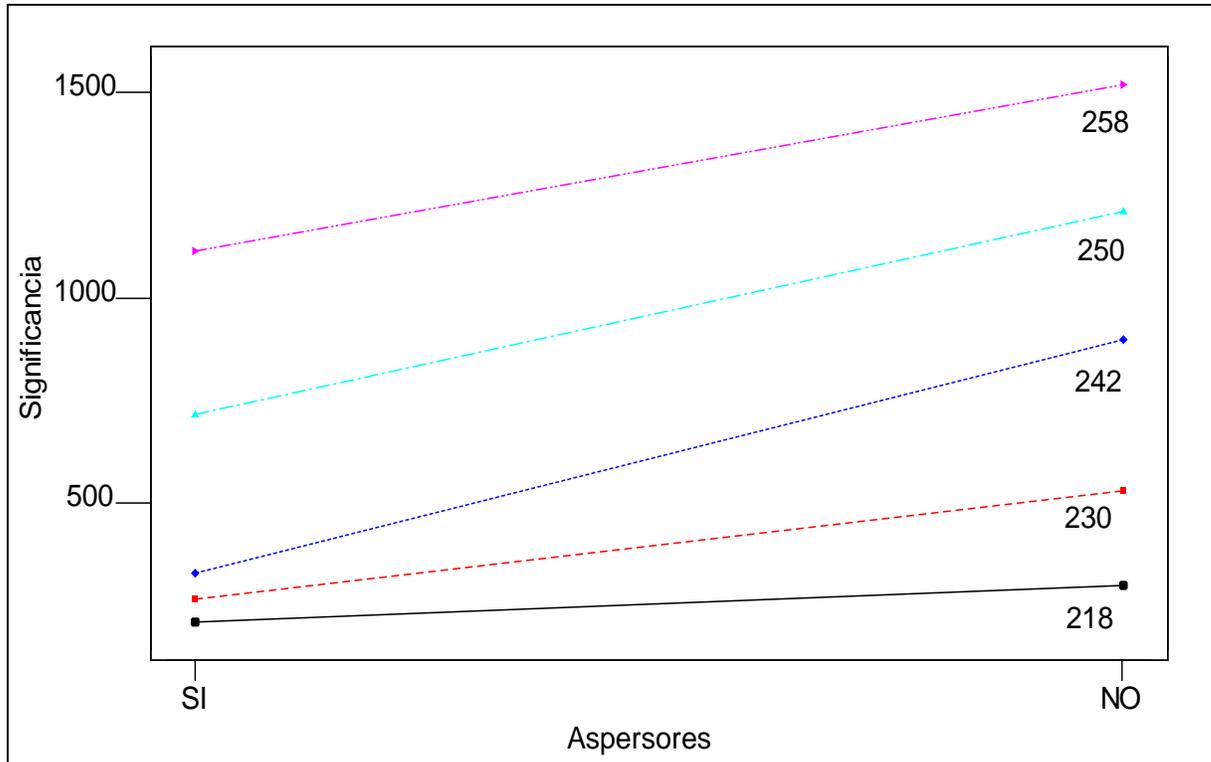


Figura 4.7: Interacciones de las variables Temperatura de operación y aspersores en la etapa de enfriamiento del Autoclave.

A fin de hallar un modelo matemático usando como herramienta el software Minitab 13.0, se obtuvo una regresión del tiempo de enfriamiento para cada posición de la variable aspersores, debido a que la temperatura de operación es la que mayor interacción genera en la variable respuesta. En las figuras 4.8 y 4.9 están representadas las curvas de regresión obtenidas, donde es posible observar que el coeficiente de correlación de los datos a las curvas respectivas son 97,8 % para la curva de regresión con aspersores y 99% para la curva de regresión sin aspersores, lo cual da una idea del ajuste de los datos.



Tabla 4.5

Tiempo de enfriamiento de la etapa de enfriamiento del Autoclave para cada uno de los tratamientos

Temperatura de Operación (Top ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (te ± 0,01) s							
	Aspersores Cerrados			Promedio	Aspersores Abiertos			Promedio
218	296,65	301,34	300,42	299,47	212,56	210,77	213,62	212,32
230	526,83	517,91	548,10	530,95	257,13	260,16	277,88	265,06
242	881,96	910,46	905,57	899,33	330,66	326,33	326,33	327,77
250	1236,59	1200,59	1201,93	1213,04	713,61	718,62	720,29	717,51
258	1511,53	1531,66	1522,75	1521,98	1110,03	1114,57	1115,91	1113,50

Tabla 4.6

Análisis de varianza aplicado a los tiempos de enfriamiento del autoclave para cada uno de los tratamientos

Fuente de Variación	Grados de libertad (GL)	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrados medios ajustados (CM)	F _{calc}	F _{0,05}	F _{0,01}	P	Decisión
Temperatura	4	4484230	1121057	9724,57	2,87	4,43	0,00	**
Aspersores	1	1003141	1003141	8701,71	4,35	8,10	0,00	**
Temperatura-Aspersores	4	222919	55730	483,43	2,87	4,43	0,00	**
Error	20	2306	2306	-	-	-	-	-
Total	29	5712594	-	-	-	-	-	-

F_{calc} : Factor de Fischer calculado.

** : Significativo.

F_{0,05} : Factor de Fischer teórico al 95% de probabilidad.

F_{0,01} : Factor de Fischer teórico al 99% de probabilidad.

P : Prueba estadística de significancia.

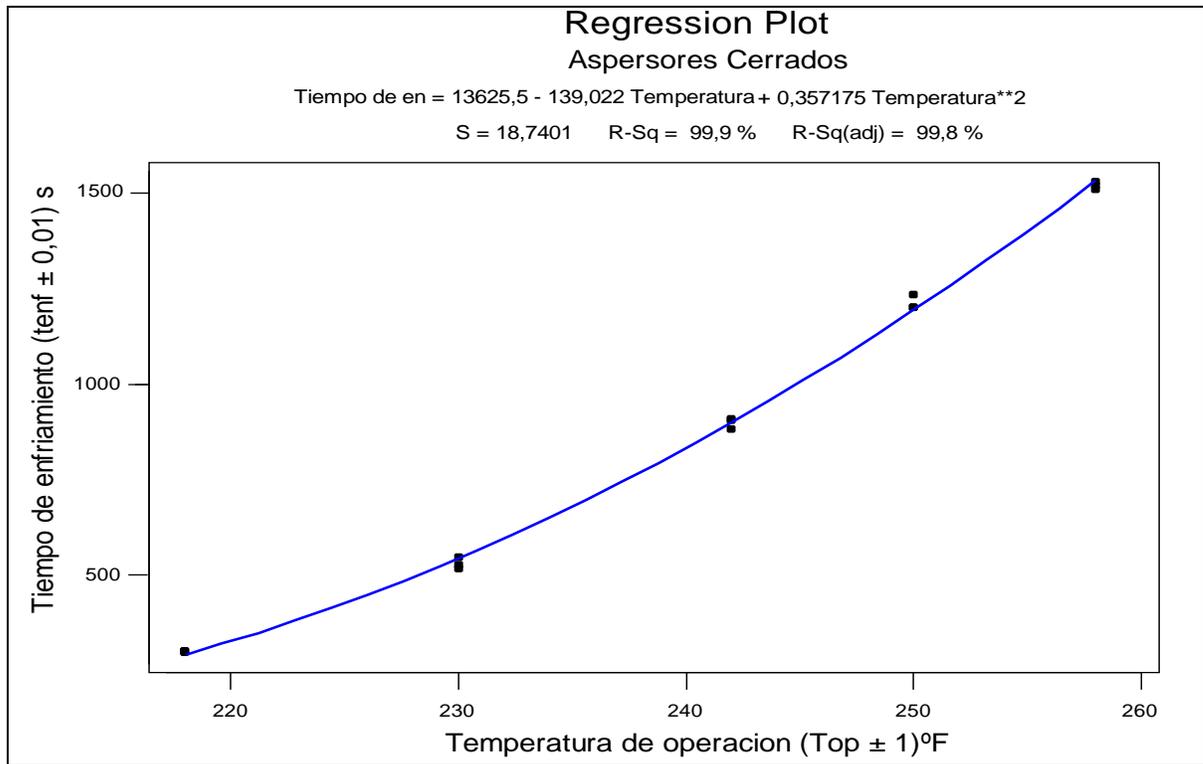


Figura 4.8 Curva de Regresión del tiempo de enfriamiento operando el autoclave con aspersores cerrados.

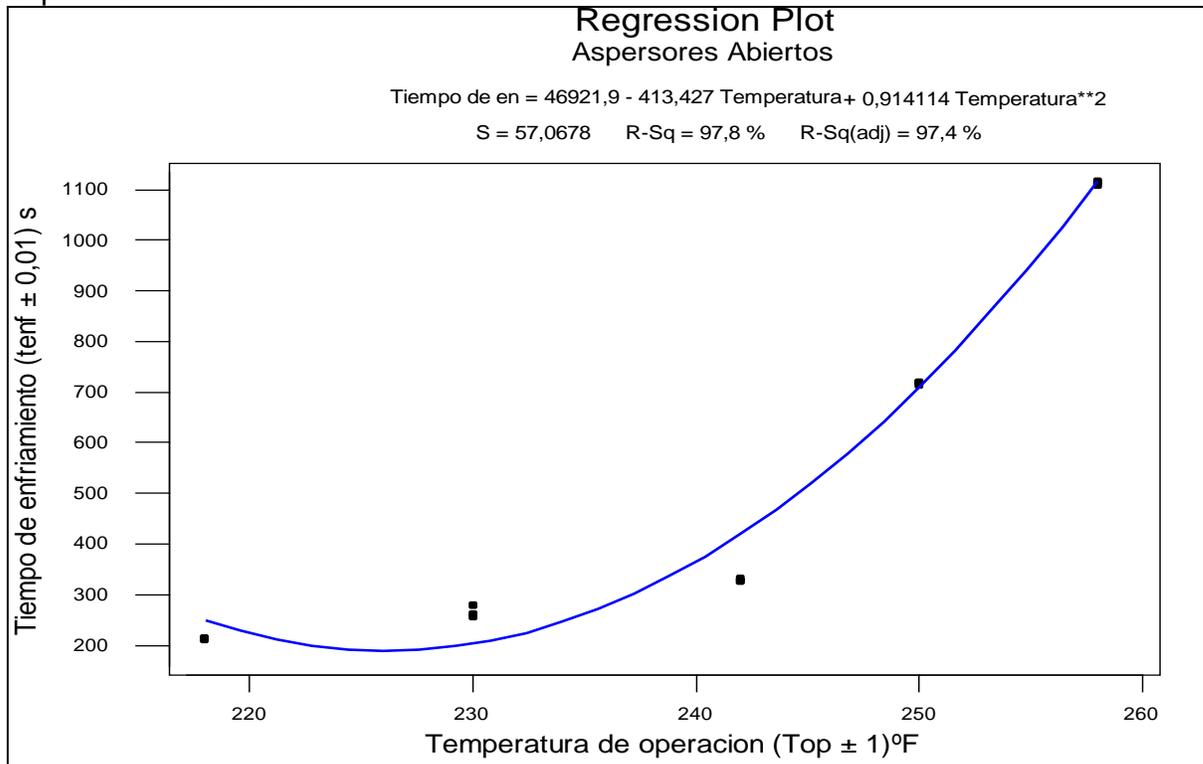


Figura 4.9 Curva de Regresión del tiempo de enfriamiento operando el autoclave con aspersores abiertos.



En esta etapa la temperatura interna del autoclave disminuye a medida que ingresa agua de enfriamiento y se admite aire (para mantener constante la presión). Los datos recolectados de esta etapa se muestran en el Apéndice C (Tabla C.11 a Tabla C.20).

Para el tratamiento de los datos se promediaron las corridas correspondientes a cada temperatura separando según la variable aspersores (cerrado y abierto). En las Figuras 4.10 y 4.11 se puede apreciar el comportamiento de la temperatura de enfriamiento al transcurrir el tiempo. En cada figura se puede inferir que al aumentar la temperatura de operación es necesario más tiempo para llegar a una temperatura de enfriamiento donde el equipo sea manipulable.

Para hallar los modelos matemáticos de la temperatura de enfriamiento, se realizaron ajustes por dos métodos, mínimos cuadrados (método 1) e interpolación de thiele (método 2), ambos métodos explicados en el Capítulo II de esta investigación. Para llevar a cabo el método 1 se usó el complemento de Excel Solver, el cual consiste en buscar el valor óptimo (mínima sumatoria de los cuadrados de los residuos) para una fórmula ajustando los valores en las celdas cambiantes que se especifiquen, denominadas celdas ajustables (coeficientes del polinomio), para generar el resultado especificado en la fórmula de la celda objetivo (sumatoria de los cuadrados de los residuos).

En cuanto al método 2, se utilizó como herramienta el software Maple 9.5 donde está el comando de este método, el cual consiste en devolver la función racional en forma de fracción continuada en la variable que interpola los puntos dados. Cuando la número de datos (n) es impar, el numerador y los polinomios de denominador tienen el grado $(n-1)/2$. Cuando la n es par, el numerador tiene $n/2$ de grado y el denominador tiene el grado $n/2-1$.

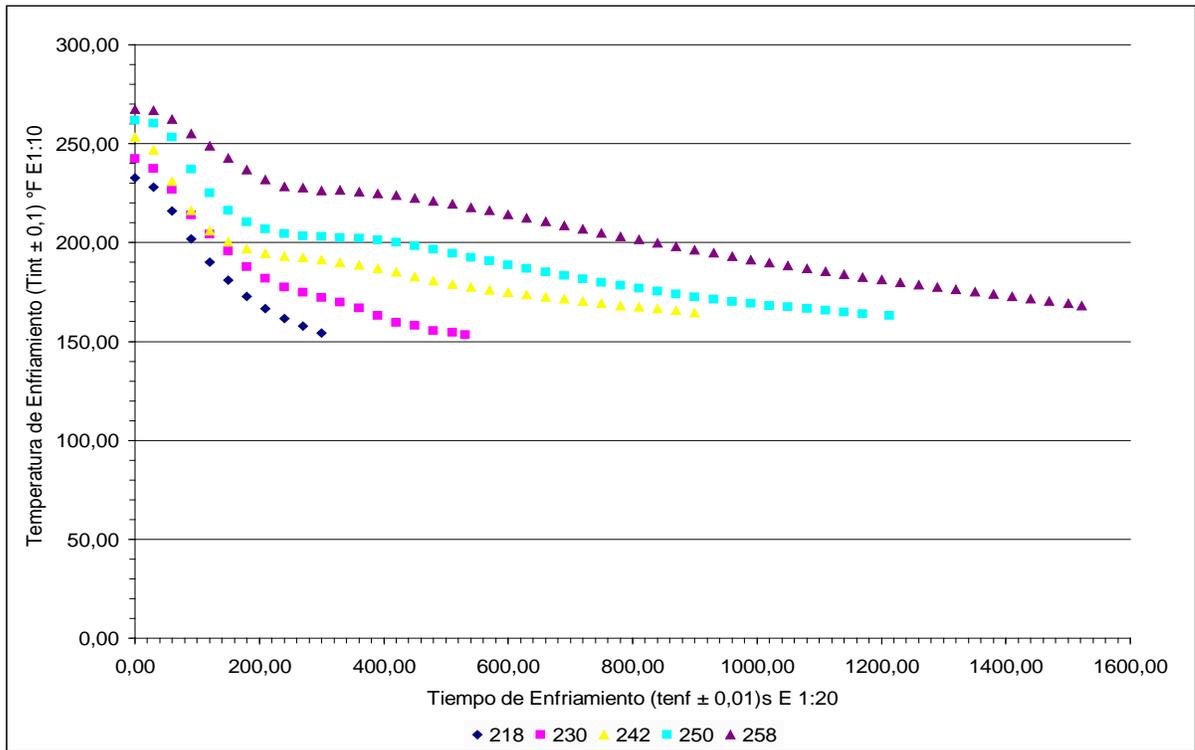


Figura 4.10 Comportamiento de la temperatura de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores cerrados

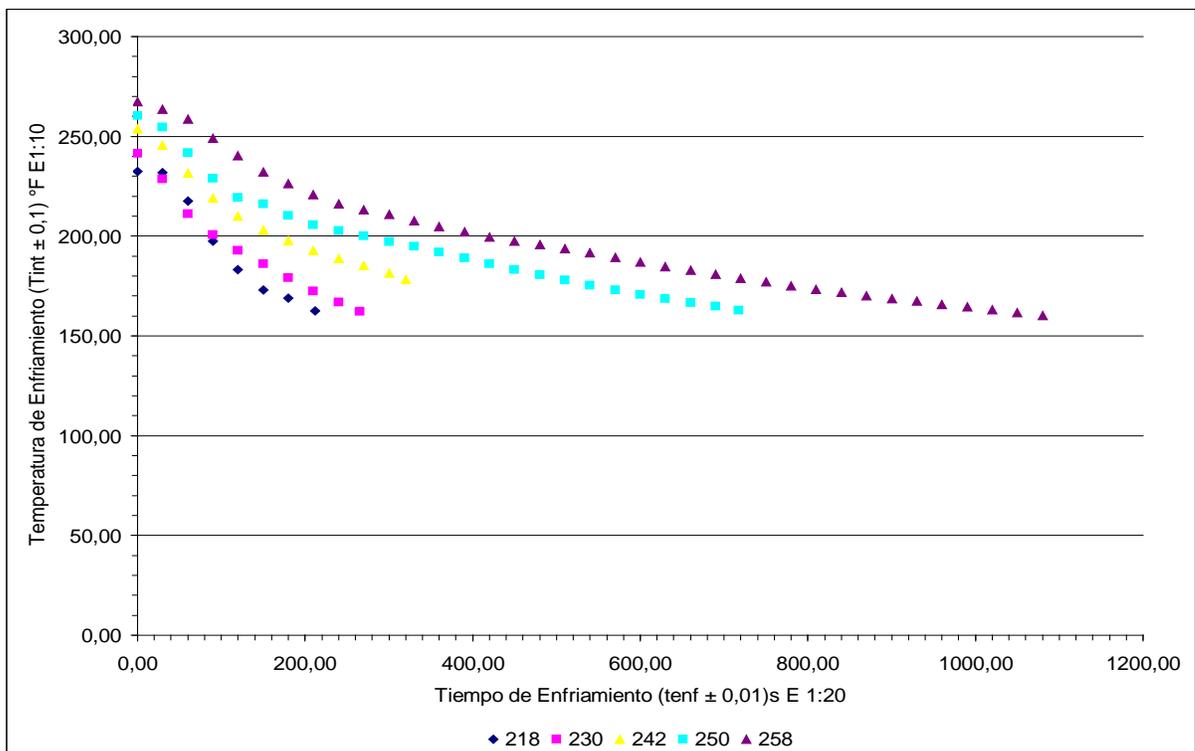


Figura 4.11 Comportamiento de la temperatura de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores abiertos



Para las temperaturas de 242 °F a 258 °F el ajuste del método 2 presentaba oscilación polinomial, lo cual implica el acomodo de la curva a la mayoría de los datos experimentales este fenómeno se acrecienta a medida que aumente el grado del polinomio de ajuste, pero al evaluar un punto intermedio no se ajusta a la realidad. Sin embargo para Temperaturas menores el ajuste fue adecuado, con coeficientes de correlación iguales a 1,000.

Por el contrario, el método 1 presentaba la misma tendencia de los datos experimentales, aunado a que el polinomio que presentó menor sumatoria del cuadrado de los residuos fue el de grado dos, tal observación se presenta en la Figura 4.12. Por estas razones se seleccionó este método para obtener los modelos matemáticos de esta variable, ya que los modelos matemáticos obtenidos por mínimo cuadrado presentan los polinomios con menor grado.

Datos Experimentales 230 °F Aspersores Abiertos			Metodo minimos cuadrado Polinomio grado 1			Metodo minimos cuadrado Polinomio grado 2			Metodo minimos cuadrado Polinomio grado 3		
Tiempo	T indicador	Nivel de agua	PX	(yi-P(xi)) ²	a=	PX	(yi-P(xi)) ²	a=	PX	(yi-P(xi)) ²	a=
0,00	241,6	0,00	232,92	75,39	b= 232,917	240,61	0,99	b= -0,483	258,09	271,79	b= 0,0081
30,00	228,7	3,67	224,28	19,58		226,77	3,74	c= 240,605	226,45	5,06	c= -1,280
60,00	211,1	5,87	215,63	20,85		214,24	10,09		206,43	21,46	d= 258,086
90,00	200,7	7,60	206,99	39,58		203,04	5,46		195,16	30,66	
120,00	192,9	9,03	198,35	30,05		193,15	0,08		189,76	9,66	
150,00	186,0	10,40	189,71	13,74		184,57	2,04		187,34	1,81	
180,00	179,1	11,73	181,06	3,99		177,31	3,07		185,04	35,73	
210,00	172,6	13,07	172,42	0,02		171,37	1,43		179,98	54,96	
240,00	167,0	14,30	163,78	10,16		166,75	0,05		169,28	5,33	
265,06	162,2	15,53	156,56	31,42		163,89	2,97		153,93	67,86	
			Σ	244,76		Σ	29,92		Σ	504,31	
			S ²	30,60		S ²	4,27		S ²	84,05	

Figura 4.12 Ejemplo de ajuste de polinomios de Mínimos Cuadrados.

Debido a la tendencia que presentan las curvas de temperaturas de 250 y 258 °F, se dividieron en dos tramos cada curva para aplicarles el método de mínimos cuadrados, trayendo como consecuencia que estas curvas presentaran dos curvas de regresión.

En cuanto a los datos de nivel de agua, al igual que la variable anterior se promediaron los datos de las corridas correspondientes a la combinación de factores, el comportamiento de los datos de esta variable se presenta en las Figuras 4.13 y 4.14 para cada posición de los aspersores.



Al tratar los datos promedios del nivel se utilizaron los métodos mencionados anteriormente. El método 1 no se ajustaba de manera satisfactoria ya que los coeficientes del polinomio no cambiaban en la plantilla de solver. En cuanto al método 2, debido a que el primer punto es (0,00; 0,00) para todos los casos el software genera un error de división por cero. Por esta razón, los modelos matemáticos para esta variable se obtuvieron usando la herramienta de Excel “línea de tendencia”, ajustando los datos a polinomios de grado 2, debido a que la curva de ajuste no presenta oscilaciones muy grandes.

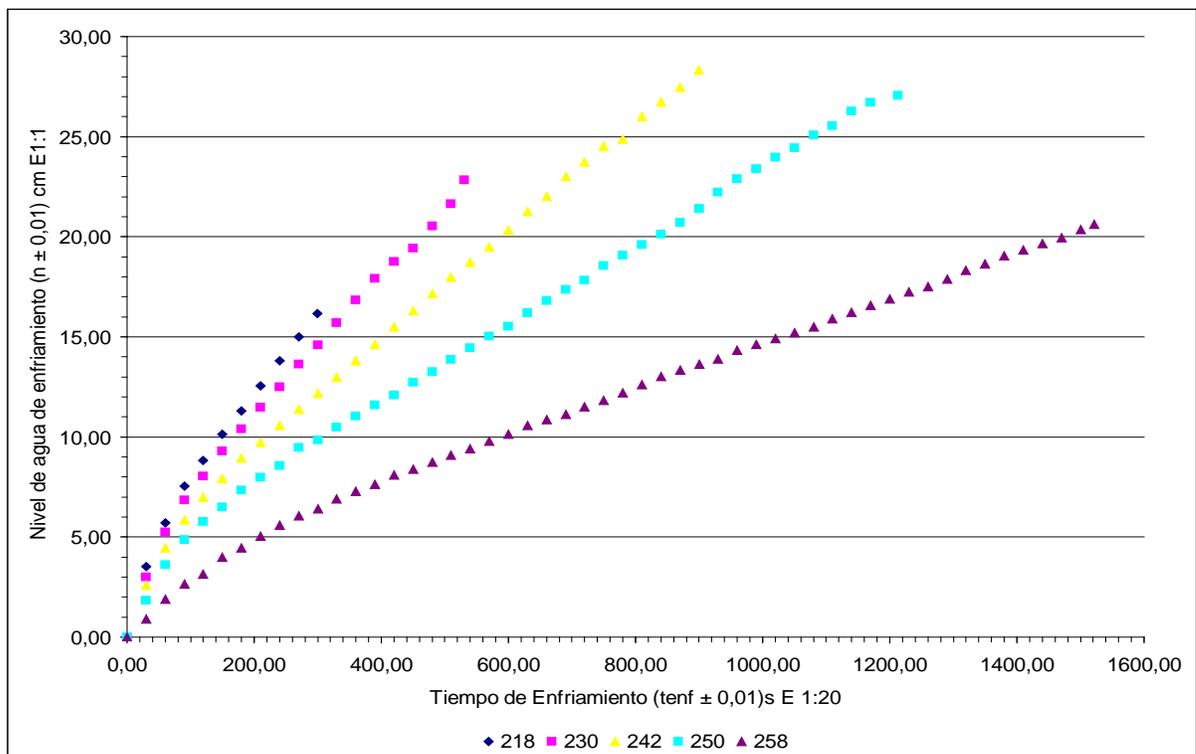


Figura 4.13 Comportamiento del nivel de agua de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores cerrados.

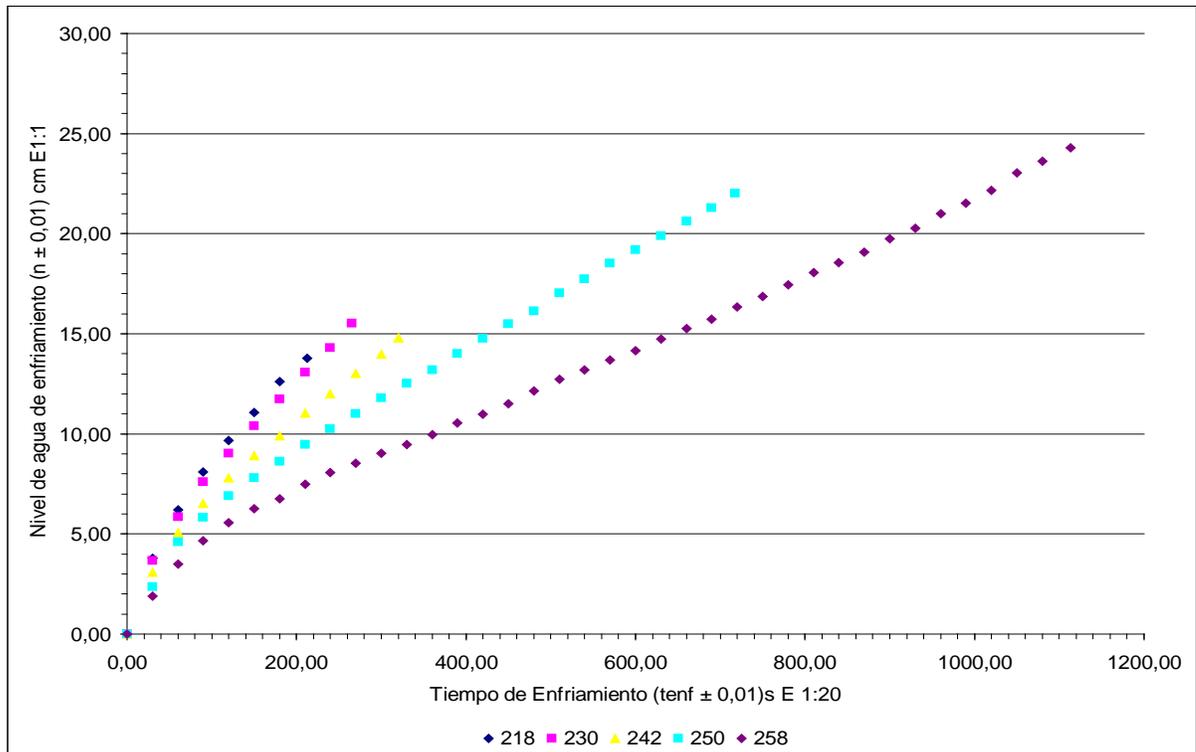


Figura 4.14 Comportamiento del nivel de agua de enfriamiento experimental respecto al tiempo operando el equipo con aspersores abiertos.

Los modelos matemáticos seleccionados para la temperatura de enfriamiento y el nivel de agua en el autoclave se presentan en las Tablas 4.7 y 4.8. La representación grafica de estos modelos se presentan en las Figuras 4.15 a 4.24 para temperatura de enfriamiento y en las Figuras 4.25 a 4.29 para el nivel de agua de enfriamiento.



Tabla 4.7

Modelos Matemáticos obtenidos para caracterizar etapa de enfriamiento operando con aspersores cerrados

Temperatura de Operación (Top ± 1) °F	Regresión obtenida para Temperatura interna	Regresión obtenida para Nivel de agua
218	$Tint = 0,0006 * tenf^2 - 0,4551 * tenf + 237,39$	$Nivel = -0,00009 * tenf^2 + 0,0763 * tenf + 0,8681$
230	$Tint = 0,0003 * tenf^2 - 0,3463 * tenf + 243,09$	$Nivel = -0,00003 * tenf^2 + 0,0531 * tenf + 1,4768$
242	$Tint = 0,0001 * tenf^2 - 0,1815 * tenf + 236,92$	$Nivel = -0,000008 * tenf^2 + 0,0357 * tenf + 2,0529$
250	Tramo 1: $Tint1 = 0,0007 * tenf^2 - 0,4418 * tenf + 269,08$ Rango de tiempo: (0 a 300)s Tramo 2: $Tint2 = 0,00002 * tenf^2 - 0,081 * tenf + 229,32$ Rango de tiempo: (300 a 1600)s	$Nivel = -0,000004 * tenf^2 + 0,025 * tenf + 2,2023$
258	Tramo 1: $Tint1 = 0,0002 * tenf^2 - 0,2209 * tenf + 271,47$ Rango de tiempo: (0 a 330)s Tramo 2: $Tint2 = 0,000004 * tenf^2 - 0,0592 * tenf + 246,84$ Rango de tiempo: (330 a 1300)s	$Nivel = -0,000002 * tenf^2 + 0,016 * tenf + 1,3511$

Tabla 4.8

Modelo Matemáticos obtenidos para caracterizar etapa de enfriamiento operando con aspersores abiertos

Temperatura de Operación (Top ± 1) °F	Regresión obtenida para Temperatura interna	Regresión obtenida para Nivel de agua
218	$Tint = 0,0006 * tenf^2 - 0,5079 * tenf + 239,34$	$Nivel = -0,0002 * tenf^2 + 0,101 * tenf + 0,464$
230	$Tint = 0,0007 * tenf^2 - 0,4832 * tenf + 240,61$	$Nivel = -0,0001 * tenf^2 + 0,0821 * tenf + 0,7648$
242	$Tint = 0,0006 * tenf^2 - 0,428 * tenf + 254,62$	$Nivel = -0,00004 * tenf^2 + 0,0524 * tenf + 1,8983$
250	$Tint = 0,0002 * tenf^2 - 0,2334 * tenf + 252,95$	$Nivel = -0,00001 * tenf^2 + 0,0377 * tenf + 1,7883$
258	$Tint = 0,00008 - 0,1736 * tenf + 260,63$	$Nivel = -0,000002 * tenf^2 + 0,0215 * tenf + 2,2981$

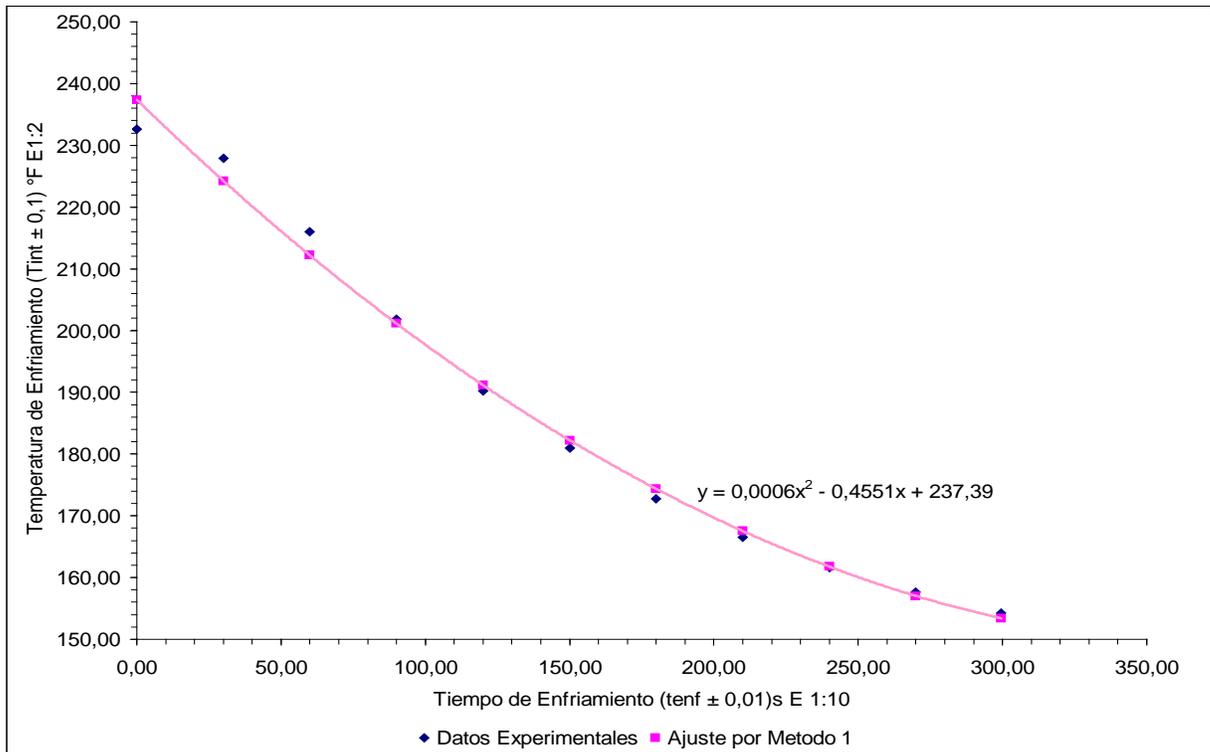


Figura 4.15 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (218 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.

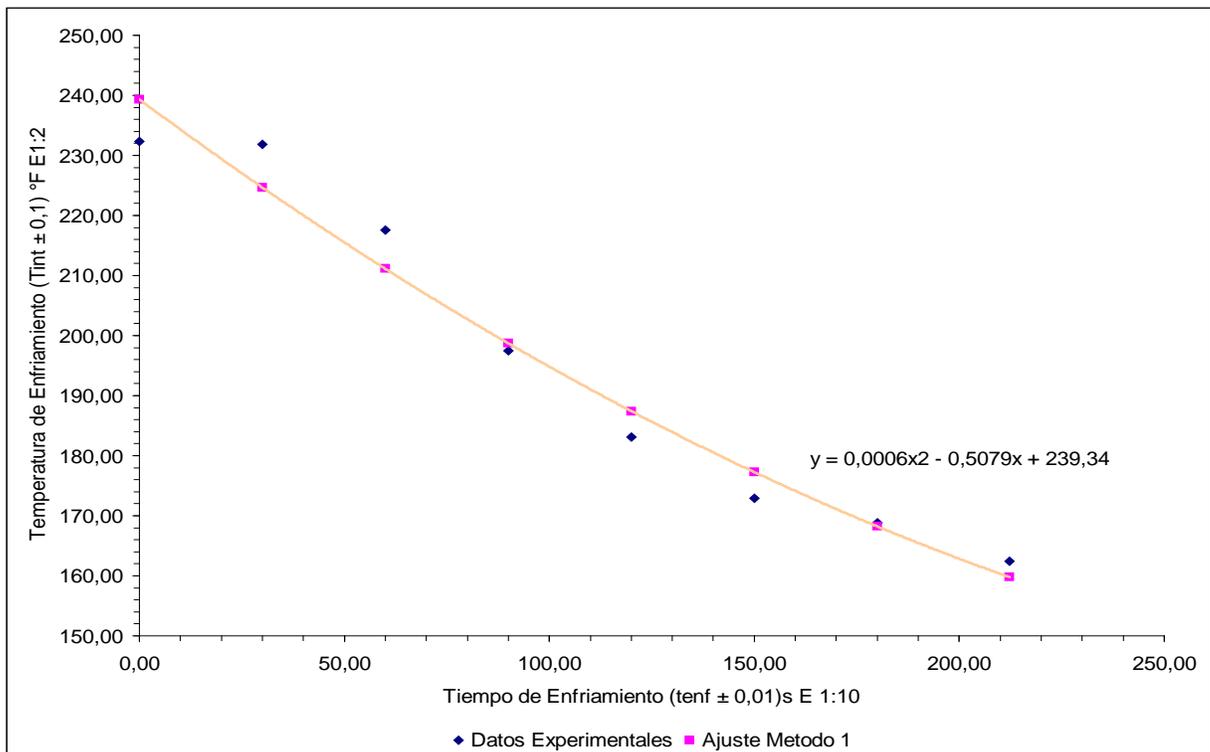


Figura 4.16 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (218 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.

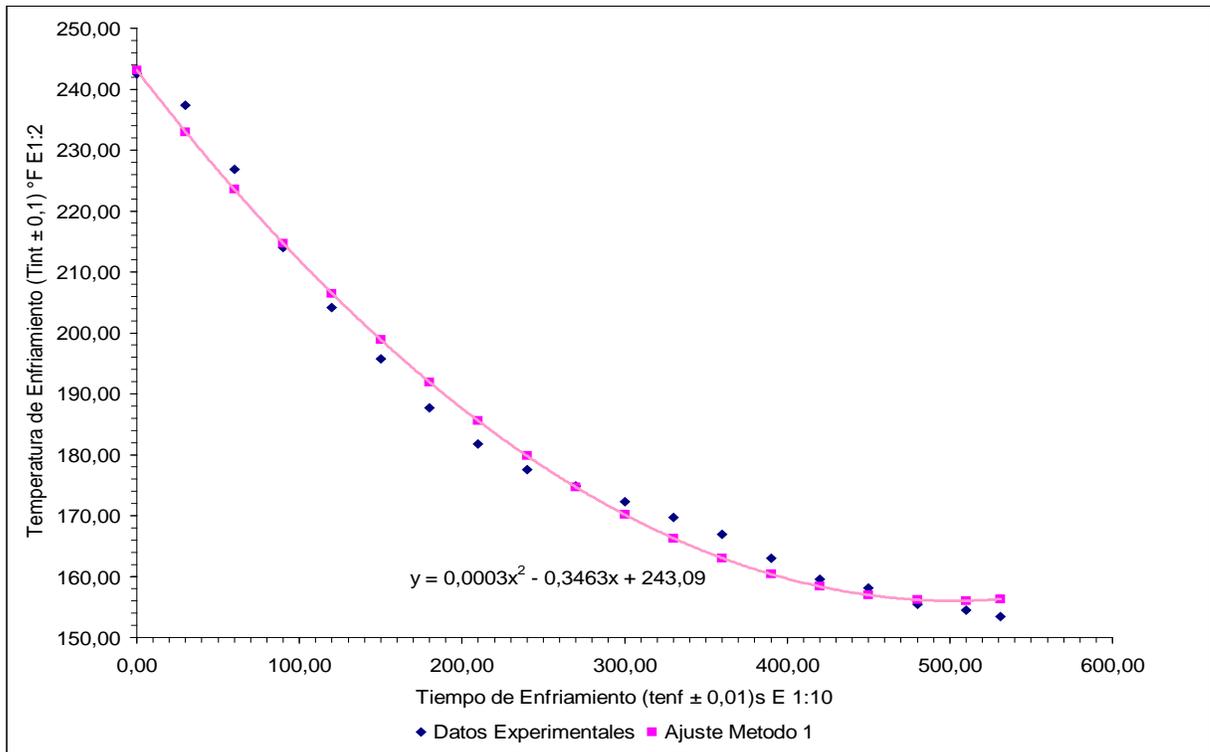


Figura 4.17 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (230 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.

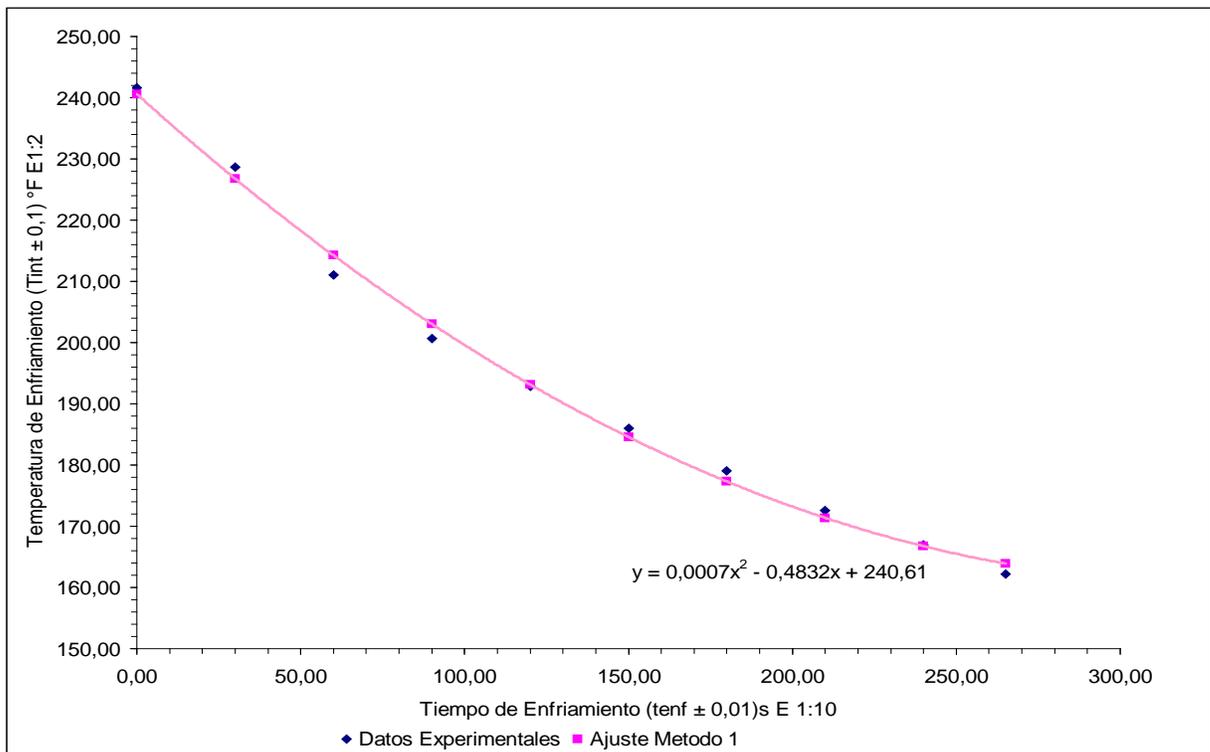


Figura 4.18 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (230 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.

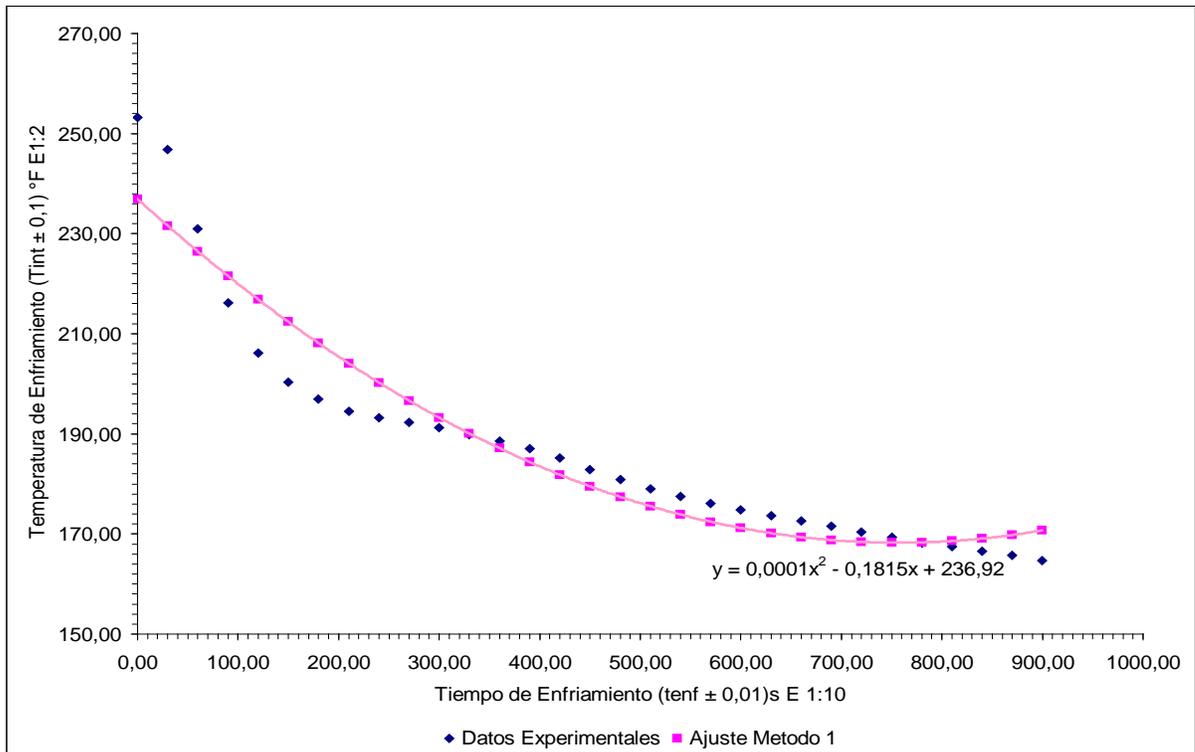


Figura 4.19 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (242 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.

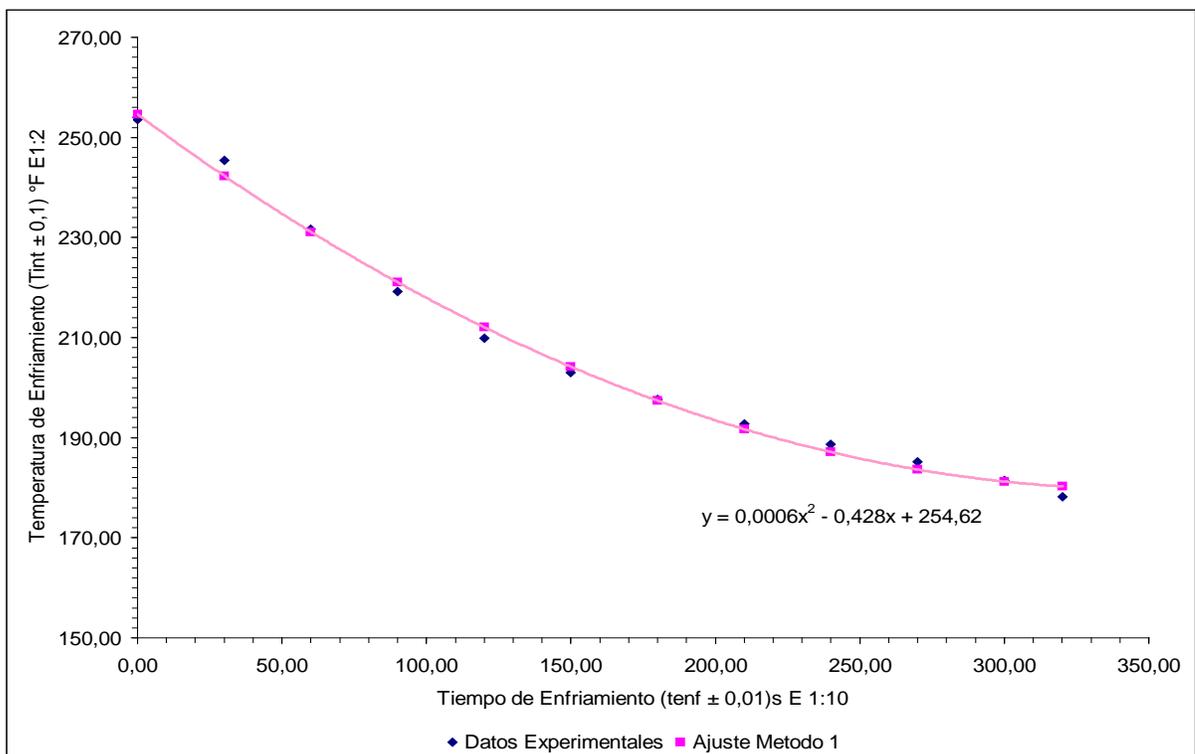


Figura 4.20 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (242 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.

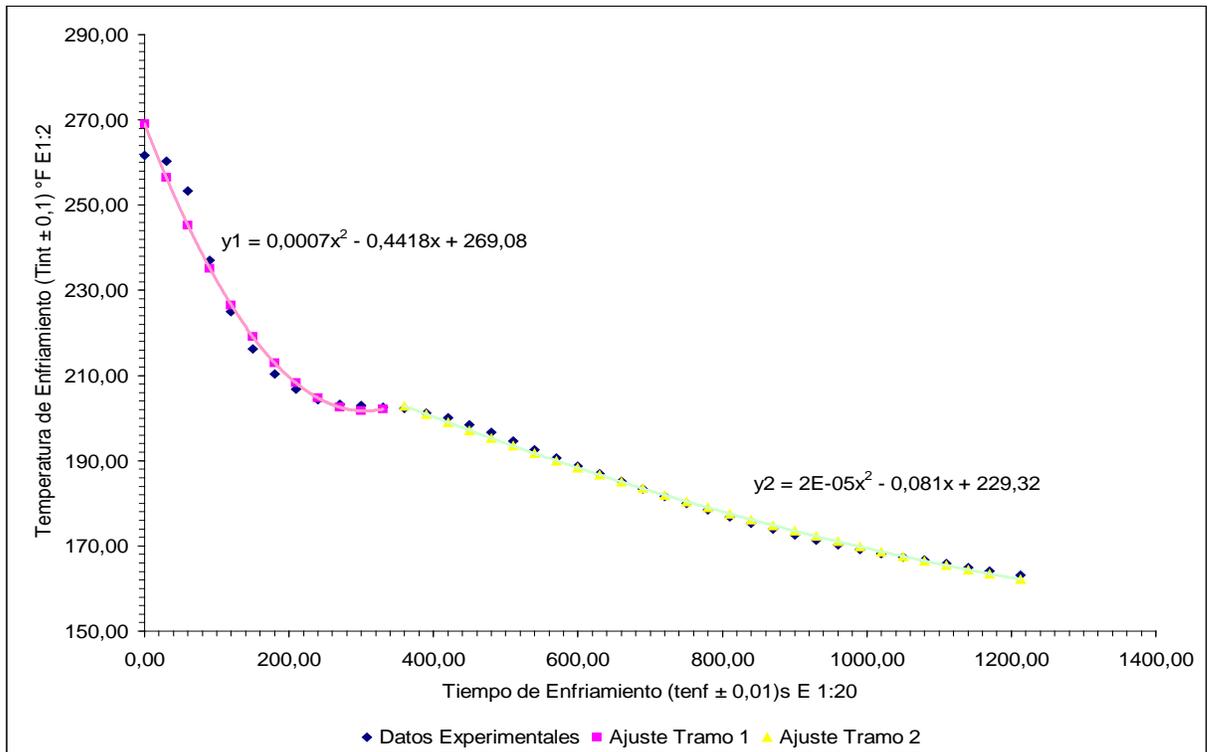


Figura 4.21 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (250 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.

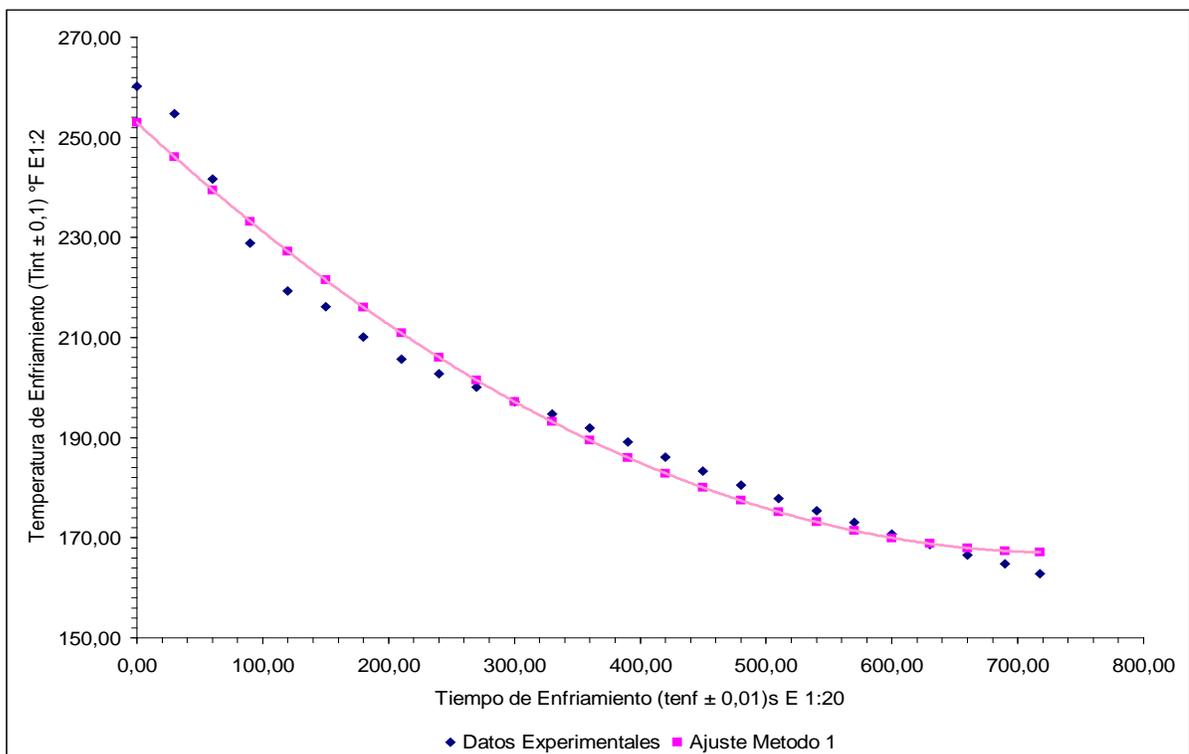


Figura 4.22 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (250 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.

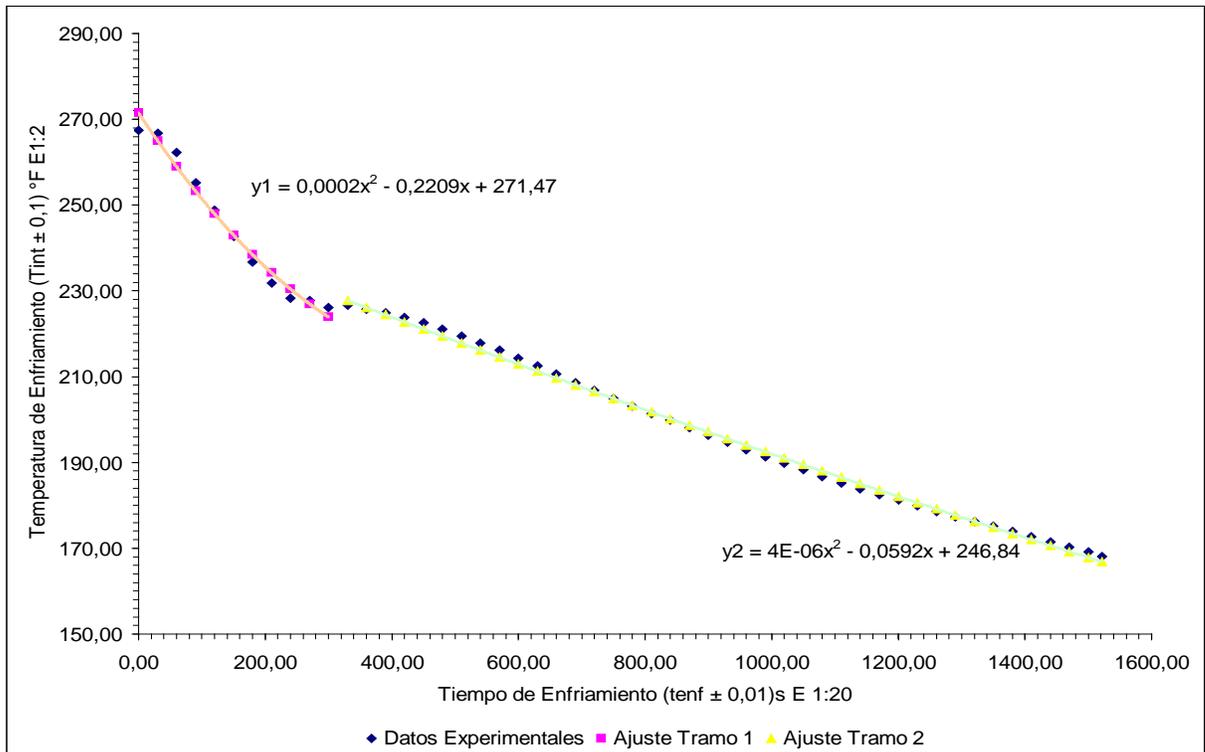


Figura 4.23 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (258 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores cerrados.

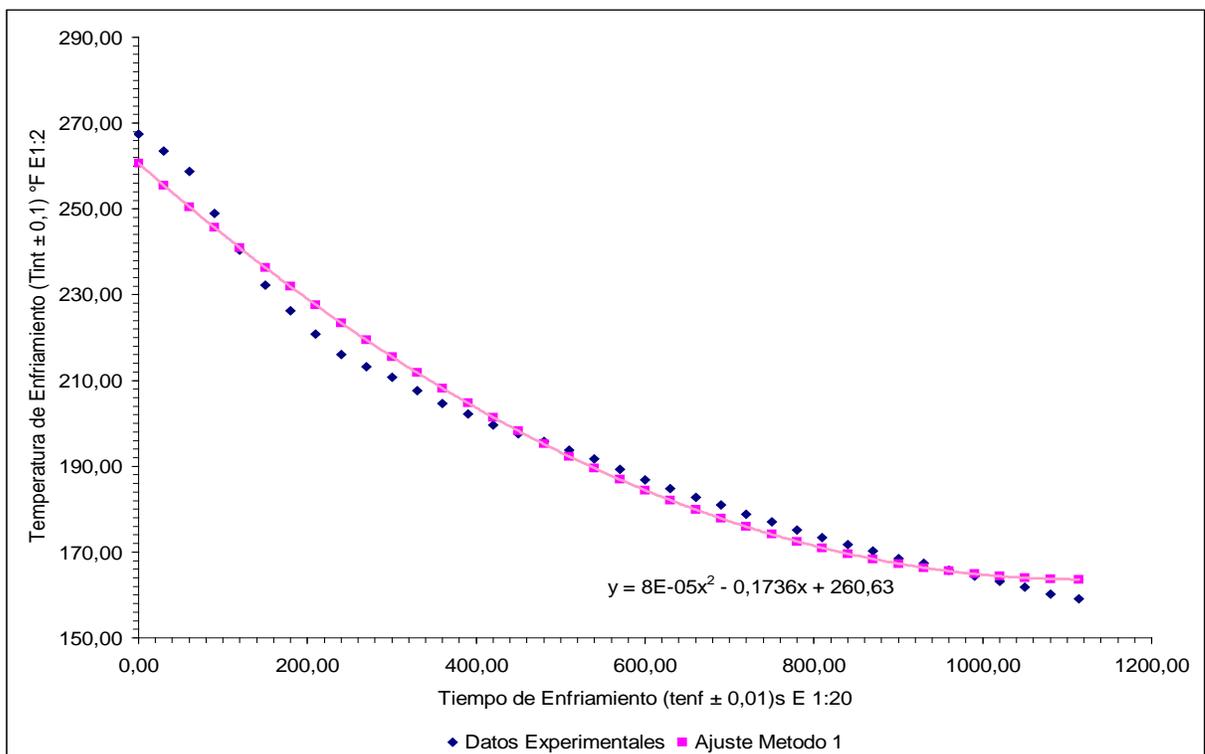


Figura 4.24 Curva de ajuste de temperatura de enfriamiento para una Temperatura de (258 ± 1) °F operando el autoclave con aspersores abiertos.

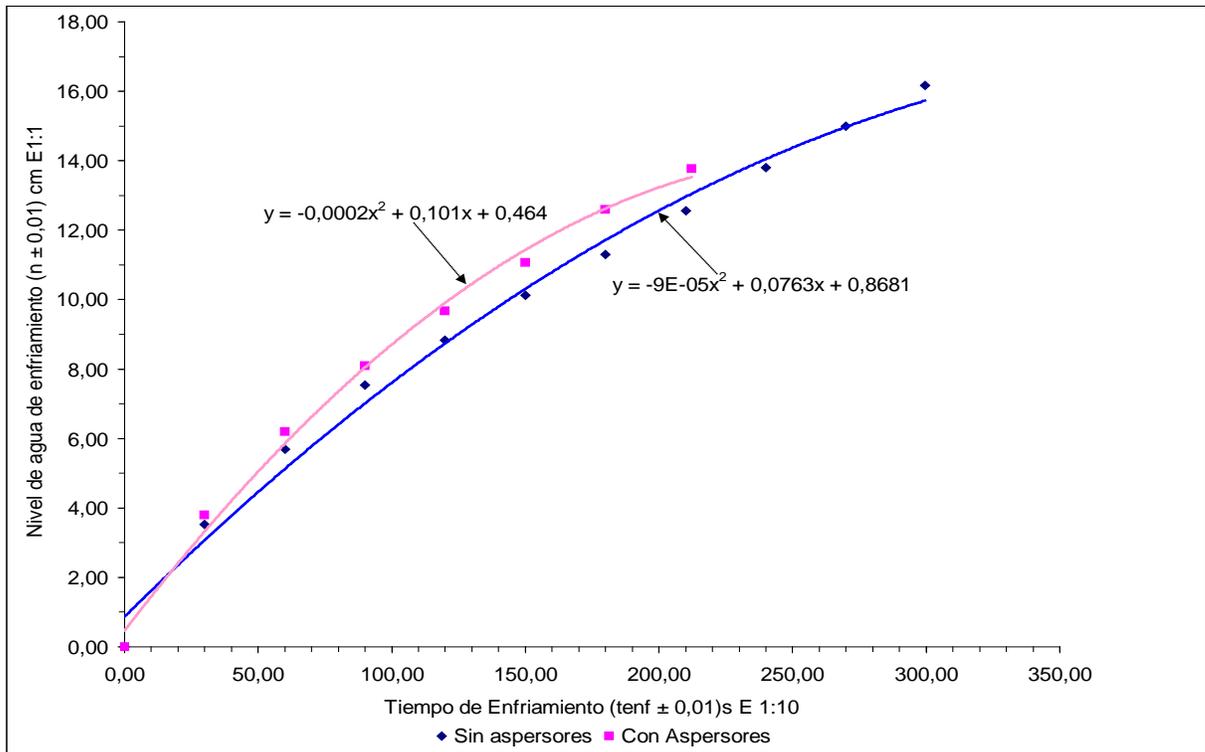


Figura 4.25 Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (218 ± 1) °F.

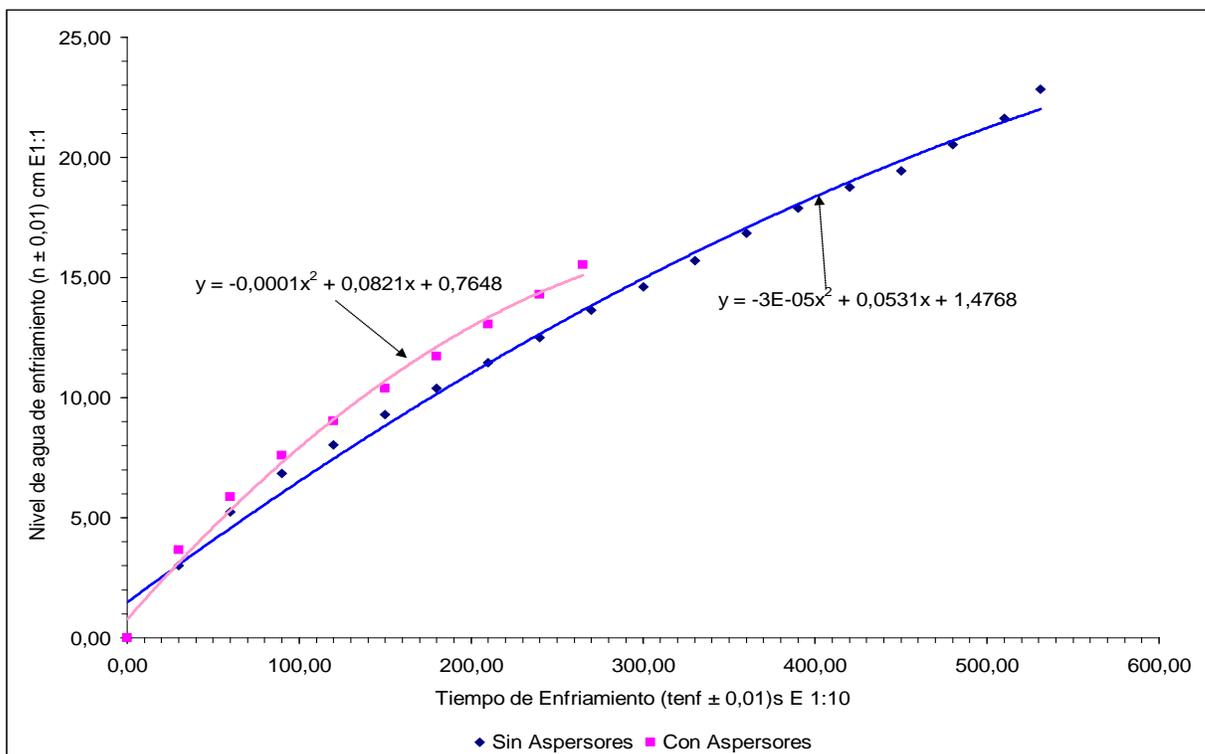


Figura 4.26 Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (230 ± 1) °F.

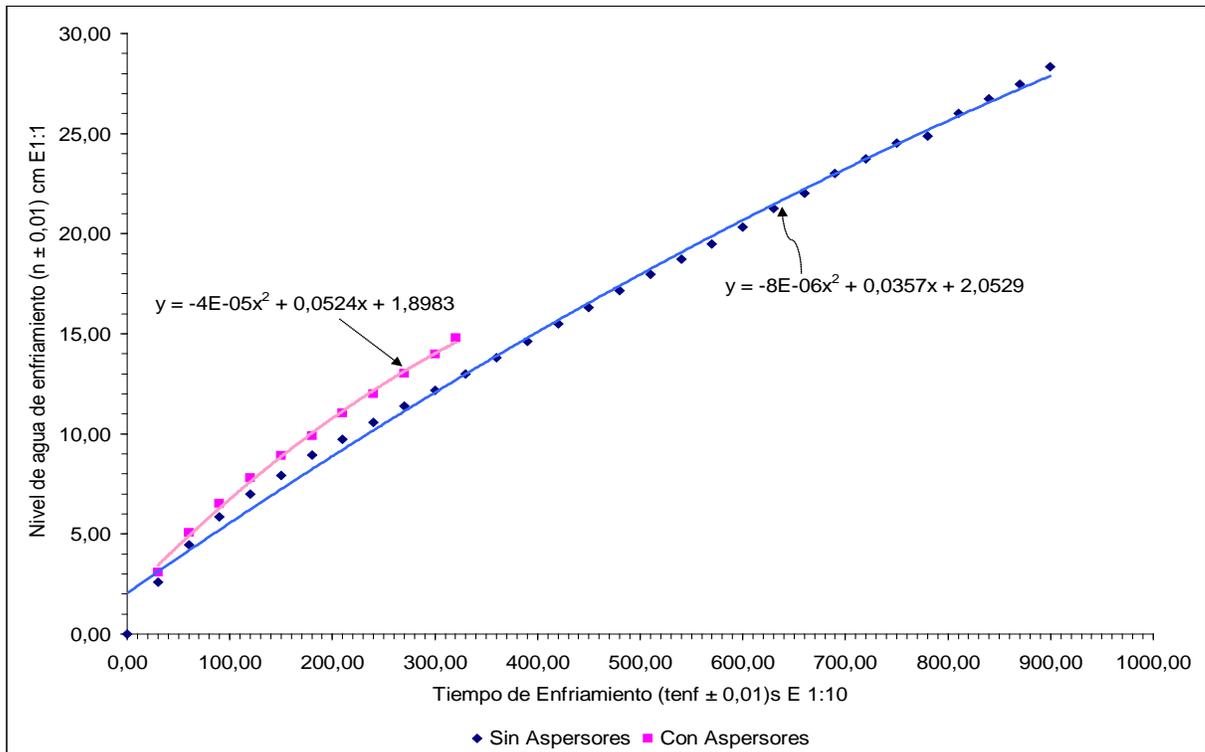


Figura 4.27 Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de $(242 \pm 1)^\circ\text{F}$.

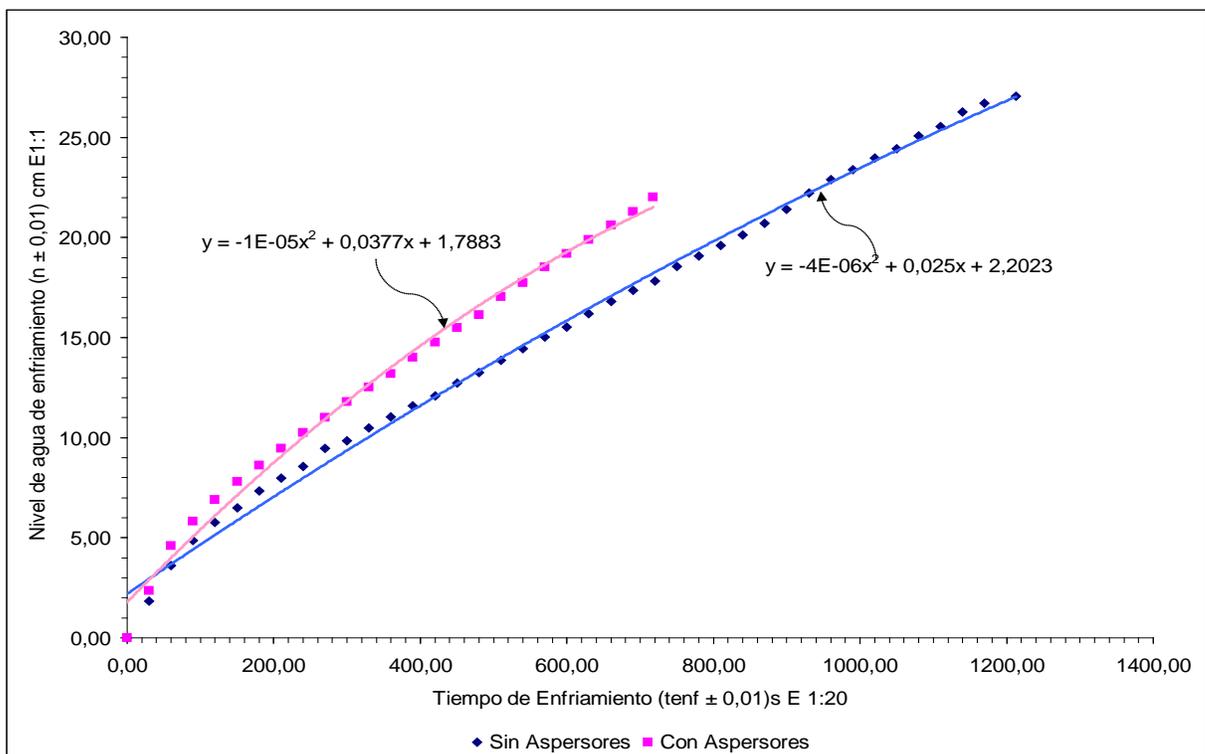


Figura 4.28 Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de $(250 \pm 1)^\circ\text{F}$.

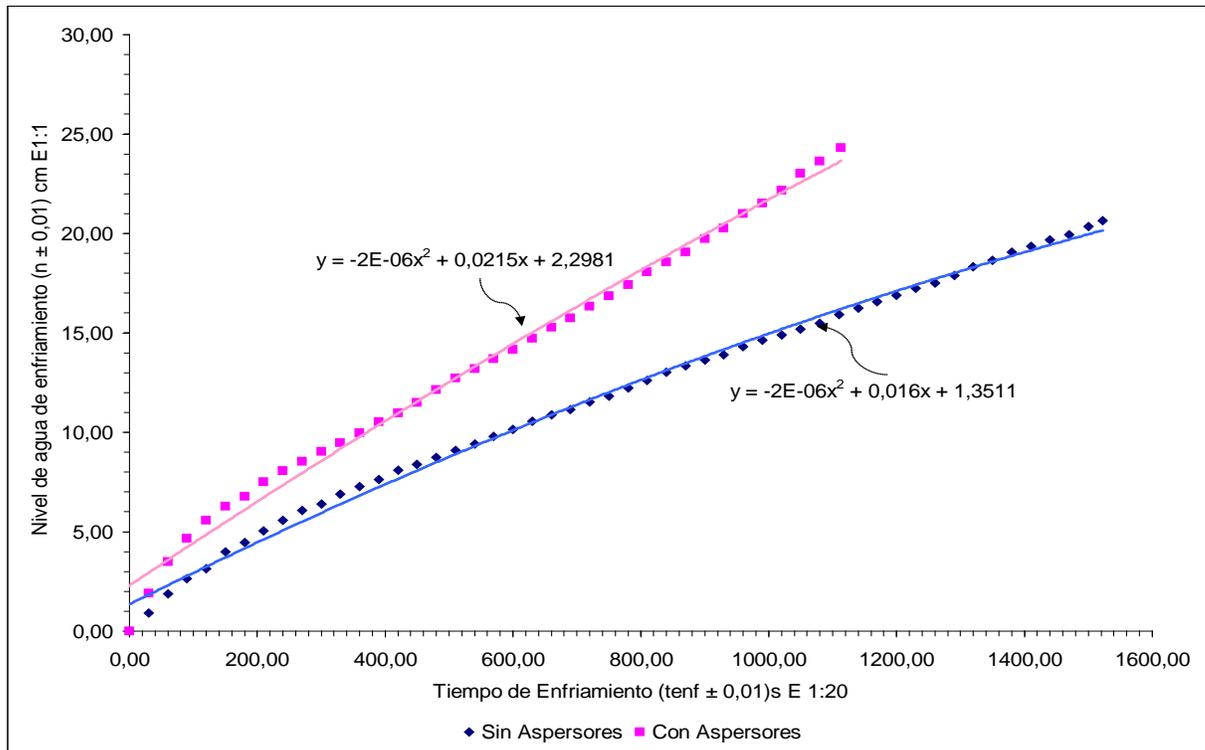


Figura 4.29 Curva de ajuste de nivel de agua de enfriamiento para una Temperatura de (258 ± 1) °F.

4.3 SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA LA PROGRAMACIÓN DEL SIMULADOR.

Tal como se observa en las referencias bibliográficas, existen muchos lenguajes de programación capaces de generar simuladores aplicables a diferentes áreas, sin embargo, no todos facilitan las herramientas necesarias para la elaboración de un simulador sencillo, ameno al usuario y que sea simple desde el punto de vista de ejecución. Finalmente entre los lenguajes bajo los cuales puede ser elaborado el simulador que muestre el comportamiento del equipo en estudio se listan:

- QuickBasic
- DELPHI
- Microsoft Excel
- Lenguaje C#
- Visual Basic



Se propone una serie de criterios de selección los cuales parten de los recursos disponibles, el poco conocimiento del área de programación, y otros aspectos que se resumen en nuestras necesidades y el cumplimiento de nuestros objetivos de específicos de simulación.

Criterios considerados para la selección del software para la programación del simulador

1.-*Complejidad del lenguaje*: es el criterio con más relevancia, debido a que en nuestro caso no se tiene un conocimiento tan avanzado en el área de la programación.

2.-*Velocidad de procesamiento*: no tiene tanta jerarquía frente a las demás, ya que este proyecto no se enfoca a hacer que el programa sea lo más rápido posible, por ser esto tema de profesionales en la rama de la programación.

3.-*Interfaz para el usuario*: al igual que el criterio de la complejidad, este también presenta gran importancia, ya que una interfaz amigable es de gran ayuda al programador y facilita la comprensión de código.

4.-*Herramientas y funciones*: las herramientas y funciones que se necesitan en la elaboración de nuestro programa están presentes en casi todos los lenguajes listados, por eso en este caso no presenta tanta importancia.

5.-*Costo*: un criterio cuya relevancia fue baja, esto debido a que no se pretende elaborar este programa a nivel comercial, solo tenerlo como herramienta didáctica, hacerlo comercialmente puede ser un proyecto posterior.

6.-*Ayuda al usuario*: a pesar de ser importante para el programador, en la red se ubican gran cantidad de manuales que sirven de ayuda.

7.-*Conocimientos sobre el programa*: es un criterio que no debe dejarse de tomar en cuenta, ya que al surgir dudas sobre la programación juega un papel muy importante.



Matriz aplicada para la selección del software para la programación del simulador

Una vez considerado lo anterior, se emplea una matriz de criterios relevantes integrados aplicados al conjunto de softwares previamente seleccionadas, cuya matriz ponderada determina la escogencia del software más satisfactorio y adecuado desde el punto de vista de los criterios explicados en el punto anterior.

Los resultados de esta matriz se observan en la Tabla 4.9. En ésta se puede determinar que el software Visual Basic presenta un mayor puntaje por lo que se escoge este proceso para llevar a cabo la programación del simulador del comportamiento del autoclave.

Según los criterios establecidos en la matriz de selección, Visual Basic resulta ser la opción con mayor puntaje debido a que en primer lugar es un lenguaje con sintaxis sencilla, lo cual para este caso es algo muy importante debido a que se requiere programar en forma rápida y eficaz. Se tiene que desarrollar una buena velocidad de procesamiento y la interfaz para el usuario es la mejor de todos los otros lenguajes listados. Solo presenta desventajas en cuanto al costo y ayuda al usuario, pero como este proyecto solo trata de diseñar un programa y la ayuda mediante libros es excelente, estos criterios casi no se toman en cuenta. Otro punto importante es que muchas personas tienen conocimiento sobre este lenguaje, existe gran cantidad de documentación y tutoriales en Internet, por lo que es posible obtener ayuda cuando se presenten dudas.



Tabla 4.9

Matriz de los criterios relevantes integrados para la selección del software para la programación del simulador

Criterio	F	Software									
		QuickBASIC		DELPHI		EXCEL		LENGUAJE C		VISUAL BASIC	
		P	R	P	R	P	R	P	R	P	R
Complejidad del lenguaje	30	5	150	4	120	4	120	3	90	5	150
Velocidad de procesamiento	10	2	20	5	50	4	40	5	50	4	40
Interfaz para el usuario	25	3	75	4	100	5	125	4	100	5	125
Herramientas y funciones	10	2	20	4	40	3	30	5	50	4	40
Costo	5	5	25	2	10	2	10	2	10	2	10
Ayuda al usuario	5	5	25	2	10	4	20	4	20	3	15
Conocimientos sobre el programa	15	4	60	2	30	5	75	5	75	5	75
TOTALES	100		375		360		420		395		455

Donde:

 F : Factor de jerarquía (0-100). P : Ponderación (1 - 5), 5 es el valor mas favorable. R : Producto entre el factor de jerarquía y la ponderación.



4.4 DESARROLLO DEL MODULO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN.

Para crear el modulo del programa en Visual Basic, fue necesario conocer la metodología de trabajo del lenguaje. Visual-Basic es una herramienta de diseño de aplicaciones para Windows, la cual se desarrolla en gran parte a partir del diseño de una interfaz gráfica, de esta manera forma parte de los llamados lenguajes Visuales. Este tipo de lenguaje es aquel que junta la programación tradicional, formada por una sucesión lineal de código estructurado, y la programación orientada a objetos. Así, se puede decir que Visual Basic trabaja con la misma línea de comandos y funciones que el antiguo Basic, pero ahora agregando el manejo de objetos a partir de una interfase mas cómoda para el usuario.

Haciendo uso de la información investigada y basados en proyectos anteriores elaborados en Visual Basic 6.0, se creo una serie de pasos, los cuales se siguieron para la elaboración del programa, de manera que se entendiera de manera sencilla como debe crearse una aplicación bajo esta clase de lenguaje, los cuales se presentan a continuación:

- ✓ **Creación de la interfaz de usuario.** Esta interfase es la principal vía de comunicación hombre máquina, tanto para salida de datos como para entrada. Fue necesario partir de una ventana (Formulario) a la que se le añadieron los controles necesarios. En nuestro caso el programa consta de 3 pantallas principales, las cuales representaron las 3 etapas del proceso.
- ✓ **Definición de las propiedades de los controles (Objetos):** Estas propiedades determinaron la forma estática de los controles, es decir, como son los controles y para qué sirven.

Este paso se desarrollo básicamente mediante la asignación a los botones y ventanas de tamaños, estilos de letra, apariencia en pantalla y los eventos vinculados a los mismos.

- ✓ **Generación de los módulos del programa:** Este código describe los procedimientos o funciones que no responden a un evento acaecido a un objeto,



sino que responden a un evento producido durante la ejecución del programa. En el caso de esta investigación se describieron las siguientes funciones:

Function interpola: obtiene el valor de una interpolación lineal simple.

Function masaconden: obtiene la masa de condensado total que sale de la trampa en lb/s, considerando el fenómeno de vaporización súbita y las pérdidas de calor al ambiente en la trampa de vapor.

Function calorAmb: obtiene el calor perdido al ambiente en el autoclave, en Btu/s.

Function correccion: hace la corrección de la presión ambiental por latitud y temperatura.

Function flujocond: obtiene el flujo de líquido que sale de la trampa en lb/s, con las mismas consideraciones de la Function masaconden.

Function tempcond: obtiene la temperatura de salida del condensado en °F, a través de la regresión hallada en el objetivo 2.

Function estabiliza: obtiene el tiempo de estabilización de la etapa de cocción en segundos, al igual que la función anterior se usa la correlación hallada para esta variable.

Function tinterna: obtiene la temperatura interna la en°F, haciendo uso de la regresión hallada en el objetivo 2.

Function propiedad: obtiene las propiedades de líquido saturado a partir de una temperatura o presión de equilibrio.

Function temptrampa: determina la temperatura de la pared de la trampa en F

Function calotrampa: determina el calor perdido al ambiente de la trampa en Btu/h.

Function coefconvectivo: obtiene el coeficiente convectivo del aire, en Btu/h ft²°F.



Function tiempoenfria: obtiene el tiempo de enfriamiento de la etapa de enfriamiento en segundos

Function nivenfria: obtiene el nivel de agua final de la etapa de enfriamiento en cm.

Function temperenfria: determina la temperatura interna final de la etapa de enfriamiento en °F.

- ✓ **Generación del código asociado a los eventos que ocurren a los objetos:** A la respuesta a los eventos se le llama procedimiento, y deberá generarse de acuerdo a las necesidades del programa. Es el esqueleto del programa, ya que describe el comportamiento de cada botón, y es el código que vincula cada una de las funciones desarrolladas. Sigue fielmente el diagrama de cálculo descrito en el Capítulo III.

Además de estos pasos se definió unas bases de datos con las cuales se trabajaron durante el programa:

latitud.txt: tabla que se usa para la corrección de la presión por latitud

temperatura.txt: tabla que se usa para la corrección de la presión por temperatura

propiedades.txt: tabla de las propiedades del vapor saturado. Estas propiedades son temperatura de saturación, presión de saturación, volumen específico y entalpías.

Propiedades del aire.txt: tabla de las propiedades del aire. Estas propiedades son densidad, viscosidad, Cp, conductividad, Prandalt, etc.

A continuación se presentan las ventanas de las que dispone el software creado, con las entradas marcadas para cada ventana.

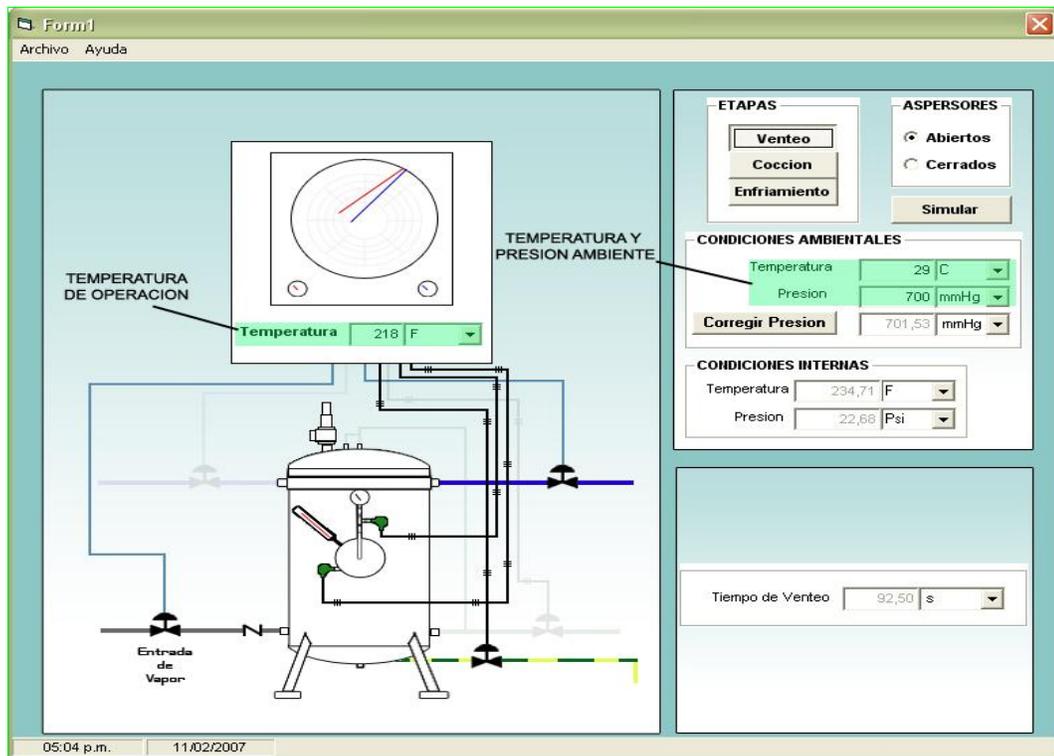


Figura 4.30 Entrada de Temperatura de operación y condiciones ambientales.

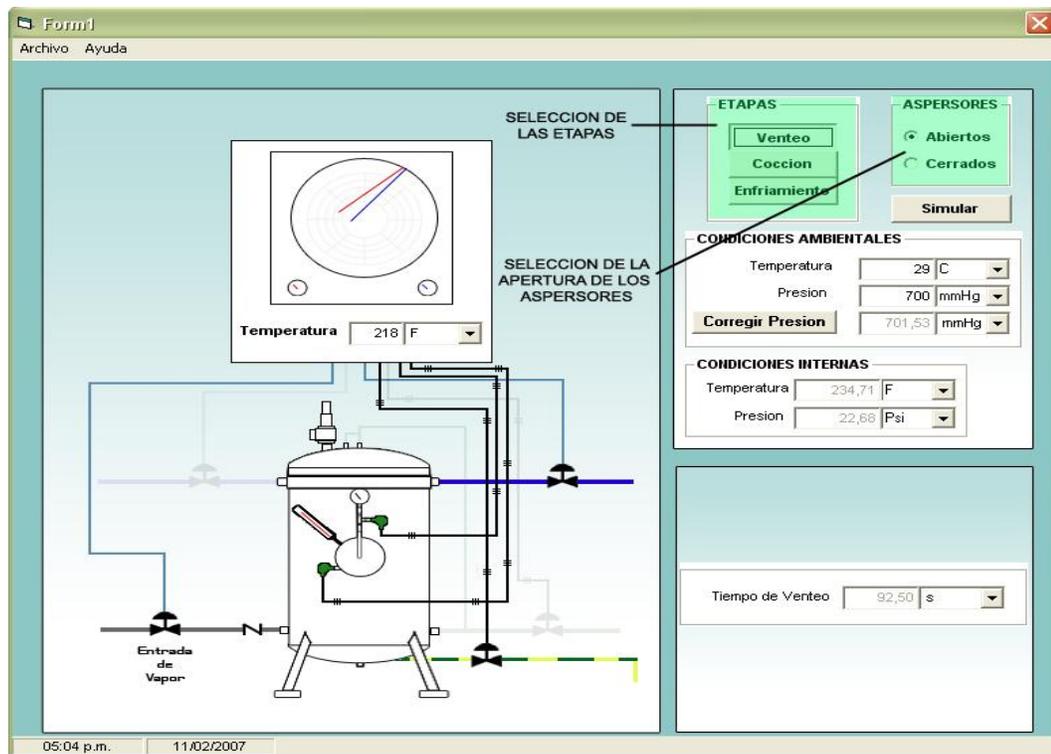


Figura 4.31 Selección de las pantallas y entrada de la apertura de los aspersores.

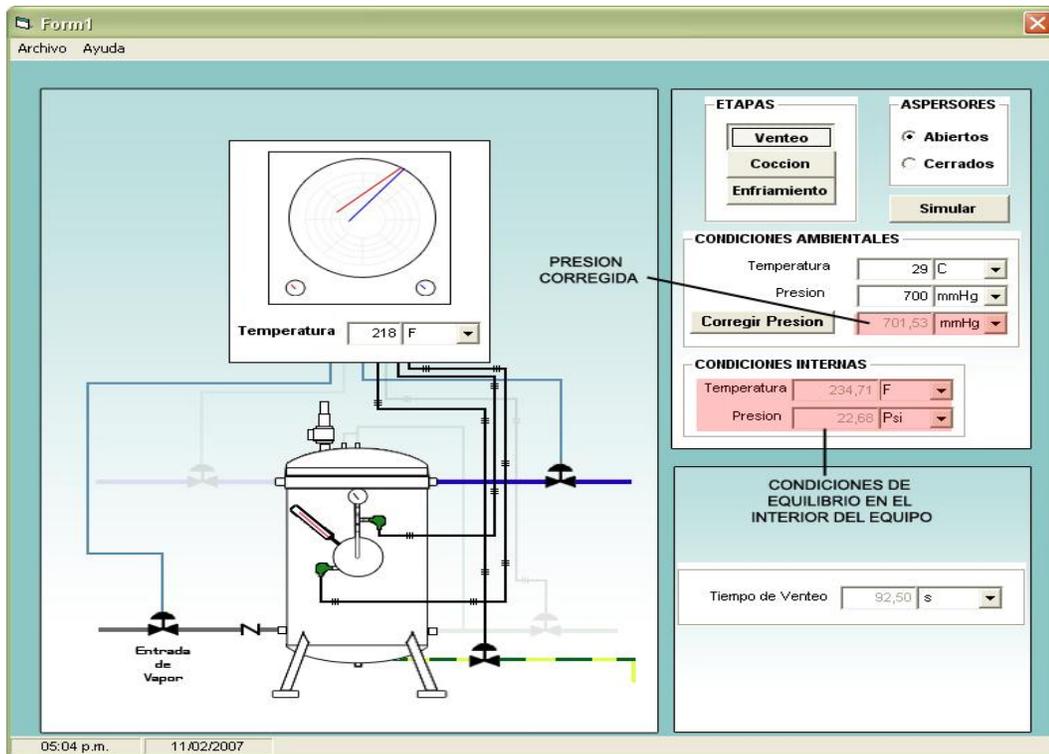


Figura 4.32 Salida de la presión corregida y las condiciones internas del equipo.

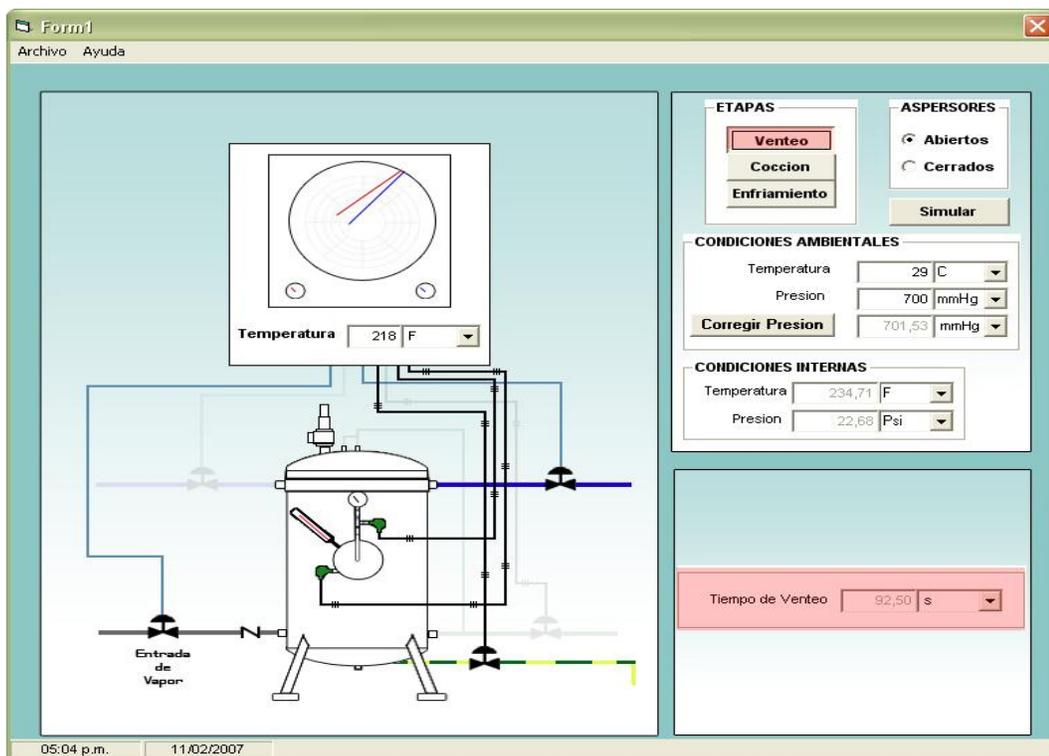


Figura 4.33 Salida de la etapa de ventee.

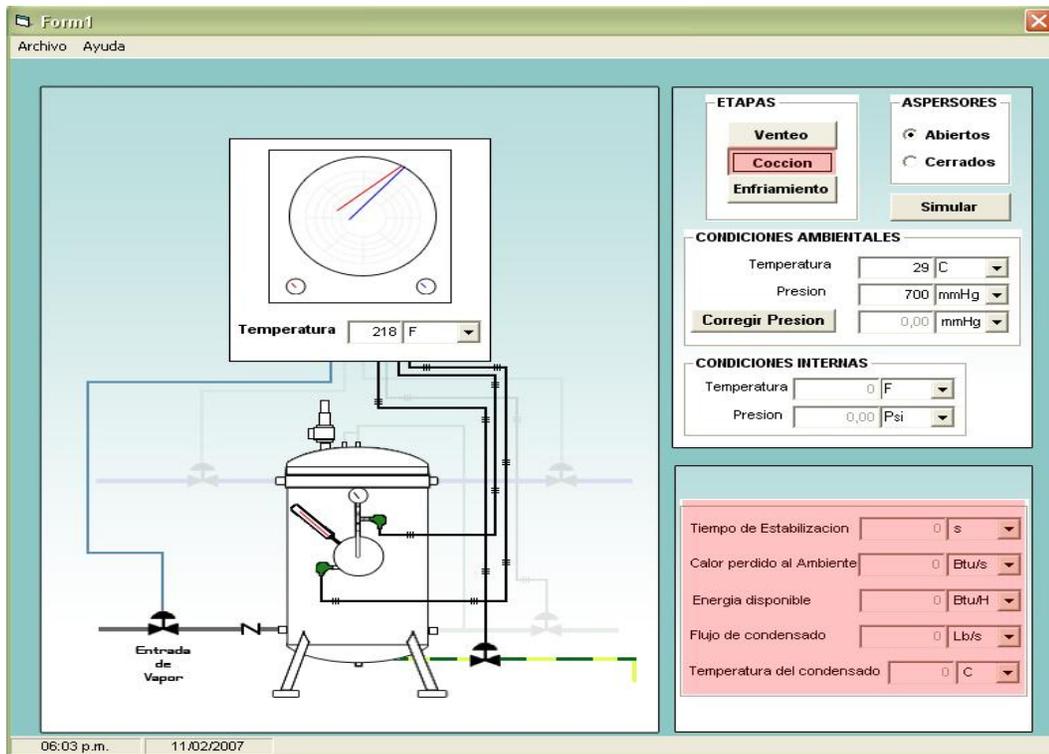


Figura 4.34 Salida de la etapa de cocción.

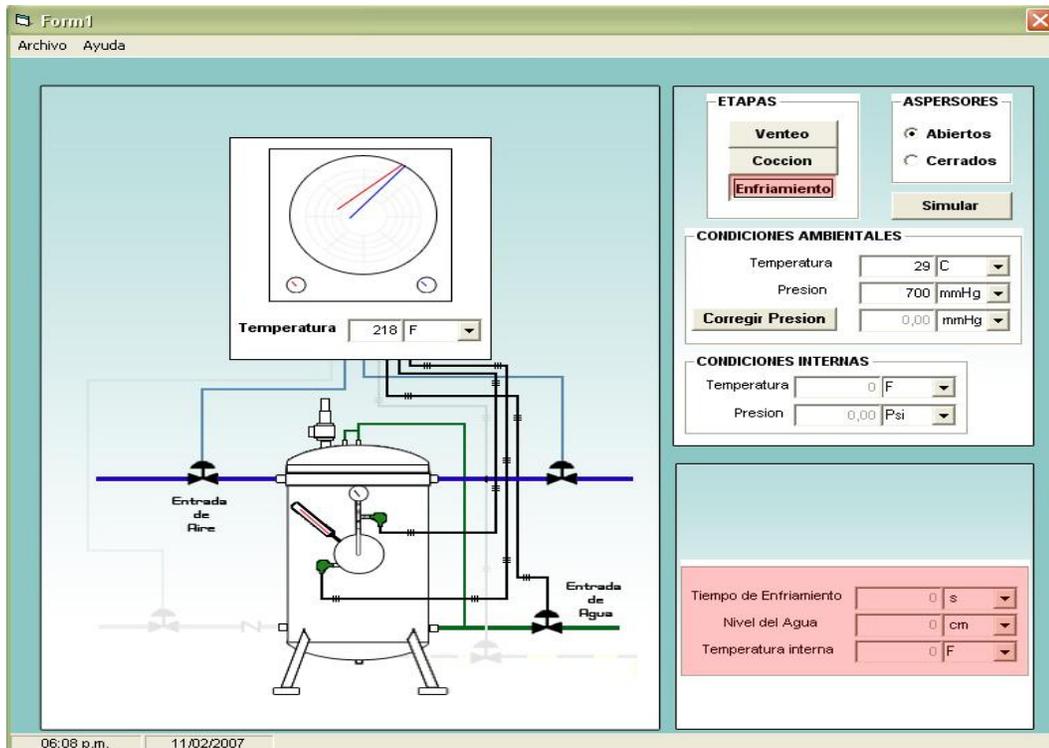


Figura 4.35 Salida de la etapa de enfriamiento.



4.5 VALIDACIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN.

Para la validación del software de simulación, se seleccionaron tres temperaturas de operación al azar (Ver Tabla 3.10). Los datos recolectados al operar el equipo en estas condiciones se presentan en las tablas C.22, C.23, C.24 y C.25.

Los datos obtenidos de estas corridas se introdujeron en el software del equipo y se sometieron a los modelos matemáticos teóricos con el fin de obtener el porcentaje de desviación relativo entre los valores experimentales.

Para aplicar los modelos matemáticos teóricos se tomaron las siguientes consideraciones:

- ✓ La apertura de los aspersores no modifica las condiciones de las etapas iniciales (venteo y cocción), por lo que se tomara el promedio de las variables tomadas experimentalmente que están involucradas en estas etapas.
- ✓ Para el cálculo de los calores se seguirá la ruta de cálculo descrita en el Capítulo III (Figura 3.6). A fin de utilizar la regresión planteada en la Figura 4.6, los cálculos se apoyaran en una hoja de cálculo de Excel para hallar el valor de arrojado por esta ecuación y de alguna manera validar dicha regresión.

Una vez obtenidos los valores de las variables (el obtenido experimentalmente y el simulado) se procede a determinar la desviación de estos valores para las condiciones seleccionadas, cuyo cálculo viene dada por la ecuación 3.34. Los resultados obtenidos se reportan en las Tablas 4.10 a 4.19.

Por otra parte se puede observar que la correlación más estable es la de Temperatura interna, debido a que es la que presentó menor desviación en el orden de 0,6 %.

Asimismo, la variable con mayor desviación es el tiempo de enfriamiento, se observa además una fluctuación de acuerdo a la variables aspersores, es decir, cuando están cerrados los aspersores la desviación aumenta y cuando están



abiertos disminuye lo cual esta relacionado con el ajuste obtenido (Ver Figuras 4.8 y 4.9), donde se puede verificar que la diferencia entre la curva y los datos es menor al inicio para aspersores cerrados; sucede lo contrario para la curva de los aspersores abiertos, donde la diferencia disminuye con los puntos finales.

En cuanto al calor perdido al ambiente por el autoclave, la desviación estuvo en el orden del 11% al usar las ecuaciones obtenidas de los balances de masa y energía, lo que se considera aceptable a pesar de las consideraciones hechas al calcular esta variable. Sin embargo, se obtuvieron desviaciones relativas más pequeñas al usar la regresión propuesta en la Figura 4.6, lo que indica el poder de predicción de esta regresión.

Como aporte adicional, se realizó una corrida colocando una carga de verdura (yuca), en el equipo a fin de validar el software. Para esta corrida se esperaba que el flujo de condensado fuese mayor, debido a que el equipo tendría que calentar su estructura y a la carga por lo que el consumo de vapor será mayor en comparación al consumo que se obtendría operando el equipo vacío.

Sin embargo, los valores obtenidos por el simulador para la etapa de cocción son muy cercanas a las obtenidas experimentalmente, hecho que se puede corroborar al observar las desviaciones obtenidas (ver Tabla 4.19). Sin embargo, para la etapa de enfriamiento no fue posible simular debido a la temperatura de operación esta muy por debajo del límite mínimo permitido en esta etapa (218 °F). En este sentido, se espera que el tiempo de enfriamiento, la temperatura de enfriamiento y el nivel de agua estén por debajo de estos mismos valores obtenidos para la temperatura menor trabajada.



Tabla 4.10

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a $(224 \pm 1) ^\circ\text{F}$

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Temperatura interna ($T_{int} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	238,4	239,95	0,6
Tiempo de estabilización ($t_{est} \pm 0,01$)s	302,00	312,97	3,6
Flujo de condensado ($m_l \pm 0,000008$) lb/s	0,004653	0,005160	10,9
Temperatura de salida de condensado ($T_{cond} \pm 1$) $^\circ\text{F}$	178	181	1,3
Calor perdido al ambiente en el autoclave ($Q_{Auto} \pm$) BTU/s	4,707	5,2083	10,7
		4,671*	1
Calor aprovechable en el autoclave ($Q_{Apr} \pm$) BTU/s	4,71	5,21	10,7
		4,68*	0,6

* Valor hallado por la regresión propuesta en la Figura 4.6

Tabla 4.11

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a $(224 \pm 1) ^\circ\text{F}$ con aspersores cerrados

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Tiempo de enfriamiento ($t_{enf} \pm 0,01$)s	399,25	406,18	1,7
Temperatura de enfriamiento ($T_{enf} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	156,2	151,7	2,9
Nivel de agua de enfriamiento ($N \pm 0,05$) cm	18,50	17,55	5,1

Tabla 4.12

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a $(224 \pm 1) ^\circ\text{F}$ con aspersores abiertos

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Tiempo de enfriamiento ($t_{enf} \pm 0,01$)s	212,44	180,84	14,8
Temperatura de enfriamiento ($T_{enf} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	159,5	171,5	7,6
Nivel de agua de enfriamiento ($N \pm 0,05$) cm	13,20	12,26	7,1



Tabla 4.13

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a $(236 \pm 1) ^\circ\text{F}$

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Temperatura interna ($T_{int} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	249,3	250	0,5
Tiempo de estabilización ($test \pm 0,01$)s	317,00	326,22	2,9
Flujo de condensado ($ml \pm 0,000008$) lb/s	0,005232	0,005640	7,8
Temperatura de salida de condensado ($T_{cond} \pm 1$) $^\circ\text{F}$	182	187,7	3,1
Calor perdido al ambiente en el autoclave ($Q_{Auto} \pm 0,009$) BTU/s	5,295	5,6729	7,1
		5,108*	4
Calor aprovechable en el autoclave ($Q_{Apr} \pm 0,01$) BTU/s	5,29	5,67	7,1
		5,12*	3,0

* Valor hallado por la regresión propuesta en la Figura 4.6

Tabla 4.14

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a $(236 \pm 1) ^\circ\text{F}$ con aspersores cerrados

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Tiempo de enfriamiento ($tenf \pm 0,01$)s	824,81	709,53	13,9
Temperatura de enfriamiento ($T_{enf} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	154,9	153,4	1,4
Nivel de agua de enfriamiento ($N \pm 0,05$) cm	27,70	23,70	14,4

Tabla 4.15

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a $(236 \pm 1) ^\circ\text{F}$ con aspersores abiertos

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Tiempo de enfriamiento ($tenf \pm 0,01$)s	301,05	265,62	11,8
Temperatura de enfriamiento ($T_{enf} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	171,2	172,5	0,7
Nivel de agua de enfriamiento ($N \pm 0,05$) cm	14,70	14,26	3,0



Tabla 4.16

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a $(254 \pm 1) ^\circ\text{F}$

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Temperatura interna ($T_{int} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	265,6	266,18	0,2
Tiempo de estabilización ($t_{est} \pm 0,01$)s	333,5	371,79	11,5
Flujo de condensado ($m \pm 0,000008$) lb/s	0,005745	0,006360	10,7
Temperatura de salida de condensado ($T_{cond} \pm 1$) $^\circ\text{F}$	192	198,23	3,5
Calor perdido al ambiente en el autoclave ($Q_{Auto\pm}$) BTU/s	5,796	6,3666	9,8
		5,763*	1,0
Calor aprovechable en el autoclave ($Q_{Apr\pm}$) BTU/s	5,80	6,37	9,9
		5,78*	0,4

* Valor hallado por la regresión propuesta en la Figura 4.6.

Tabla 4.17

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a $(254 \pm 1) ^\circ\text{F}$ con aspersores cerrados

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Tiempo de enfriamiento ($t_{enf} \pm 0,01$)s	1219,2	1357,41	11,3
Temperatura de enfriamiento ($T_{enf} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	167,4	165,0	1,4
Nivel de agua de enfriamiento ($N \pm 0,05$) cm	20,10	24,08	16,3

Tabla 4.18

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de enfriamiento operando a $(254 \pm 1) ^\circ\text{F}$ con aspersores abiertos

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Tiempo de enfriamiento ($t_{enf} \pm 0,01$)s	936,10	886,42	5,3
Temperatura de enfriamiento ($T_{enf} \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	160,8	186,5	16,0
Nivel de agua de enfriamiento ($N \pm 0,05$) cm	22,80	23,57	3,4



Tabla 4.19

Desviación de los resultados obtenidos experimentalmente y por el simulador para la etapa de cocción operando a (204 ± 1) °F con carga

	Experimental	Simulado	% Desviación (Desv $\pm 0,1$) adim
Temperatura interna ($T_{int} \pm 0,1$) °F	221,2	222,47	0,6
Tiempo de estabilización ($test \pm 0,01$)s	325,9	321,35	0,7
Flujo de condensado ($ml \pm 0,000008$) lb/s	0,004542	0,004360	4,0
Temperatura de salida de condensado ($T_{cond} \pm 1$) °F	162	169,00	4,3
Calor perdido al ambiente en el autoclave ($Q_{Auto\pm}$) BTU/s	4,644	4,4265	4,6
		3,943*	15
Calor aprovechable en el autoclave ($Q_{Apr\pm}$) BTU/s	4,64	4,43	4,6
		3,95*	15

* Valor hallado por la regresión propuesta en la Figura 4.6.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones y los aportes más relevantes alcanzados durante el desarrollo de esta investigación. Así mismo, se presentan las recomendaciones pertinentes.

CONCLUSIONES

En cuanto al diagnóstico del funcionamiento del equipo:

1. Se diseñó una termocupla tipo K con conector macho y hembra para indicador de temperatura digital, a fin de sustituir el termómetro de diseño del equipo.

En cuanto a la caracterización del equipo y obtención de modelos matemáticos:

2. El factor apertura de aspersores solo afecta las variables de la etapa de enfriamiento.
3. La temperatura de operación es la variable que afecta en mayor proporción al tiempo de enfriamiento.
4. El tiempo de venteo, variable de la primera etapa de operación, se mantuvo en un valor promedio de $(92,50 \pm 0,01)$ s
5. Las variables de la etapa de cocción presentaron curvas de ajustes lineal, con coeficientes de correlación en un rango de 0,991 y 0,999.
6. En la etapa de enfriamiento, la variable que más significancia presentó sobre el tiempo de enfriamiento es la Temperatura de operación.
7. El mejor ajuste hallado para la temperatura interna para cada temperatura de operación es un polinomio de grado dos, mediante el método de mínimos cuadrados.
8. Para la variable nivel de agua, la curva de ajuste a los datos se obtuvo por línea de tendencia, siendo el polinomio de grado dos el de menor oscilación polinomial.



9. El tiempo de enfriamiento y el nivel de agua son mayores cuando los aspersores se encuentran cerrados que cuando están abiertos a una misma temperatura de operación.
10. La pérdida de calor al ambiente en el autoclave aumenta a medida que la temperatura de operación aumenta.

En cuanto a la selección del software de programación:

11. El software Visual Basic es la opción seleccionada, según la matriz evaluada de los criterios relevantes integrados para la programación del simulador. Dicho software es de interfaz gráfica sencilla, presenta compatibilidad con el ambiente Windows.

En cuanto al modulo de programación simulación:

12. La programación del software fue realizada utilizando programación tradicional junto con programación orientada al desarrollo de la interfaz gráfica del usuario.
13. El programa de simulación es capaz de predecir el comportamiento del autoclave en operación semiautomática.

En cuanto la validación del programa de simulación:

14. Los resultados arrojados por el software presentaron mayor desviación para el tiempo de enfriamiento, con desviación promedio de 10%.
15. El resultado con menor desviación fue para la Temperatura interna, presentando una máxima desviación de 0,6 %.
16. El software no es capaz de predecir el comportamiento de la etapa de enfriamiento para temperaturas de operación menores a 218 °F y mayores a 258°F.



RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se propone:

1. Hacer una revisión del panel de control del compresor recíprocante a fin de evitar la interrupción de la operación del equipo por falta de presión de aire
2. Adquirir un anillo de neopreno a fin de cambiar el existente, y evitar fugas de presión por el borde de la tapa.
3. En la recolección de condensado se recomienda recortar la tubería de salida de la trampa de vapor, a fin de evitar pérdidas de calor en ese tramo.

En cuanto al uso de software se propone:

4. Introducir condiciones ambientales de acuerdo a los parámetros del Municipio Naguanagua, Estado Carabobo, debido a que la tabla de corrección de presión por latitud está limitada.
5. En cuanto a las condiciones de operación a introducir en el software se recomienda estén en el rango de trabajo, (218 – 258) °F; debido a que las correlaciones están analizadas a partir de los datos tomados para ese rango.



9. Enciclopedia Wikipedia en Línea (2006). [Página Web en línea]. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>. [Consulta: 2006, Abril 23].
10. Enciclopedia Wikipedia en Línea (2006). [Página Web en línea]. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Portada>. [Consulta: 2006, Septiembre 24].
11. GARCÍA, H., GIL, L., RODRIGUEZ, P. y TOVAR, M. (2005). Estudio analítico del comportamiento de las variables experimentales del equipo de intercambio térmico (autoclave) del laboratorio de ingeniería química. Trabajo no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia.
12. GUTIERREZ, H y DE LA VARA, R. (2003). Análisis y Diseño de Experimentos. (1a. edición). México: Mac Graw Hill / Interamericana Editores S.A.
13. HERNÁNDEZ, R. (2002). Apuntes de métodos numéricos aplicados a la ingeniería química. Venezuela: Publicaciones de la Universidad de Carabobo.
14. HALVORSON, M. (1999). Aprenda VISUAL BASIC ya 6.0. (1ª edición). España: Mac Graw Hill Interamericana.
15. HIMMELBLAU, D. (1997). Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química. (6ª edición). México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A
16. INCROPERA, F. y DE WITT, D. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor. (4ª. Edición). México. Editorial Prentice Hall.
17. JONES, J. y DUGAN, R. (1997). Ingeniería Termodinámica. (1a. edición). México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A
18. KUELHL, R. (2000). Diseño de Experimentos: Principios Estadísticos de Diseño y Análisis de Investigación. (2a. edición). México: Thomson Learning.
19. LEDANOIS, J., LÓPEZ DE R, A., PIMENTEL, J. y PIRONTI, F. (2000). Métodos Numéricos Aplicados a Ingeniería. (1a. edición). Colombia: Mac Graw Hill Interamericana.
20. MONTGOMERY, D. (2002). Diseño y Análisis de Experimentos. (2a. edición). México: Limusa S.A / Grupo Noriega Editores.



21. RAMOS, Ronald y VILLAMIZAR, Telly. (2004). Rediseño e implementación del sistema de control automático del Autoclave del Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Carabobo. Trabajo de grado sin publicación. Universidad de Carabobo. Carabobo. Venezuela.
22. TAMAYO, M. (1988). Diccionario de la Investigación Científica. (2a. edición). México: Editorial LIMUSA, S.A. de C.V.
23. TARIFA, E. (1997). Simulación de sistemas químicos. [Libro en línea]. Universidad Nacional de Jujuy Facultad de Ingeniería. Disponible: <http://www.modeloingenieria.edu.ar/>. [Consulta: 2006, Septiembre 02]
24. UVIEDA, J y G. JOANNA. (2006). Desarrollo de un modulo de calculo para la simulación del banco de intercambiadores de calor del laboratorio de Ingeniería Química. Trabajo de grado sin publicación. Universidad de Carabobo. Carabobo.- Venezuela.
25. WEISSTEIN, E. (2007). Thiele's Interpolation Formula. [Página en línea]: *MathWorld*-A Wolfram Web Resource. Disponible: <http://mathworld.wolfram.com/ThielesInterpolationFormula.html>. [Consulta: 2007, Enero 6].



APÉNDICE A: TABLAS BIBLIOGRÁFICAS

A continuación se presentan las tablas bibliográficas utilizadas como apoyo en algunos de los cálculos llevados a cabo para cumplir con los objetivos planteados.

Tabla A.1
Propiedades del vapor de agua

Temperatura °F	Presión psia	Volumen específico ft ³ /lb		Densidad lb/ft ³	Entalpía BTU/lb		
		Líquido saturado	Vapor saturado	Líquido saturado	Líquido saturado	Vaporización	Vapor saturado
70	0,3628	0,01605	868,900	62,31	38,05	1053,45	1091,50
72	0,3883	0,01606	814,900	62,27	40,04	1052,26	1092,30
74	0,4153	0,01606	764,700	62,27	42,04	1051,16	1093,20
76	0,4440	0,01607	718,000	62,23	44,03	1050,07	1094,10
78	0,4744	0,01607	674,400	62,23	46,03	1048,87	1094,90
80	0,5067	0,01607	633,700	62,23	48,02	1047,78	1095,80
82	0,5409	0,01608	595,800	62,19	50,02	1046,58	1096,60
84	0,5772	0,01608	560,400	62,19	52,01	1045,49	1097,50
86	0,6153	0,01609	527,600	62,15	54,01	1044,39	1098,40
88	0,6555	0,01609	497,000	62,15	56,00	1043,20	1099,20
90	0,6980	0,01610	468,400	62,11	58,00	1042,10	1100,10
92	0,7429	0,01611	441,700	62,07	59,99	1041,11	1101,10
94	0,7902	0,01611	416,700	62,07	61,98	1039,92	1101,90
96	0,8403	0,01612	393,200	62,03	63,98	1038,72	1102,70
98	0,8930	0,01613	371,300	62,00	65,98	1037,52	1103,50
100	0,9487	0,01613	350,800	62,00	67,97	1036,43	1104,40
102	1,0072	0,01614	331,500	61,96	69,96	1035,24	1105,20
104	1,0689	0,01614	313,500	61,96	71,96	1034,14	1106,10
106	1,1338	0,01615	296,500	61,92	73,95	1033,05	1107,00
108	1,2020	0,01616	280,700	61,88	75,94	1031,96	1107,90
110	1,2740	0,01617	265,700	61,84	77,94	1030,86	1108,80
112	1,3500	0,01617	251,600	61,84	79,93	1029,67	1109,60
114	1,4290	0,01618	238,500	61,80	81,93	1028,57	1110,50
116	1,5120	0,01619	226,200	61,77	83,92	1027,48	1111,40
118	1,6000	0,01620	214,500	61,73	85,92	1026,38	1112,30
120	1,6920	0,01620	203,450	61,73	97,91	1015,29	1113,20
122	1,7880	0,01621	193,160	61,69	89,91	1024,09	1114,00
124	1,8890	0,01622	183,440	61,65	91,90	1023,00	1114,90
126	1,9950	0,01623	174,260	61,61	93,90	1021,80	1115,70
128	2,1050	0,01624	165,700	61,58	95,90	1020,70	1116,60
130	2,2210	0,01625	157,550	61,54	97,89	1019,51	1117,40
132	2,3430	0,01626	149,830	61,50	99,89	1018,31	1118,20
134	2,4700	0,01626	142,590	61,50	101,89	1017,21	1119,10
136	2,6030	0,01627	135,730	61,46	103,88	1016,02	1119,90



Tabla A.1
Propiedades del vapor de agua (continuación)

Temperatura °F	Presión psia	Volumen específico ft ³ /lb		Densidad lb/ft ³	Entalpía BTU/lb		
		Líquido saturado	Vapor saturado	Líquido saturado	Líquido saturado	Vaporización	Vapor saturado
138	2,7420	0,01628	129,260	61,43	105,88	1014,92	1120,80
140	2,8870	0,01629	123,160	61,39	107,88	1013,72	1121,60
142	3,0390	0,01630	117,370	61,35	109,88	1012,52	1122,40
144	3,1980	0,01631	111,900	61,31	111,88	1011,32	1123,20
146	3,3630	0,01632	106,720	61,27	113,88	1010,22	1124,10
148	3,5360	0,01633	101,840	61,24	115,87	1009,03	1124,90
150	3,7160	0,01634	97,200	61,20	117,87	1007,83	1125,70
152	3,9040	0,01635	92,810	61,16	119,87	1006,73	1126,60
154	4,1000	0,01636	88,620	61,12	121,87	1005,53	1127,40
156	4,3050	0,01637	84,640	61,09	123,87	1004,43	1128,30
158	4,5180	0,01638	80,920	61,05	125,87	1003,23	1129,10
160	4,7390	0,01639	77,390	61,01	127,87	1002,03	1129,90
162	4,9700	0,01640	74,020	60,98	129,88	1000,82	1130,70
164	5,2100	0,01642	70,810	60,90	131,88	999,72	1131,60
166	5,4600	0,01643	67,780	60,86	133,88	998,52	1132,40
168	5,7200	0,01644	64,890	60,83	135,88	997,32	1133,20
170	5,9900	0,01645	62,140	60,79	137,88	996,12	1134,00
172	6,2720	0,01646	59,520	60,75	139,89	995,01	1134,90
174	6,5650	0,01647	57,030	60,72	141,89	993,81	1135,70
176	6,8690	0,01648	54,660	60,68	143,90	992,60	1136,50
178	7,1840	0,01650	52,410	60,61	145,90	991,40	1137,30
180	7,5100	0,01651	50,280	60,57	147,91	990,19	1138,10
182	7,8490	0,01652	48,240	60,53	149,92	988,98	1138,90
184	8,2010	0,01653	46,300	60,50	151,92	987,78	1139,70
186	8,5660	0,01654	44,450	60,46	153,93	986,57	1140,50
188	8,9440	0,01656	42,690	60,39	155,94	985,36	1141,30
190	9,3360	0,01657	41,010	60,35	157,95	984,15	1142,10
192	9,7440	0,01658	39,400	60,31	159,95	982,85	1142,80
194	10,1680	0,01659	37,860	60,28	161,96	981,54	1143,50
196	10,6050	0,01661	36,400	60,20	163,97	980,33	1144,30
198	11,0570	0,01662	35,000	60,17	165,98	979,02	1145,00
200	11,5250	0,01663	33,670	60,13	167,99	977,81	1145,80
202	12,0100	0,01665	32,390	60,06	170,01	976,59	1146,60
204	12,5120	0,01666	31,170	60,02	172,02	975,28	1147,30
206	13,0310	0,01667	30,010	59,99	174,03	974,07	1148,10
208	13,5680	0,01669	28,900	59,92	176,04	972,76	1148,80
210	14,1230	0,01670	27,830	59,88	178,06	971,54	1149,60
212	14,6960	0,01672	26,830	59,81	180,07	970,33	1150,40
215	15,5910	0,01674	25,370	59,74	186,10	965,30	1151,40
220	17,1880	0,01677	23,160	59,63	188,14	965,16	1153,30



Tabla A.1
Propiedades del vapor de agua (continuación)

Temperatura °F	Presión psia	Volumen específico ft ³ /lb		Densidad lb/ft ³	Entalpía BTU/lb		
		Líquido saturado	Vapor saturado	Líquido saturado	Líquido saturado	Vaporización	Vapor saturado
225	18,9150	0,01681	21,170	59,49	193,18	961,92	1155,10
230	20,7800	0,01684	19,388	59,38	198,22	958,68	1156,90
235	22,8000	0,01688	17,778	59,24	203,28	955,32	1158,60
240	24,9700	0,01692	16,324	59,10	208,34	952,06	1160,40
245	27,3100	0,01696	15,027	58,96	213,41	948,69	1162,10
250	29,8200	0,01700	13,841	58,82	218,48	945,32	1163,80
255	32,5300	0,01704	12,752	58,69	223,56	942,04	1165,60
260	35,4300	0,01708	11,771	58,55	228,84	938,46	1167,30
265	38,5400	0,01713	10,878	58,38	233,74	935,26	1169,00
270	41,8500	0,01717	10,070	58,24	238,84	931,76	1170,60
275	45,4000	0,01721	9,330	58,11	243,94	928,16	1172,10
280	49,2000	0,01726	8,651	57,94	249,06	924,64	1173,70
285	53,2500	0,01731	8,032	57,77	254,18	921,02	1175,20
290	57,5500	0,01735	7,465	57,64	259,31	917,39	1176,70
295	62,1300	0,01740	6,948	57,47	264,45	913,75	1178,20
300	67,0100	0,01745	6,471	57,31	269,60	910,10	1179,70

Fuente: JONES, 1997.

TABLA A.2
PROPIEDADES DEL AIRE

T (° F)	ρ (lb/ft ³)	C _p (BTU/lb·°F)	$\mu \times 10^5$ (lb/ft·s)	$\nu \times 10^3$ (ft ² ·s)	k (BTU/h·°F·ft)	α (ft ² /h)	Pr	$\beta \times 10^3$ (1/°F)	$g\beta\rho^2 / \mu^2$ (1/°F·ft ³)
0	0,0862	0,240	1,09	0,126	0,0132	0,639	0,721	2,18	4.39 *10 ⁶
30	0,0810	0,240	1,15	0,142	0,0139	0,714	0,716	2,04	3.28
60	0,0764	0,240	1,21	0,159	0,0146	0,798	0,711	1,92	2.48
80	0,0735	0,240	1,24	0,169	0,0152	0,855	0,708	1,85	2.09
100	0,0710	0,240	1,28	0,181	0,0156	0,919	0,703	1,79	1.76
150	0,0651	0,241	1,36	0,209	0,0167	1,060	0,698	1,64	1.22
200	0,0602	0,241	1,45	0,241	0,0179	1,240	0,694	1,52	0.840
250	0,0559	0,242	1,53	0,274	0,0191	1,420	0,690	1,41	0.607
300	0,0523	0,243	1,60	0,306	0,0230	1,600	0,686	1,32	0.454
400	0,0462	0,245	1,74	0,377	0,0225	2,000	0,681	1,16	0.264
500	0,0413	0,247	1,87	0,453	0,0246	2,410	0,680	1,04	0.163
600	0,0374	0,251	2,00	0,535	0,0270	2,880	0,680	0,944	79.4*10 ³
800	0,0315	0,257	2,24	0,711	0,0303	3,750	0,684	0,794	50.6
1000	0,0272	0,268	2,46	0,906	0,0337	4,720	0,689	0,685	27.0
1500	0,0203	0,270	2,92	1,440	0,0408	7,270	0,705	0,510	7.96

Fuente: Incropera, 1999.



Tabla A.3

Valores del factor de Fisher al 95% de probabilidad

STATISTICAL CHART 3

Variance ratio — 5 percent points for distribution of F

n_1 — degrees of freedom for numerator

n_2 — degrees of freedom for denominator

$n_2 \backslash n_1$	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	238.9	243.9	249.0	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.37	19.41	19.45	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.84	8.74	8.64	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.04	5.91	5.77	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.82	4.68	4.53	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.15	4.00	3.84	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.73	3.57	3.41	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.44	3.28	3.12	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.23	3.07	2.90	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.07	2.91	2.74	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	2.95	2.79	2.61	2.40
12	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.85	2.69	2.50	2.30
13	4.67	3.80	3.41	3.18	3.02	2.92	2.77	2.60	2.42	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.70	2.53	2.35	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.64	2.48	2.29	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.59	2.42	2.24	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.55	2.38	2.19	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.51	2.34	2.15	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.48	2.31	2.11	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.45	2.28	2.08	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.42	2.25	2.05	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.40	2.23	2.03	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.38	2.20	2.00	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.36	2.18	1.98	1.73
25	4.24	3.38	2.99	2.76	2.60	2.49	2.34	2.16	1.96	1.71
26	4.22	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.32	2.15	1.95	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.30	2.13	1.93	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.44	2.29	2.12	1.91	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.54	2.43	2.28	2.10	1.90	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.27	2.09	1.89	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.18	2.00	1.79	1.51
60	4.00	3.15	2.78	2.52	2.37	2.25	2.10	1.82	1.70	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.02	1.83	1.61	1.25
∞	3.84	2.99	2.60	2.37	2.21	2.09	1.94	1.75	1.52	1.00

Fuente: Montgomery, (2002)



Tabla A.4
Valores del factor de Fisher al 99% de probabilidad

STATISTICAL CHART 3 — *Concluded*
Variance ratio — 1 percent point for distribution of F
 n_1 — degrees of freedom for numerator
 n_2 — degrees of freedom for denominator

$n_2 \backslash n_1$	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	4052	4999	5402	5625	5764	5859	5981	6106	6234	6366
2	98.49	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.42	99.46	99.50
3	34.12	30.81	29.46	28.71	28.24	27.91	27.49	27.05	26.60	26.12
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.80	14.37	13.93	13.46
5	16.28	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.29	9.89	9.47	9.02
6	13.74	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.10	7.72	7.31	6.88
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.84	6.47	6.07	5.65
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.03	5.67	5.28	4.86
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.47	5.11	4.73	4.31
10	10.04	7.58	6.55	5.99	5.64	5.39	5.06	4.71	4.33	3.91
11	9.65	7.20	6.22	5.67	5.32	5.07	4.74	4.40	4.02	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.50	4.16	3.78	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.20	4.86	4.62	4.30	3.96	3.59	3.16
14	8.86	6.51	5.56	5.03	4.69	4.46	4.14	3.80	3.43	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.00	3.67	3.29	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	3.89	3.55	3.18	2.75
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.79	3.45	3.08	2.65
18	8.28	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.71	3.37	3.00	2.57
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.63	3.30	2.92	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.56	3.23	2.86	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.51	3.17	2.80	2.36
22	7.94	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.45	3.12	2.75	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.41	3.07	2.70	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.36	3.03	2.66	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.32	2.99	2.62	2.17
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.29	2.96	2.58	2.13
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.26	2.93	2.55	2.10
28	7.64	5.45	4.56	4.07	3.75	3.53	3.23	2.90	2.52	2.06
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.20	2.87	2.49	2.03
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.17	2.84	2.47	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	2.99	2.66	2.29	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.82	2.50	2.12	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.66	2.34	1.95	1.38
∞	6.64	4.60	3.78	3.32	3.02	2.80	2.51	2.18	1.79	1.00

Fuente: Montgomery, (2002)



TABLA A.5
CORRELACIÓN PARA ESTIMAR COEFICIENTE CONVECTIVO
EN CONVECCIÓN NATURAL

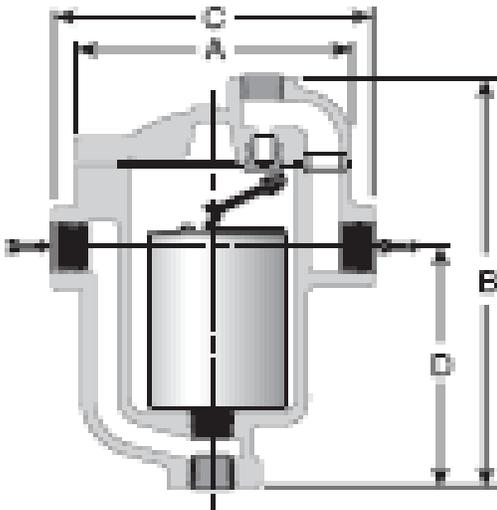
Tipo de superficie	Rango Ra	Sistema Internacional			Sistema Ingles		
		C	b	n	C	B	n
Planos o cilindros verticales	$10^4 - 10^9$	1,42	L	1/4	0,29	L	1/4
	$> 10^9$	0,95	–	1/3	0,19	–	1/3
Cilindro horizontal	$10^4 - 10^9$	1,32	D_o	1/4	0,27	D_o	1/4
	$> 10^9$	1,24	–	1/3	0,18	–	1/3
Plano horizontal con $q \uparrow$	$10^4 - 10^9$	1,32	L	1/4	0,27	L	1/4
	$> 10^9$	1,43	–	1/3	0,22	–	1/3
Plano con $q \uparrow$	-----	0,61	L^2	1/5	0,12	L	1/4

$$h_0 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right) = C \left(\frac{T_w - T_\infty}{b} \right)^n \qquad h_0 \left(\frac{BTU}{ft^2 \cdot F} \right) = C \left(\frac{T_w - T_\infty}{b} \right)^n$$

Fuente: Incropera, 1999.



TABLA A.6
ESPECIFICACIONES DE LA TRAMPA DE VAPOR SERIE 800 ARMSTRONG.



Modelo	800
Conexiones a Tubería (mm)	15,20
Tapon de prueba(mm)	6
«A» (Diámetro de Brida)(mm)	95,2
«B» (Altura) (mm)	138
«C» (Cara-a-Cara) (mm)	127
«D» (Base a Entrada) (mm)	70
Número de tornillos	6
Peso (kg)	2,3
Máxima presión de operación (bar)	10,5
Material	Hierro Fundido

Figura A.1 Trampa Serie 800 de Balde Invertido Fuente: Catálogo Nro. 108- CS Armstrong



APÉNDICE B. PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

A continuación se presentan los modelos matemáticos utilizados para determinar los parámetros característicos planteados en los diferentes objetivos.

B.1. Determinación de la Presión de Operación (Pop)

Haciendo uso de la ecuación (3.1) y los datos correspondientes de la tabla 3.2, se determina la presión de operación:

$$Pop = 5\text{psi} + 709,27\text{mmHg} * \frac{14,696\text{psi}}{760\text{mmHg}} = 18,715042\text{psia}$$

El error de esta variable se calcula por el método de propagación de errores:

$$\Delta Pop = \Delta Pm + \Delta Pamb$$

Sustituyendo:

$$\Delta Pop = 1 + 0,05 = 1,05$$

$$\Delta Pop \cong 1\text{psia}$$

Finalmente:

$$Pop = (19 \pm 1)\text{psia}$$

B.2. Determinación del flujo másico de condensado (mcond)

✓ **Cálculo del flujo másico de condensado individual.**

Utilizando los valores reportados en la tabla C.1, correspondientes a la temperatura de operación de 218 corrida 1 y sustituyéndolos en la ecuación 4.2, se obtiene:

$$m_{cond} = \frac{(0,3195 - 0,1471)\text{kg}}{89,20\text{s}} \cdot \frac{2,20462\text{lb}}{1\text{kg}} = 0,004261 \frac{\text{lb}}{\text{s}}$$



El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales según se muestra a continuación:

$$\Delta \dot{m}_{cond} = \left| \frac{\partial \dot{m}_{cond}}{\partial t} \right| \cdot \Delta t + \left| \frac{\partial \dot{m}_{cond}}{\partial mbll} \right| \cdot \Delta mbll + \left| \frac{\partial \dot{m}_{cond}}{\partial mbv} \right| \cdot \Delta mbv$$

$$\Delta \dot{m}_{cond} = \left| \frac{(mbll - mbv)FC1}{t^2} \right| \cdot \Delta t + \left| \frac{FC1}{t} \right| \cdot \Delta mbll + \left| \frac{FC1}{t} \right| \cdot \Delta mbv$$

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{m}_{cond} &= \left| \frac{(0,3195 - 0,1471)kg}{(89,20s)^2} \cdot \frac{2,20462lb}{kg} \right| \cdot 0,01s + \left| \frac{1}{89,20s} \cdot \frac{2,20462lb}{kg} \right| \cdot 0,0001kg... \\ &... + \left| \frac{1}{89,20s} \cdot \frac{2,20462lb}{kg} \right| \cdot 0,0001kg = 0,000009 \frac{lb}{s} \end{aligned}$$

Finalmente

$$\dot{m}_{cond} = (0,000445 \pm 0,000009) \frac{lb}{s}$$

✓ **Cálculo del flujo másico de condensado promedio**

Utilizando la ecuación 4.3 y los valores de flujo de condensado calculados correspondientes a las corridas de la temperatura de operación 218, se obtiene:

$$\begin{aligned} \overline{\dot{m}_{cond}} &= \left(\frac{0,004261 + 0,005748 + 0,005207 + 0,005326 + 0,004355 + 0,004579 + \dots}{18} \right. \\ &... \left. \frac{+ 0,004628 + 0,004265 + 0,004451 + 0,004588 + 0,004084 + 0,003671 + 0,004924 + \dots}{18} \right. \\ &... \left. \frac{0,003033 + 0,003811 + 0,004474 + 0,004590,004644}{18} \right) = 0,004478 \frac{lb}{s} \end{aligned}$$

El error de esta variable se calcula por el método de las derivadas parciales, derivando, se obtiene que:



$$\Delta \dot{m}_{cond} = \left(\frac{0,000006 + 0,000008 + 0,000008 + 0,000009 + 0,000008 + 0,000008 + \dots}{18} \right. \\ \left. \dots \frac{+ 0,000008 + 0,000007 + 0,000008 + 0,000008 + 0,000008 + 0,000007 + \dots}{18} \right. \\ \left. \dots \frac{+ 0,000008 + 0,000007 + 0,000007 + 0,000010 + 0,000010 + 0,000007}{18} \right) \frac{lb}{s} = 0,000008 \frac{lb}{s}$$

Finalmente,

$$\dot{m}_{cond} = (0,004478 \pm 0,000008) \frac{lb}{s}$$

B.3. Determinación del temperatura de salida de condensado (T_{cond})

Utilizando los valores reportados en la Tabla C.1, correspondientes a la temperatura de operación de 218 corrida 1 y sustituyéndolos en la ecuación 4.3, se obtiene:

$$T_{cond}(^{\circ}F) = 82,0 * 1,8 + 32 = 179,6$$

El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales según se muestra a continuación:

$$\Delta T_{cond}(^{\circ}F) = \left| \frac{\partial T_{cond}(^{\circ}F)}{\partial T_{cond}(^{\circ}C)} \right| \cdot \Delta T_{cond}(^{\circ}C)$$

$$\Delta T_{cond}(^{\circ}F) = |1,8| \cdot \Delta T_{cond}(^{\circ}C)$$

Sustituyendo:

$$\Delta T_{cond}(^{\circ}F) = |1,8| \cdot 0,5 = 0,9 \cong 1$$

Finalmente,

$$T_{cond} = (180 \pm 1)^{\circ}F$$



B.4. Determinación de Calores asociados al autoclave

Siguiendo la ruta de cálculo descrita en la figura 3.9.

✓ **Área Superficial de la trampa de vapor**

Tal como se explicó en el Capítulo III de esta investigación, la trampa fue dividida en cuatro zonas, calculándose el área que representa cada zona.

Zona 1 (Ver Figura 3.5), para la que se usa la ecuación 3.14, sustituyendo los valores tabulados en la Tabla C.2 se obtiene:

$$A_{z1} = \pi \cdot \left(69,5mm \cdot 69,1mm - \frac{(44,1mm)^2}{2} \right) - (30,4mm \cdot 30mm) = 11120,44mm^2$$

El error de esta variable se calcula por el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\Delta A_{z1} = |\pi \cdot h_1| \Delta D_1 + |\pi \cdot D_1| \Delta h_1 + |\pi \cdot D_2| \Delta D_2 + |A| \Delta L + |L| \Delta A$$

Sustituyendo los valores respectivos

$$\begin{aligned} \Delta A_{z1} &= |\pi \cdot 69,10mm| \cdot (0,01) + |\pi \cdot 69,50mm| \cdot (0,01) + |\pi \cdot 44,10mm| \cdot (0,01) + \dots \\ &\dots + |30,00mm| \cdot (0,01) + |30,40| \cdot (0,01) = 4,34mm^2 \approx 4mm^2 \end{aligned}$$

Finalmente:

$$A_{z1} = (11120 \pm 4)mm^2$$

Zona 2 (Ver Figura 3.6), para la que se usa la ecuación 3.19, sustituyendo los valores tabulados en la Tabla C.2 se obtiene:

$$A_{z2} = \pi \cdot \left(95,00mm \cdot 18,40mm + \left(\frac{95,0mm}{2} \right)^2 + \left(\frac{95,00mm - 69,50mm}{2} \right)^2 \right)$$

$$A_{z2} = 13090,43mm^2$$



El error de esta variable se calcula por el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\Delta A_{z2} = \left| \pi \cdot D_3 \right| \Delta h_3 + \left| \pi \cdot \left(h_3 + \frac{D_3}{2} + \frac{1}{2}(-D_3 + D_1) \right) \right| \Delta D_3 + \left| \frac{1}{2} \cdot (-D_3 + D_1) \right| \Delta D_1$$

Sustituyendo los valores respectivos, se obtiene:

$$A_{z2} = (13090 \pm 6) mm^2$$

Zona 3 (Ver Figura 3.7), para la que se usa la ecuación 3.24, sustituyendo los valores tabulados en la Tabla C.2 se obtiene:

$$A_{z3} = \pi \cdot \left(\frac{D_1^2}{4} - \frac{D_4^2}{4} \right) - L \cdot A$$

$$A_{z3} = 2315,56 mm^2$$

El error de esta variable se calcula por el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\Delta A_{z3} = \left| \frac{\pi \cdot D_1}{2} \right| \Delta D_1 + \left| \frac{\pi \cdot D_4}{2} \right| \cdot \Delta D_4 + |A| \cdot \Delta L + |L| \cdot \Delta A$$

Sustituyendo los valores respectivos se obtiene:

$$A_{z3} = (2316 \pm 2) mm^2$$

Zona 4 (Ver Figura 3.8), para la que se usa la ecuación 3.29, sustituyendo los valores tabulados en la Tabla C.2 se obtiene:

$$A_{z4} = \pi \cdot (2 \cdot 44,10 mm \cdot 35,10 mm + 35,00 mm \cdot 27,00 mm) + \dots$$

$$\dots + (2 \cdot 16,40 mm + 30,00 mm) \cdot (46,00 mm + 17,20 mm) = 16663,570 mm^2$$

El error de esta variable se calcula por el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión. Sustituyendo los valores respectivos se obtiene:



$$\begin{aligned} \Delta A_{z4} &= |2 \cdot \pi \cdot D_2| \Delta h_2 + |2 \cdot \pi \cdot h_2| \Delta D_2 + |\pi \cdot D_4| \cdot \Delta h_4 + |\pi \cdot h_4| \cdot \Delta D_4 + \dots \\ &\dots + |2(L_1 + L_2)| \cdot \Delta A + |L_1 + L_2| \cdot \Delta A_n + |2A + A_n| \cdot \Delta L_1 + |2A + A_n| \cdot \Delta L_2 \\ \Delta A_{z4} &= 9,986 \text{ mm}^2 \cong 10 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Finalmente:

$$A_{z4} = (16663 \pm 10) \text{ mm}^2$$

Finalmente, el área superficial de la trampa de vapor se obtiene sumando las áreas de las cuatros zonas definidas:

$$\begin{aligned} A_{STram} &= (A_{z1} + A_{z1} + A_{z1} + A_{z1}) * \frac{ft^2}{mm^2} \\ A_{STram} &= (11120 + 13090 + 2316 + 16664) \cdot \frac{0,0001ft^2}{1mm^2} \\ A_{STram} &= 43190 \text{ mm}^2 \cdot \frac{0,0001ft^2}{1mm^2} = 0,4319ft^2 \end{aligned}$$

El error de esta variable se calcula por el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión. Sustituyendo los valores respectivos se obtiene:

$$\begin{aligned} \Delta A_{STram} &= (\Delta A_{z1} + \Delta A_{z1} + \Delta A_{z1} + \Delta A_{z1}) * \frac{ft^2}{mm^2} \\ A_{STram} &= (4 + 2 + 6 + 10) \cdot \frac{0,0001ft^2}{1mm^2} \\ A_{STram} &= 0,0002ft^2 \end{aligned}$$

Finalmente el área superficial de la trampa es:

$$A_{STram} = (0,4319 \pm 0,0002)ft^2$$



✓ **Temperatura promedio:**

Para hallar este por cada temperatura de operación se convirtió a unidades inglesas la temperatura ambiente usando la ecuación 4, sustituyendo los valores tabulados en las Tabla C.3 correspondientes a la temperatura de operación 230 corrida 2, queda lo siguiente:

$$T_{\infty_{230}} = 29,0 * \frac{1}{8} + 32 = 84,21^{\circ} F$$

El error asociado a esta variable es igual, al calculado para la temperatura de condensado. Finalmente, se obtiene:

$$T_{\infty_{230}} = (84 \pm 1)^{\circ} F$$

Utilizando los valores reportados en la tabla C.1, correspondientes a la corrida 1 para una temperatura de operación de 230 °F, sustituyéndolos en la ecuación 3.34 se obtiene:

$$T_p = \frac{195,00^{\circ} F + 84^{\circ} F}{2} = 139,6^{\circ} F$$

El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales, y se obtiene:

$$\Delta T_p = \left| \frac{\partial T_p}{\partial T_w} \right| \cdot \Delta T_w + \left| \frac{\partial T_p}{\partial T_{\infty}} \right| \cdot \Delta T_{\infty} = 1^{\circ} F$$

Finalmente, se obtiene:

$$T_p = (140 \pm 1)^{\circ} F$$



✓ **Coefficiente convectivo:**

Para hallar esta variable es necesario encontrar el valor del número de Rayleigh Ra (ecuación 3.31), es un número adimensional producto de los números Grashof y Prandtl, tabulados en la tabla A.2, y se evalúan a la temperatura promedio entre la temperatura de pared de la trampa y la ambiente, para cada corrida a las diversas temperaturas de operación.

Una vez hallado el número de Ra, se busca en la tabla A.5 los valores de las constante C, b y n según el rango del Ra y la geometría del objeto. En el caso de esta investigación, todos los valores estuvieron en el rango $10^4 < Ra < 10^9$, asumiendo que la trampa es un cilindro horizontal se obtiene que:

$$C = 0,29$$

b = diametro de la trampa, C valor reportado en la Tabla A.6

$$n = \frac{1}{4}$$

Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente y los correspondientes a la corrida 2 de la temperatura 230 en la ecuación 3.30, se obtiene:

$$h_o = 0,29 \cdot \left(\frac{(195,0 - 84)^\circ F}{0,416662} \right)^{0,250} = 1,1763 \text{ BTU/h pie}^2 \text{ }^\circ F$$

El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales, y se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta h_o = \left| \frac{C \cdot n}{b} \cdot \left(\frac{T_w - T_{amb}}{b} \right)^{n-1} \right| \cdot \Delta T_w + \left| - \frac{C \cdot n}{b} \cdot \left(\frac{T_w - T_{amb}}{b} \right)^{n-1} \right| \cdot \Delta T_{amb}$$

Sustituyendo los valores correspondientes se obtiene:

$$\Delta h_o = 0,011181434 \approx 0,01 \text{ BTU/hft}^2 \text{ }^\circ F$$

Para finalmente obtener:



$$h_o = (1,18 \pm 0,01) \text{BTU/hft}^2 \text{ } ^\circ F$$

✓ **Calor perdido al ambiente en la trampa de vapor**

Haciendo uso de la ecuación (3.9) y los datos correspondientes a la corrida 2 para la temperatura de operación 230 °F, se determina el calor perdido al ambiente en la trampa:

$$Q_{trampa} = 0,4319 \text{ft}^2 \cdot 1,18 \frac{\text{BTU}}{\text{hft}^2 \text{ } ^\circ F} \cdot (195,00 - 84) ^\circ F + 1 \cdot 1,174 * 10^{-9} \frac{\text{BTU}}{\text{hft}^2 \text{ } ^\circ F^4} \cdot 0,4319 \text{ft}^2 \cdot \dots$$

$$\dots \cdot (199,00^4 - 84^4) ^\circ F^4 = 58,3866 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 0,016219 \frac{\text{BTU}}{\text{s}}$$

El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\Delta q_{Trampa} = \left| h_o (T_w - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \right| \Delta A_{sTram} + \left| (T_w - T_\infty) A_{sTram} \right| \Delta h_o + \dots$$

$$\dots + \left| A_{sTram} h_o + 4 A_{sTram} \varepsilon \sigma T_w^3 \right| \Delta T_w + \left| - A_{sTram} h_o - 4 A_{sTram} \varepsilon \sigma T_\infty^3 \right| \Delta T_\infty$$

Sustituyendo los valores correspondientes, se obtiene:

$$\Delta q_{Trampa} = 0,8537 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \cdot \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 0,0002371 \frac{\text{BTU}}{\text{s}} \approx 0,0002 \frac{\text{BTU}}{\text{s}}$$

Finalmente se obtiene:

$$Q_{trampa} = (0,0162 \pm 0,0002) \frac{\text{BTU}}{\text{s}}$$

✓ **Flujo Másico Total**

Esta variable se obtiene luego de resolver un sistema de ecuaciones conformado por las ecuaciones 3.7 y 3.8 mediante el método de sustitución. Es decir, de la ecuación 3.7 se despeja una de las variables (ml o mv) y se sustituye en la ecuación 3.8, la variable despejada. De este sistema se obtiene que:



$$m_T = \frac{q_{trampa} + ml \cdot (Hf|_{T_{cond}} - Hg|_{Pamb})}{(Hf|_{Pop} - Hg|_{Pamb})}$$

Sustituyendo valores correspondientes a la corrida 2 de la temperatura 230, se obtiene que:

$$m_T = 0,005016 \frac{lb}{s}$$

El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \Delta m_T = & \left| h_o(TW - T_\infty) + \varepsilon\sigma(TW^4 - T_\infty^4) \right| \Delta A_{sTram} + \left| (TW - T_\infty) A_{sTram} \right| \Delta h_o + \dots \\ & \dots + \left| A_{sTram} h_o + 4A_{sTram} \varepsilon\sigma TW^3 \right| \Delta TW + \left| -A_{sTram} h_o - 4A_{sTram} \varepsilon\sigma T_\infty^3 \right| \Delta T_\infty \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores correspondientes, se obtiene:

$$\Delta m_T = 0,000009409 \frac{lb}{s} \approx 0,000009 \frac{lb}{s}$$

Finalmente se obtiene:

$$m_T = (0,005016 \pm 0,000009) \frac{lb}{s}$$

✓ Calor perdido al ambiente en el autoclave

Haciendo uso de la ecuación 3.5 y los datos correspondientes a la corrida 2 para la temperatura de operación 230 °F, se determina el calor perdido al ambiente por la superficie del autoclave:

$$Q_{Auto} = 0,005016 \frac{lb}{s} \cdot 948,8551 \frac{BTU}{lb} = 4,7591 \frac{BTU}{s}$$



El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\Delta q_{auto} = \left| Hfg \right|_{Pop} \left| \Delta m_T \right| = \left| 948,8551 \frac{BTU}{lb} \right| \cdot 0,000009 \frac{lb}{s} = 0,008928 \frac{BTU}{s}$$
$$\Delta q_{auto} = 0,009 \frac{BTU}{s}$$

Finalmente se obtiene:

$$Q_{Auto} = (4,759 \pm 0,009) \frac{BTU}{s}$$

✓ Calor aprovechable

Haciendo uso de la ecuación 3.2 y los datos correspondientes a la corrida 2 para la temperatura de operación 230 °F, se determina el calor perdido al ambiente por la superficie del autoclave:

$$Q_{Apr} = 0,005016 \frac{lb}{s} \cdot (1162,0167 - 210,5708) \frac{BTU}{lb} = 4,77219 \frac{BTU}{s}$$

El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas parciales, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\Delta q_{apr} = \left| Hg \right|_{Pop} - Hf \left|_{Tamb} \right| \left| \Delta m_T \right| = \left| (1162,0167 - 210,5708) \frac{BTU}{lb} \right| \cdot 0,000009 \frac{lb}{s}$$
$$\Delta q_{apr} = 0,010442 \frac{BTU}{s} \approx 0,01 \frac{BTU}{s}$$

Finalmente se obtiene:

$$Q_{Apr} = (4,77 \pm 0,01) \frac{BTU}{s}$$



B.5. Determinación de Porcentajes de desviación

Haciendo uso de la ecuación (3.34) y los datos correspondientes de la tabla 4.11, para una temperatura de operación de 224 °F usando para este ejemplo los resultados obtenidos para temperatura interna, se obtiene:

$$\%Desviación = \frac{238,4 - 239,95}{238,4} \cdot 100 = 0,6499\%$$

El error asociado a esta variable se calcula aplicando el método de las derivadas, sustituyendo los valores correspondientes se obtiene:

$$\Delta Desviación = \left| \frac{\partial \%Desv}{\partial Vr} \right| \cdot \Delta Vr + \left| \frac{\partial \%Desv}{\partial Vs} \right| \cdot \Delta Vr = 0,0842 \approx 0,1$$

Finalmente se obtiene:

$$\%Desviación = (0,6 \pm 0,1)\%$$



APÉNDICE C. TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los datos obtenidos para cada ensayo experimental involucrados en esta fase de la investigación.



TABLA C.1
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES CERRADOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de venteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
1	28,0	712,60	82,00	300,76	234,5	12	0,2895 ¹	80,0	89,20
							0,2893 ²	80,0	68,54
							0,3016 ¹	83,0	65,42
7	31,0	712,60	88,00	314,02	235,1	12	0,2996 ¹	82,0	63,12
							0,2864 ²	82,0	68,74
							0,2812 ¹	82,0	64,56
18	31,0	712,90	96,00	333,70	235,5	12	0,2809 ¹	78,0	63,74
							0,2889 ²	79,0	71,49
							0,2882 ¹	79,0	69,89

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(--- \pm 0,1) ^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.2
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES ABIERTOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de veteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
6	30,0	712,50	96,00	296,00	234,9	12	0,2820 ¹	82,00	64,82
							0,2746 ²	79,00	66,93
							0,2740 ¹	80,00	76,22
12	31,0	713,00	93,00	314,00	235,5	12	0,3048 ¹	81,00	70,60
							0,2547 ²	79,00	75,66
							0,2787 ¹	78,00	76,12
19	31,0	712,9	87,00	314,00	234,7	12	0,2550 ¹	83,00	53,17
							0,2657 ²	80,00	55,66
							0,2988 ¹	81,00	72,02

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(--- \pm 0,1) ^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.3
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES CERRADOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE (230 ± 1) °F

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{amb} \pm 0,5$)°C	Presión ambiente ($P_{amb} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de veteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) °F	Presión de operación ($P_{OP} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($mc \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$)°C	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
2	29,0	712,60	95,00	322,00	244,8	16	0,2758 ¹	85,0	63,00
							0,2880 ²	86,0	63,00
							0,3024 ¹	86,0	70,00
8	30,0	712,20	98,00	315,00	245,1	16	0,3047 ¹	86,0	64,00
							0,3233 ²	87,0	66,00
							0,2866 ¹	86,0	66,00
20	32,0	712,40	98,00	328,00	244,9	16	0,3375 ¹	84,0	81,00
							0,3278 ²	85,0	78,00
							0,2839 ¹	85,0	68,00

Masa de beaker vacío 1: (0,1471 ± 0,0001)kg

Masa de beaker vacío 2: (0,1506 ± 0,0001)kg

Temperatura de pared de la trampa: (199,0 ± 0,1) °F

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.4
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES ABIERTOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(230 \pm 1)^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de veteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
16	28,0	712,40	87,00	310,00	245,5	16	70,00	82,00	70,00
							71,00	79,00	71,00
							69,00	80,00	69,00
23	28,0	713,10	92,00	309,00	245,1	16	54,00	88,00	54,00
							81,00	87,00	81,00
							64,00	87,00	64,00
27	30,0	713,00	98,00	294,00	244,7	16	68,00	85,00	68,00
							61,00	85,00	61,00
							51,00	85,00	51,00

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(195,0 \pm 0,1)^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.5
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES CERRADOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(242 \pm 1)^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de venteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
4	30,0	712,5	96,00	337,00	255,3	22	0,2975 ¹	92,0	60,00
							0,3110 ²	92,0	62,00
							0,3407 ¹	90,0	77,00
25	30,0	713,10	83,00	323,00	255,7	22	0,2917 ¹	87,0	60,00
							0,2868 ²	86,0	64,00
							0,2902 ¹	88,0	60,00
30	30,0	713,2	84,00	331,00	254,1	22	0,3161 ¹	87,0	69,00
							0,2716 ²	87,0	70,00
							0,3060 ¹	88,0	71,00

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(209 \pm 0,1)^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.6
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES ABIERTOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE (242 ± 1)°F

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{amb} \pm 0,5$)°C	Presión ambiente ($P_{amb} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de venteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) °F	Presión de operación ($P_{OP} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$)°C	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
13	31,0	712,90	89,00	361,65	256,5	22	0,2758 ¹	89,0	68,00
							0,3050 ²	91,0	66,00
							0,3072 ¹	89,0	64,00
14	31,0	712,50	93,00	308,60	255,5	22	0,3192 ¹	88,0	73,00
							0,3293 ²	89,0	67,00
							0,3190 ¹	88,0	76,00
24	30,0	713,1	93,00	375,63	255,5	22	0,3565 ¹	87,0	88,00
							0,3221 ²	89,0	74,00
							0,3247 ¹	89,0	69,00

Masa de beaker vacío 1: (0,1471 ± 0,0001)kg

Masa de beaker vacío 2: (0,1506 ± 0,0001)kg

Temperatura de pared de la trampa: (210,0 ± 0,1) °F

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.7
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES CERRADOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(250 \pm 1)^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de venteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
9	30,0	712,00	90,00	387,00	263,3	26	0,2915 ²	90,0	63,00
							0,3012 ¹	91,0	59,00
							0,3030 ²	90,0	65,00
11	29,0	713,10	92,00	379,00	262,5	26	0,3186 ²	92,0	60,00
							0,3345 ¹	92,0	62,00
							0,3072 ²	90,0	61,00
17	29,0	713,10	94,00	322,00	262,9	26	0,3086 ²	90,0	60,00
							0,2895 ¹	91,0	51,00
							0,3226 ²	90,0	63,00

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(221,0 \pm 0,1) ^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.8
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES ABIERTOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(250 \pm 1)^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de veteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
5	28,0	713,00	107,00	330,00	262,7	26	0,2825 ¹	90,0	63,00
							0,3034 ²	90,0	61,00
							0,2870 ¹	92,0	73,00
22	32,0	712,30	97,00	373,00	262,5	26	0,3010 ²	90,0	56,00
							0,2698 ¹	90,0	52,00
							0,3123 ²	90,0	61,00
29	29,0	713,30	92,00	364,00	262,3	26	0,2823 ¹	90,0	57,00
							0,2575 ²	90,0	45,00
							0,2953 ¹	90,0	50,00

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(222,0 \pm 0,1)^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.9
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES CERRADOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(258 \pm 1)^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de venteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
10	27,0	713,00	92,00	340,00	270,5	30	0,3698 ¹	90,0	87,00
							0,3076 ²	92,0	62,00
							0,3551 ¹	93,0	73,00
15	31,0	712,90	96,00	347,00	269,7	30	0,285 ²	95,0	51,00
							0,3364 ¹	94,0	72,00
							0,3335 ²	94,0	67,00
21	31,0	712,00	91,00	393,00	269,7	30	0,2991 ²	95,0	46,00
							0,3441 ¹	94,0	62,00
							0,3076 ²	94,0	63,00

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(227,0 \pm 0,1) ^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.10
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE COCCIÓN DEL AUTOCLAVE OPERANDO CON
ASPERSORES CERRADOS A UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE $(258 \pm 1)^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura ambiente ($T_{\text{amb}} \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Presión ambiente ($P_{\text{amb}} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de venteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Presión de operación ($P_{\text{OP}} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado* ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
3	30,0	712,60	85,00	429,00	269,7	28	0,3572 ¹	94,0	76,00
							0,2922 ²	93,0	55,00
							0,2864 ¹	94,0	53,00
26	29,0	713,00	100,00	404,00	270,1	28	0,2760 ¹	95,0	52,00
							0,3040 ²	94,0	60,00
							0,3323 ¹	95,0	70,00
28	28,0	713,50	91,00	388,00	270,2	28	0,2732 ¹	95,0	51,00
							0,2691 ²	94,0	44,00
							0,2771 ¹	95,0	49,00

Masa de beaker vacío 1: $(0,1471 \pm 0,0001)\text{kg}$

Masa de beaker vacío 2: $(0,1506 \pm 0,0001)\text{kg}$

Temperatura de pared de la trampa: $(228, \pm 0,1) ^\circ\text{F}$

* Los valores de masa tendrán un número que identificaran el beaker donde fueron recolectados.



TABLA C.11
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS A UNA
TEMPERATURA DE $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) $^\circ\text{F}$	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$
1	218	0,00	231,9	0,00	48,0
		30,00	230,1	4,00	
		60,00	219,8	5,90	
		90,00	204,6	8,00	
		120,00	192,3	9,00	
		150,00	182,3	10,50	
		180,00	173,0	11,70	
		210,00	166,3	13,00	
		240,00	160,7	14,10	
		270,00	156,3	15,30	
		296,65	152,5	16,50	
7	218	0,00	233,2	0,00	51
		30,00	221,0	3,30	
		60,00	206,4	5,60	
		90,00	194,2	7,30	
		120,00	184,1	8,80	
		150,00	176,3	10,00	
		180,00	170,1	11,10	
		210,00	164,4	12,50	
		240,00	160,5	13,70	
		270,00	157,3	14,90	
		301,34	154,5	16,10	



TABLA C.11
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS A UNA
TEMPERATURA DE (218 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
18	218	0,00	232,9	0,00	51,0
		30,00	232,6	3,30	
		60,00	221,9	5,60	
		90,00	206,7	7,30	
		120,00	194,3	8,70	
		150,00	184,3	9,90	
		180,00	175,3	11,10	
		210,00	168,9	12,20	
		240,00	163,7	13,60	
		270,00	159,4	14,80	
		300,42	155,8	15,90	

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.12
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS A UNA
TEMPERATURA DE $(218 \pm 1) ^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) $^\circ\text{F}$	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$
6	218	0,00	232,5	0,00	55,0
		30,00	231,9	3,80	
		60,00	217,9	6,30	
		90,00	198,5	8,00	
		120,00	185,1	9,50	
		150,00	175,9	11,00	
		180,00	169,3	12,50	
		212,56	164,3	14,00	
12	218	0,00	232,7	0,00	55,0
		30,00	232,5	3,80	
		60,00	217,9	6,00	
		90,00	197,3	8,10	
		120,00	181,7	9,70	
		150,00	170,5	11,00	
		180,00	171,2	12,60	
		210,77	163,1	13,90	
19	218	0,00	231,7	0,00	55,0
		30,00	231,2	3,80	
		60,00	216,9	6,30	
		90,00	196,7	8,20	
		120,00	182,6	9,80	
		150,00	172,3	11,20	
		180,00	165,9	12,70	
		213,62	160	13,40	

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1) psig



TABLA C.13
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS A UNA
TEMPERATURA DE $(230 \pm 1) ^\circ\text{F}$

Corrida	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) $^\circ\text{F}$	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) $^\circ\text{F}$	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) $^\circ\text{C}$
2	230	0,00	242,2	0,00	42,0
		30,00	240,3	3,00	
		60,00	230,9	5,10	
		90,00	215,1	6,90	
		120,00	200,3	8,00	
		150,00	189,3	9,30	
		180,00	180,7	10,30	
		210,00	174,6	11,40	
		240,00	170,1	12,30	
		270,00	167,0	13,50	
		300,00	165,2	14,30	
		330,00	164,1	15,40	
		360,00	162,9	16,50	
		390,00	161,7	17,50	
		420,00	159,1	18,50	
		450,00	157,5	19,60	
		480,00	156,3	20,40	
510,00	154,8	21,60			
526,83	153,7	22,70			



TABLA C.13
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS A UNA
TEMPERATURA DE (230 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
8	230	0,00	243,3	0,00	45,0
		30,00	241,3	2,80	
		60,00	233,2	5,20	
		90,00	221,7	6,80	
		120,00	213,1	8,00	
		150,00	206,3	9,20	
		180,00	197,5	10,30	
		210,00	191,3	11,30	
		240,00	187,3	12,40	
		270,00	185,7	13,50	
		300,00	182,0	14,50	
		330,00	178,3	15,60	
		360,00	176,3	16,70	
		390,00	169,7	17,80	
		420,00	164,7	18,40	
		450,00	163,7	18,20	
		480,00	157,9	19,40	
		510,00	156,8	20,30	
517,91	155,2	21,80			



TABLA C.13
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS A UNA
TEMPERATURA DE (230 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
20	230	0,00	242,1	0,00	46,0
		30,00	230,6	3,20	
		60,00	216,4	5,40	
		90,00	205,3	6,80	
		120,00	199,2	8,10	
		150,00	191,7	9,40	
		180,00	184,9	10,60	
		210,00	179,5	11,70	
		240,00	175,2	12,80	
		270,00	171,8	13,90	
		300,00	169,7	15,00	
		330,00	166,8	16,10	
		360,00	161,6	17,30	
		390,00	157,7	18,40	
		420,00	154,9	19,40	
		450,00	153,1	20,50	
		480,00	152,3	21,80	
		510,00	152,0	23,00	
548,10	151,3	24,00			

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.14
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (230 ± 1) °F

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
16	230	0,00	241,3	0,00	45,0
		30,00	229,2	3,50	
		60,00	213,1	6,00	
		90,00	200,3	7,60	
		120,00	192,1	9,00	
		150,00	184,8	10,50	
		180,00	176,6	11,80	
		210,00	169,7	13,30	
		240,00	164,1	14,50	
		257,13	159,3	15,60	
23	230	0,00	241,3	0,00	58,0
		30,00	229,8	4,00	
		60,00	214,8	6,00	
		90,00	205,9	7,70	
		120,00	197,6	9,10	
		150,00	190,5	10,40	
		180,00	184,1	11,80	
		210,00	177,3	13,00	
		240,00	170,4	14,30	
		260,16	164,9	15,50	



TABLA C.14
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (230 ± 1) °F(Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
27	230	0,00	242,2	0,00	53,0
		30,00	227,1	3,50	
		60,00	205,3	5,60	
		90,00	195,9	7,50	
		120,00	188,9	9,00	
		150,00	182,7	10,30	
		180,00	176,5	11,60	
		210,00	170,7	12,90	
		240,00	166,4	14,10	
		277,88	162,3	15,50	

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.15
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (242 ± 1) °F

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
4	242	0,00	253,0	0,00	48,0
		30,00	244,3	2,50	
		60,00	225,5	4,30	
		90,00	209,3	5,70	
		120,00	197,5	6,90	
		150,00	190,1	7,90	
		180,00	186,1	9,00	
		210,00	183,8	9,70	
		240,00	181,7	10,50	
		270,00	180,9	11,40	
		300,00	180,5	12,10	
		330,00	179,5	13,00	
		360,00	179,3	13,70	
		390,00	179,1	14,70	
		420,00	177,8	15,60	
		450,00	176,7	16,40	
		480,00	175,6	17,20	
		510,00	174,3	18,00	
		540,00	173,1	18,70	
		570,00	172,1	19,50	
		600,00	171,1	20,40	
		630,00	170,0	21,30	
		660,00	168,8	22,00	
		690,00	167,7	23,00	
		720,00	166,7	23,80	
		750,00	166,0	24,60	
780,00	165,4	24,30			
810,00	164,9	26,10			
840,00	164,4	26,90			
870,00	164,0	27,60			
881,96	163,5	28,30			



TABLA C.15
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (242 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
25	242	0,00	253,6	0,00	41,0
		30,00	243,5	2,80	
		60,00	225,0	4,80	
		90,00	211,5	6,10	
		120,00	202,5	7,30	
		150,00	198,7	8,10	
		180,00	196,1	9,10	
		210,00	194,5	10,00	
		240,00	193,7	10,80	
		270,00	193,1	11,80	
		300,00	192,3	12,40	
		330,00	191,3	13,20	
		360,00	190,0	14,10	
		390,00	188,2	15,00	
		420,00	186,5	15,80	
		450,00	183,3	16,70	
		480,00	181,2	17,50	
		510,00	179,8	18,40	
		540,00	178,4	19,20	
		570,00	176,7	20,00	
		600,00	175,2	20,80	
		630,00	173,9	21,80	
		660,00	172,7	22,60	
		690,00	171,4	23,60	
720,00	170,2	24,20			
750,00	169,1	25,00			
780,00	168,1	25,80			
810,00	167,3	26,50			
840,00	166,2	27,20			
870,00	165,3	28,00			
910,46	164,3	29,00			



TABLA C.15
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (242 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
30	242	0,00	253,2	0,00	41,0
		30,00	252,8	2,50	
		60,00	242,3	4,30	
		90,00	227,7	5,80	
		120,00	218,3	6,80	
		150,00	212,1	7,80	
		180,00	208,5	8,70	
		210,00	205,1	9,50	
		240,00	204,1	10,40	
		270,00	203,0	11,00	
		300,00	201,1	12,00	
		330,00	198,9	12,80	
		360,00	196,4	13,60	
		390,00	193,7	14,20	
		420,00	191,1	15,10	
		450,00	188,5	15,80	
		480,00	185,7	16,80	
		510,00	183,0	17,50	
		540,00	181,1	18,30	
		570,00	179,6	19,00	
		600,00	178,3	19,80	
		630,00	177,1	20,70	
		660,00	176,2	21,50	
		690,00	175,4	22,40	
		720,00	174,3	23,20	
		750,00	172,9	24,00	
780,00	171,0	24,50			
810,00	170,2	25,40			
840,00	168,9	26,10			
870,00	167,9	26,80			
905,57	166,2	27,70			

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.16
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (242 ± 1) °F

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
13	242	0,00	253,9	0,00	56,0
		30,00	253,0	3,50	
		60,00	245,5	5,40	
		90,00	232,6	6,90	
		120,00	223,1	8,00	
		150,00	213,7	9,00	
		180,00	205,8	10,00	
		210,00	198,1	11,20	
		240,00	190,7	12,00	
		270,00	184,3	13,20	
		300,00	179,0	14,00	
		303,35	174,5	14,70	
14	242	0,00	253,2	0,00	55,0
		30,00	240,3	3,00	
		60,00	221,9	4,90	
		90,00	209,7	6,40	
		120,00	200,7	7,70	
		150,00	193,9	8,80	
		180,00	188,1	9,70	
		210,00	183,5	10,80	
		240,00	180,1	11,80	
		270,00	178,2	12,70	
		300,00	175,5	13,70	
		330,66	173,3	14,50	



TABLA C.16
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (242 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
24	242	0,00	253,6	0,00	49,0
		30,00	243,1	2,80	
		60,00	227,5	4,90	
		90,00	215,2	6,30	
		120,00	205,9	7,70	
		150,00	201,5	8,90	
		180,00	199,1	10,00	
		210,00	196,5	11,10	
		240,00	195,3	12,20	
		270,00	193,1	13,20	
		300,00	190,0	14,20	
		326,33	186,7	15,20	

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.17
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (250 ± 1) °F

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
9	250	0,00	261,2	0,00	43,0
		30,00	260,1	2,00	
		60,00	252,3	3,80	
		90,00	235,9	5,00	
		120,00	224,3	5,80	
		150,00	216,3	6,50	
		180,00	211,0	7,40	
		210,00	208,5	7,90	
		240,00	207,3	8,50	
		270,00	206,7	9,80	
		300,00	206,5	9,90	
		330,00	206,1	10,50	
		360,00	206,1	11,00	
		390,00	205,1	11,50	
		420,00	203,5	12,00	
		450,00	201,8	12,60	
		480,00	199,7	13,30	
		510,00	197,5	13,80	
		540,00	195,3	14,30	
		570,00	193,3	15,00	
		600,00	191,1	15,40	
		630,00	189,0	16,10	
		660,00	186,9	16,70	
		690,00	185,0	17,30	
		720,00	183,1	17,80	
		750,00	181,3	18,40	
		780,00	179,7	19,00	
		810,00	178,1	19,50	
		840,00	176,5	20,00	
		870,00	174,9	20,60	
900,00	173,5	21,30			
930,00	172,2	21,80			
960,00	171,0	22,50			
990,00	169,9	23,00			
1020,00	168,6	23,70			
1050,00	168,0	24,20			
1080,00	167,1	24,80			
1110,00	166,2	25,30			
1140,00	165,4	25,90			
1170,00	164,4	26,40			
1236,59	163,5	26,80			



TABLA C.17
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (250 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
11	250	0,00	262,0	0,00	41,0
		30,00	260,5	1,80	
		60,00	254,0	3,60	
		90,00	238,1	4,80	
		120,00	225,4	5,80	
		150,00	215,9	6,50	
		180,00	208,7	7,30	
		210,00	203,9	8,00	
		240,00	201,3	8,70	
		270,00	200,1	9,40	
		300,00	199,9	9,90	
		330,00	199,3	10,60	
		360,00	199,1	11,20	
		390,00	198,5	11,80	
		420,00	198,1	12,30	
		450,00	196,7	13,00	
		480,00	195,1	13,30	
		510,00	193,3	14,10	
		540,00	191,5	14,70	
		570,00	189,6	15,30	
		600,00	187,4	15,80	
		630,00	185,4	16,60	
		660,00	183,6	17,10	
		690,00	181,8	17,80	
		720,00	180,1	18,20	
		750,00	178,5	18,90	
		780,00	176,9	19,40	
		810,00	175,3	20,00	
		840,00	173,8	20,50	
		870,00	172,5	21,20	
900,00	171,3	21,90			
930,00	170,3	22,50			
960,00	169,2	23,20			
990,00	168,1	23,70			
1020,00	167,1	24,20			
1050,00	166,3	24,80			
1080,00	165,7	25,40			
1110,00	165,0	25,80			
1140,00	164,1	26,30			
1170,00	163,3	27,00			
1200,59	162,4	27,40			



TABLA C.17
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (250 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
17	250	0,00	261,9	0,00	42,0
		30,00	260,5	1,70	
		60,00	253,5	3,40	
		90,00	237,1	4,80	
		120,00	225,3	5,70	
		150,00	216,6	6,50	
		180,00	211,3	7,30	
		210,00	208,1	8,00	
		240,00	204,5	8,50	
		270,00	203,1	9,20	
		300,00	202,6	9,70	
		330,00	202,1	10,40	
		360,00	201,6	10,90	
		390,00	200,1	11,50	
		420,00	198,7	12,00	
		450,00	196,9	12,60	
		480,00	195,1	13,20	
		510,00	193,1	13,70	
		540,00	191,0	14,30	
		570,00	189,1	14,80	
		600,00	187,6	15,40	
		630,00	186,5	15,90	
		660,00	185,1	16,60	
		690,00	183,4	17,00	
		720,00	181,7	17,50	
		750,00	180,1	18,40	
		780,00	178,6	18,80	
		810,00	177,2	19,30	
		840,00	175,8	19,90	
		870,00	174,3	20,30	
900,00	172,9	21,00			
930,00	171,7	22,40			
960,00	170,6	23,00			
990,00	169,6	23,50			
1020,00	168,7	24,00			
1050,00	168,0	24,30			
1080,00	167,3	25,00			
1110,00	166,4	25,50			
1140,00	165,4	26,60			
1170,00	164,5	26,70			
1201,93	163,6	27,00			

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.18
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (250 ± 1) °F

Corrida	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
5	250	0,00	260,8	0,00	45,0
		30,00	253,9	2,50	
		60,00	238,9	4,00	
		90,00	227,0	5,40	
		120,00	215,9	6,50	
		150,00	215,9	7,40	
		180,00	207,5	8,30	
		210,00	202,3	9,20	
		240,00	198,3	10,00	
		270,00	194,3	10,60	
		300,00	191,1	11,40	
		330,00	189,4	12,20	
		360,00	187,4	12,80	
		390,00	185,0	13,60	
		420,00	182,3	14,40	
		450,00	179,7	15,00	
		480,00	177,3	15,70	
		510,00	174,8	16,60	
		540,00	172,4	17,20	
		570,00	170,0	18,00	
600,00	168,1	18,80			
630,00	166,2	19,50			
660,00	164,3	20,30			
690,00	162,3	21,00			
713,61	160,5	21,70			



TABLA C.18
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (250 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
22	250	0,00	259,9	0,00	45,0
		30,00	250,8	2,20	
		60,00	236,3	4,30	
		90,00	225,4	5,30	
		120,00	219,4	6,50	
		150,00	213,6	7,30	
		180,00	208,9	8,20	
		210,00	205,3	9,00	
		240,00	203,7	9,80	
		270,00	201,8	10,50	
		300,00	199,3	11,20	
		330,00	196,7	11,80	
		360,00	193,9	12,60	
		390,00	191,3	13,30	
		420,00	188,5	14,00	
		450,00	185,9	14,80	
		480,00	183,3	15,30	
		510,00	180,7	16,20	
		540,00	178,5	17,00	
		570,00	176,3	17,80	
		600,00	174,1	18,30	
630,00	171,9	18,90			
660,00	169,9	19,50			
690,00	168,2	20,00			
718,62	166,2	20,90			



TABLA C.18
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (250 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
29	250	0,00	260,1	0,00	47,0
		30,00	259,4	2,54,2	
		60,00	249,8	5,50	
		90,00	234,3	6,80	
		120,00	222,6	7,70	
		150,00	218,9	8,70	
		180,00	214,1	9,40	
		210,00	209,3	10,20	
		240,00	206,2	11,00	
		270,00	204,3	11,90	
		300,00	201,3	12,80	
		330,00	198,1	13,60	
		360,00	194,5	14,20	
		390,00	191,1	15,10	
		420,00	187,7	15,90	
		450,00	184,3	16,70	
		480,00	181,1	17,40	
		510,00	178,0	18,30	
		540,00	175,3	19,00	
		570,00	172,9	19,80	
		600,00	170,1	20,50	
630,00	167,8	21,30			
660,00	165,6	22,10			
690,00	163,8	22,90			
720,29	161,8	23,50			

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.19
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (258 ± 1) °F

Corrida	Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
10	258	0,00	267,3	0,00	40,0
		30,00	266,6	0,80	
		60,00	261,7	1,50	
		90,00	254,4	2,20	
		120,00	247,1	2,30	
		150,00	240,3	3,30	
		180,00	234,2	3,80	
		210,00	229,3	4,30	
		240,00	226,1	4,80	
		270,00	225,7	5,20	
		300,00	225,5	5,40	
		330,00	225,3	5,90	
		360,00	224,9	6,30	
		390,00	224,3	6,50	
		420,00	224,1	7,00	
		450,00	223,9	7,20	
		480,00	223,2	7,50	
		510,00	222,1	7,80	
		540,00	220,7	8,00	
		570,00	219,3	8,30	
		600,00	217,8	8,60	
		630,00	216,3	9,00	
		660,00	214,7	9,20	
		690,00	213,1	9,30	
		720,00	211,6	9,60	
		750,00	210,1	9,80	
		780,00	208,6	10,20	
		810,00	206,9	10,60	
		840,00	205,3	10,90	
		870,00	203,8	11,10	
900,00	202,2	11,30			
930,00	200,7	11,60			
960,00	199,2	12,00			
990,00	197,7	12,20			
1020,00	196,2	12,40			
1050,00	194,7	12,60			
1080,00	193,1	12,80			
1110,00	191,7	13,20			
1140,00	190,3	13,40			
1170,00	188,9	13,60			
1200,00	187,5	13,90			
1230,00	186,1	14,20			
1260,00	184,7	14,30			



TABLA C.19
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (258 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
10	258	1290,00	183,3	14,60	40,0
		1320,00	182,0	14,90	
		1350,00	180,6	15,20	
		1380,00	179,3	15,50	
		1410,00	177,9	15,70	
		1440,00	176,6	16,00	
		1470,00	175,3	16,20	
		1500,00	174,1	16,60	
		1511,53	172,8	16,80	
15	258	0,00	267,3	0,00	43,0
		30,00	266,7	1,00	
		60,00	263,3	2,20	
		90,00	257,4	3,00	
		120,00	253,3	4,00	
		150,00	249,1	4,60	
		180,00	244,3	5,00	
		210,00	239,7	5,70	
		240,00	235,4	6,20	
		270,00	236,3	6,80	
		300,00	233,0	7,30	
		330,00	234,5	7,80	
		360,00	232,5	8,10	
		390,00	230,7	8,60	
		420,00	228,7	9,00	
		450,00	226,3	9,40	
		480,00	223,9	9,70	
		510,00	221,6	10,10	
		540,00	219,6	10,60	
		570,00	217,5	11,00	
		600,00	215,0	11,40	
		630,00	212,8	11,90	
		660,00	210,3	12,30	
		690,00	207,7	12,80	
720,00	205,3	13,20			
750,00	202,8	13,60			
780,00	200,7	14,00			
810,00	199,0	14,30			
840,00	197,5	14,80			
870,00	195,2	15,20			



TABLA C.19
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (258 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
15	258	900,00	193,2	15,60	43,0
		930,00	191,4	15,80	
		960,00	189,3	16,30	
		990,00	187,2	16,70	
		1020,00	185,5	17,10	
		1050,00	184,0	17,50	
		1080,00	182,3	17,80	
		1110,00	180,5	18,30	
		1140,00	179,0	18,80	
		1170,00	177,6	19,30	
		1200,00	176,2	19,60	
		1230,00	174,8	20,00	
		1260,00	173,5	20,30	
		1290,00	172,5	20,80	
		1320,00	171,5	21,40	
		1350,00	170,7	21,70	
		1380,00	169,7	22,30	
		1410,00	168,5	22,70	
1440,00	167,5	23,00			
1470,00	166,3	23,40			
1500,00	165,0	23,80			
1531,66	163,9	24,20			
21	258	0,00	267,6	0,00	42,0
		30,00	267,0	0,95	
		60,00	261,9	1,95	
		90,00	253,7	2,75	
		120,00	246,0	3,15	
		150,00	238,5	4,05	
		180,00	231,7	4,60	
		210,00	226,4	5,10	
		240,00	223,3	5,75	
		270,00	221,1	6,20	
		300,00	220,0	6,50	
		330,00	220,0	7,00	
		360,00	219,8	7,45	
		390,00	219,5	7,75	
		420,00	218,6	8,25	
		450,00	217,4	8,60	
480,00	216,2	9,05			



TABLA C.19
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES CERRADOS
A UNA TEMPERATURA DE (258 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
21	258	870,00	195,3	13,70	42,0
		900,00	193,6	14,00	
		930,00	192,0	14,30	
		960,00	190,6	14,65	
		990,00	189,1	15,00	
		1020,00	187,7	15,20	
		1050,00	186,3	15,50	
		1080,00	184,9	15,85	
		1110,00	183,6	16,25	
		1140,00	182,4	16,50	
		1170,00	181,2	16,80	
		1200,00	180,0	17,15	
		1230,00	178,7	17,55	
		1260,00	177,5	17,90	
		1290,00	176,3	18,25	
		1320,00	175,2	18,70	
		1350,00	174,0	19,05	
		1380,00	172,9	19,35	
		1410,00	171,7	19,65	
		1440,00	170,5	20,00	
1470,00	169,4	20,25			
1500,00	168,3	20,65			
1522,75	167,45	20,9			

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.20
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (258 ± 1) °F

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
3	258	0,00	267,2	0,00	46,0
		30,00	263,2	1,80	
		60,00	256,8	3,00	
		90,00	250,7	4,50	
		120,00	242,9	5,50	
		150,00	234,1	6,20	
		180,00	226,0	6,50	
		210,00	217,9	7,50	
		240,00	211,5	8,10	
		270,00	209,8	8,30	
		300,00	208,2	8,90	
		330,00	204,3	9,20	
		360,00	200,7	9,90	
		390,00	197,1	10,30	
		420,00	193,1	10,70	
		450,00	189,6	11,40	
		480,00	186,5	12,10	
		510,00	183,5	12,90	
		540,00	181,0	13,30	
		570,00	178,6	13,90	
		600,00	176,0	14,20	
		630,00	174,0	14,80	
		660,00	172,1	15,10	
		690,00	169,9	15,80	
		720,00	167,8	16,50	
		750,00	166,0	17,20	
		780,00	164,3	18,00	
		810,00	162,5	18,80	
		840,00	160,9	19,40	
		870,00	160,1	20,20	
900,00	158,7	21,00			
930,00	158,9	21,70			
960,00	157,3	22,50			
990,00	157,1	23,20			
1020,00	156,5	24,00			
1050,00	155,9	24,70			
1080,00	154,5	25,40			
1110,03	153,1	26,10			



TABLA C.20
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (258 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
26	258	0,00	267,7	0,00	47,0
		30,00	267,2	1,80	
		60,00	261,1	3,60	
		90,00	250,7	4,50	
		120,00	242,2	5,40	
		150,00	233,6	6,20	
		180,00	229,1	6,80	
		210,00	225,5	7,50	
		240,00	220,9	8,20	
		270,00	216,1	8,80	
		300,00	211,8	9,30	
		330,00	207,5	9,90	
		360,00	203,5	10,30	
		390,00	199,7	11,00	
		420,00	196,9	11,50	
		450,00	195,7	12,10	
		480,00	195,2	12,70	
		510,00	193,8	13,30	
		540,00	192,2	13,80	
		570,00	190,4	14,20	
		600,00	188,4	14,80	
		630,00	186,5	15,40	
		660,00	184,4	15,90	
		690,00	182,5	16,40	
		720,00	180,6	17,00	
		750,00	178,7	17,40	
		780,00	176,9	17,90	
		810,00	175,3	18,40	
		840,00	173,7	19,00	
		870,00	172,1	19,30	
900,00	170,4	19,90			
930,00	169,0	20,30			
960,00	167,5	20,90			
990,00	166,0	21,40			
1020,00	164,5	22,00			
1050,00	163,1	23,10			
1080,00	161,6	23,60			
1114,57	160,3	24,10			



TABLA C.20
DATOS EXPERIMENTALES IMPLICADOS EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL
AUTOCLAVE OPERANDO CON ASPERSORES ABIERTOS
A UNA TEMPERATURA DE (258 ± 1) °F (Continuación)

Corrida	Temperatura de operación (T _{OP} ± 1) °F	Tiempo de enfriamiento (t ± 0,01) s	Temperatura del indicador (T ± 0,1) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave (L ± 0,1) cm	Temperatura del agua al final del proceso (T ± 0,5) °C
28	258	0,00	267,5	0,00	47,0
		30,00	260,1	2,10	
		60,00	258,2	3,90	
		90,00	245,5	5,00	
		120,00	236,0	5,80	
		150,00	229,0	6,40	
		180,00	223,7	7,00	
		210,00	219,2	7,50	
		240,00	215,9	7,90	
		270,00	213,6	8,50	
		300,00	212,3	8,90	
		330,00	210,9	9,30	
		360,00	209,9	9,70	
		390,00	209,7	10,30	
		420,00	208,9	10,70	
		450,00	207,4	11,00	
		480,00	205,7	11,60	
		510,00	204,1	12,00	
		540,00	201,8	12,50	
		570,00	198,7	13,00	
		600,00	196,3	13,50	
		630,00	193,9	14,00	
		660,00	191,9	14,80	
		690,00	190,4	15,00	
		720,00	188,2	15,50	
		750,00	186,5	16,00	
		780,00	184,1	16,40	
		810,00	182,3	17,00	
		840,00	180,5	17,30	
		870,00	178,5	17,70	
900,00	176,5	18,30			
930,00	174,4	18,80			
960,00	172,3	19,60			
990,00	170,3	20,00			
1020,00	168,5	20,50			
1050,00	166,3	21,30			
1080,00	164,5	21,90			
1115,91	163,8	22,70			

Presión de agua de enfriamiento: (30 ± 1)psig



TABLA C.21
DIMENSIONES TOMADAS DE LA TRAMPA DE VAPOR SERIE 800 AMRSTRONG

ZONA	SECCIÓN	DIMENSIONES (Di ± 0,01)mm
1	Cilindro Principal	D1: 69,50 h1: 69,10
	Entrada y salida de la trampa de vapor	D2: 44,10 h2: 35,10
	Canal	L1: 30,40 A1: 30,00
2	Tapas de la trampa de vapor	D3: 95,00 h3: 18,40
3	Conducto inferior	D4: 35,00 h4: 27,00
	Canal	L3: 17,20 A3: 30,00
4	Canal	L₁₄: 46,00 L2: 17,20 A: 16,40 An: 30,00

Nota: Estas dimensiones son consideraciones tomadas por los autores, basados en las Figura 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8.



Tabla C.22

DATOS EXPERIMENTALES DE LA ETAPA DE COCCIÓN PARA LA VALIDACIÓN DEL SOFTWARE OPERANDO EL EQUIPO CON ASPERSORES CERRADOS

Temperatura de operación ($T_{op} \pm 1$) °F	Temperatura ambiente ($T_{amb} \pm 0,5$)°C	Presión ambiente ($P_{amb} \pm 0,05$) mmHg	Tiempo de venteo ($t_v \pm 0,01$) s	Tiempo de estabilización ($t_e \pm 0,01$) s	Temperatura interna ($T_i \pm 0,1$) °F	Presión de operación ($P_{op} \pm 1$) psig	Masa de condensado recolectado ($m_c \pm 0,0001$) kg	Temperatura del condensado ($T_c \pm 0,5$)°C	Tiempo de recolección del condensado ($t_c \pm 0,01$) s
224	30,0	712,30	88,00	300,00	238,66	14	0,2820	82,0	70,00
							0,3255	84,0	83,00
							0,3423	82,0	87,00
236	29,0	712,40	89,00	314,00	250,16	18	0,3590	84,0	81,00
							0,3165	84,0	72,00
							0,2809	84,0	71,00
254	31,0	711,90	89,00	333,00	265,56	28	0,3338	88,0	71,00
							0,3431	90,0	65,00
							0,3421	90,0	71,00

Masa de beaker vacío 1: ($0,1471 \pm 0,0001$)kg



Tabla C.23

Datos experimentales de la etapa de cocción para la validación del software operando el equipo con aspersores abiertos

Temperatura de operación (Top ± 1) °F	Temperatura ambiente (T _{amb} ± 0,5)°C	Presión ambiente (P _{amb} ±0,05) mmHg	Tiempo de venteo (t _v ±0,01) s	Tiempo de estabilización (t _e ±0,01) s	Temperatura interna (Ti ± 0,1) °F	Presión de operación (P _{OP} ± 1) psig	Masa de condensado recolectado (mc ± 0,0001) kg	Temperatura del condensado (T _c ± 0,5)°C	Tiempo de recolección del condensado (t _c ± 0,01)s
224	29,0	707,22	82,00	304,00	238,16	14	0,2874	80,00	70,00
							0,3382	80,00	78,00
							0,2774	80,00	69,00
236	30,0	707,60	86,00	320,00	248,46	18	0,3022	82,00	74,00
							0,3145	82,00	66,00
							0,3261	84,00	65,00
254	31,0	707,50	91,00	334,00	265,56	26	0,2839	88,00	55,00
							0,2819	88,00	61,00
							0,3076	88,00	63,00
204 Con carga	32,0	712,50	111,00	319,00	221,16	12	0,3110	72,00	77,00
							0,2992	72,00	75,00
							0,2989	72,00	75,00

Masa de beaker vacío 1: (0,1471 ± 0,0001)kg



DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla C.24

Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos para la validación del software

Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
224	0,00	235,7	0,00	52,0
	30,00	235,5	3,50	
	60,00	222,3	5,80	
	90,00	188,5	7,50	
	120,00	178,4	9,20	
	150,00	171,0	10,60	
	180,00	164,3	11,90	
	212,44	159,5	13,20	
236	0,00	247,5	0,00	50,0
	30,00	247,2	3,00	
	60,00	235,3	5,00	
	90,00	218,5	6,80	
	120,00	206,9	8,00	
	150,00	198,9	9,20	
	180,00	192,3	10,50	
	210,00	187,1	11,50	
	240,00	180,7	12,50	
	270,00	175,9	13,60	
	301,05	171,2	14,70	



DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla C.24

Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores abiertos para la validación del software

(Continuación)

Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
254	0,00	263,2	0,00	46,0
	30,00	262,7	1,50	
	60,00	257,4	3,00	
	90,00	248,8	4,10	
	120,00	243,6	5,00	
	150,00	236,5	6,00	
	180,00	229,1	6,90	
	210,00	222,1	7,60	
	240,00	215,9	8,30	
	270,00	210,3	9,10	
	300,00	205,3	9,80	
	330,00	200,8	10,50	
	360,00	198,1	11,00	
	390,00	197,5	11,60	
	420,00	195,6	12,30	
	450,00	193,1	12,80	
	480,00	190,7	13,50	
	510,00	188,1	14,10	
	540,00	185,4	14,80	
	570,00	182,7	15,40	
	600,00	180,0	16,00	
	630,00	177,4	16,60	
	660,00	175,2	17,20	
	690,00	173,3	18,00	
	720,00	171,6	18,40	
	750,00	169,8	18,80	
	780,00	168,3	19,50	
	810,00	166,8	20,20	
840,00	165,5	20,80		
870,00	163,9	21,60		
900,00	162,4	22,20		
936,10	160,8	22,80		

Presión de agua de enfriamiento: (30 ±1)psig



DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla C.25

Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados para la validación del software

Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
224	0,00	226,0	0,00	50,0
	30,00	223,3	3,00	
	60,00	208,6	5,50	
	90,00	195,5	7,20	
	120,00	189,2	8,60	
	150,00	186,0	9,90	
	180,00	181,3	11,00	
	210,00	178,3	12,40	
	240,00	174,7	13,60	
	270,00	174,3	14,80	
	300,00	169,5	16,10	
	330,00	164,0	17,30	
	360,00	159,9	17,60	
	399,25	156,2	18,50	
236	0,00	247,7	0,00	40,0
	30,00	247,1	2,80	
	60,00	237,8	5,00	
	90,00	220,7	6,40	
	120,00	206,7	7,50	
	150,00	199,0	8,80	
	180,00	196,2	9,80	
	210,00	191,5	10,90	
	240,00	187,5	11,80	
	270,00	182,9	12,70	
	300,00	179,1	13,70	
	330,00	175,5	14,60	
	360,00	172,3	15,50	
	390,00	169,5	16,50	
	420,00	167,3	17,30	
	450,00	164,7	18,10	
	480,00	163,5	18,90	
	510,00	162,3	19,70	
	540,00	161,0	20,50	
	570,00	159,6	21,30	
	600,00	158,7	22,10	
	630,00	158,1	22,90	
660,00	157,6	23,70		
690,00	157,5	24,50		
720,00	157,3	25,30		
750,00	156,7	26,10		
780,00	156,1	26,90		
824,81	154,9	27,70		



DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla C.25

Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados para la validación del software

(Continuación)

Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
254	0,00	263,8	0,00	42,0
	30,00	263,4	1,20	
	60,00	257,4	2,60	
	90,00	249,4	3,80	
	120,00	241,9	4,60	
	150,00	234,6	5,20	
	180,00	228,5	5,90	
	210,00	224,8	6,50	
	240,00	225,2	7,20	
	270,00	224,3	7,70	
	300,00	222,6	8,10	
	330,00	220,6	8,70	
	360,00	218,4	9,10	
	390,00	215,9	9,60	
	420,00	213,5	10,00	
	450,00	211,1	10,40	
	480,00	208,7	10,80	
	510,00	206,3	11,30	
	540,00	203,8	11,80	
	570,00	201,6	12,20	
	600,00	199,2	12,60	
	630,00	196,9	13,00	
	660,00	194,5	13,50	
	690,00	192,4	14,00	
	720,00	190,1	14,40	
	750,00	188,1	14,80	
	780,00	186,3	15,20	
	810,00	184,5	15,70	
	840,00	182,4	16,10	
	870,00	180,7	16,50	
900,00	178,9	16,90		
930,00	177,2	17,30		
960,00	175,6	17,70		
990,00	174,0	18,20		
1020,00	172,5	18,70		
1050,00	171,2	19,20		
1080,00	169,9	19,70		
1110,00	168,6	20,20		
1219,18	167,4	20,70		

Presión de agua de Enfriamiento: (30 ± 1) psig



DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla C.25

Datos experimentales implicados en la etapa de enfriamiento del autoclave operando con aspersores cerrados para la validación del software

(Continuación)

Temperatura de operación ($T_{OP} \pm 1$) °F	Tiempo de enfriamiento ($t \pm 0,01$) s	Temperatura del indicador ($T \pm 0,1$) °F	Nivel de agua en el interior del Autoclave ($L \pm 0,1$) cm	Temperatura del agua al final del proceso ($T \pm 0,5$) °C
204 Con carga	0,00	218,8	0,00	50,0
	30,00	212,0	3,30	
	60,00	190,8	6,00	
	90,00	175,7	7,90	
	120,00	164,7	9,50	
	150,00	155,8	11,20	
	180,00	148,6	12,80	
	215,91	143,0	14,10	



ANEXOS

Factura de Compra de Termocupla tipo K

INSTRUMATIK C.A.
 URB. INDUSTRIAL CARABOBO, AV. NORTE (17 - 18) PARCELA N° 86-42
 TELFS.: (0241) 8345335 - 8339157 - 8343101 - 8329241 - 8329242 - 8329917
 FAX: (0241) 8339151 - 8329239 APODO. 544 VALENCIA - VENEZUELA
 Página Web y Correo: www.instrumatik.com
 info@instrumatik.com

RIF.: J - 07525562 - 3 NIT: 0014025790
 FABRICANTE DE: DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO DE:
 TERMOCUPLAS, TERMORESISTENCIAS, TERMOPOZOS, ELECTRODOS DE IGNICION, BRIDAS Y PLACAS DE ORIFICIO, OTROS
PMD
 CABLES DE INSTRUMENTACION

No. DE CONTROL: 21072

Cliente: JOSE ESCALONA

Factura 0022921

R.I.F.: V-16563290 / N.I.T.:

Emisión 01/09/2006

Domicilio fiscal: URBANIZACION LOMAS DEL ESTE, CALLE GERANIOS. CASA No. 112-21. VALENCIA EDO CARABOBO.

Vencimiento 01/09/2006

Forma de pago CONTADO

Teléfonos: 0414-1430371

Orden de Compra # VERBAL

Vendedor NORELYS OLLARVES

Persona contacto: JO SE ESCALONA

Código	Nombre del artículo	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Total
SA-065	CONJUNTO DE TERMOCUPLA MODELO: Y SA-065-2K9C9-R10-3C5-3.5"-0.0"-1MEO.	1,00	PZA	125.000,00	125.000,00

Notas u Observaciones:
BK. 12966

SUB-TOTAL	125.000,00
I.V.A. 14%	17.500,00
TOTAL NETO	142.500,00

Son: Bs. CIENTO CUARENTA Y DOS MIL QUINIENTOS CON 00/100

FACTURA EN BOLIVARES (BS.)

Esta Factura genera Intereses de Mora Este documento va sin Enmiendas ni Tachaduras

Todo cheque devuelto tendrá una Comisión de Bs. 10.000,00 por Concepto de Recuperación y Manejo

Pago en Cheque o Depósito en Cuenta CORRIENTE, a nombre de **INSTRUMATIK C.A.**

Banco Mercantil 0105-0094-07-1094162272 Banco Venezuela 0102-0324-42-0004176943

Banco Occidental de Descuento 0116-0040-93-0003604840

INSTRUMATIK, C.A.
CANCELADO

FECHA: 19/04/2006
 MONTO: 62.500,00 + 80.000,00 es abonado
 MOTIVO: 0 5/10/2006
 FIRMADO: *[Firma]*



ELABORADO POR: DAFOINCA / NIT. 0017325361 / RIF. J-07556959-8 / RES N° GRTV/RC/96/IM/005 DEL 27-02-96 / N° DE CONTROL DESDE 21001 HASTA 26001 / FECHA 19/04/2006 / REGION CENTRAL
 DIRECCION FISCAL: URB. INDUSTRIAL CASTILLITO - CALLE 99 ENTRE AV. 68 Y 66 - PARCELA L-49 - VALENCIA - TELEFONOS: (0241) 8715348 - 8715836 - FAX: (0241) 8715080 E-mail: dafoinca@canfv.net

ORIGINAL - CLIENTE



Registrador Controlador de Presión y Temperatura



Instrumentos de medición de variables controlables del Autoclave

**Polynomial Regression Analysis: Tiempo de en versus Temperatura**

The regression equation is
 Tiempo de en = 13625,5 - 139,022 Temperatura
 + 0,357175 Temperatura**2

S = 18,7401 R-Sq = 99,9 % R-Sq(adj) = 99,8 %

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	2942100	1471050	4188,76	0,000
Error	12	4214	351		
Total	14	2946314			

Source	DF	Seq SS	F	P
Linear	1	2890338	671,262	0,000
Quadratic	1	51761	147,389	0,000

Análisis de varianza para la regresión de tiempo en función de a temperatura de operación operando el autoclave con aspersores cerrados

Polynomial Regression Analysis: Tiempo de en versus Temperatura

The regression equation is
 Tiempo de en = 46921,9 - 413,427 Temperatura
 + 0,914114 Temperatura**2

S = 57,0678 R-Sq = 97,8 % R-Sq(adj) = 97,4 %

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	1724060	862030	264,691	0,000
Error	12	39081	3257		
Total	14	1763141			

Source	DF	Seq SS	F	P
Linear	1	1385024	47,618	0,000
Quadratic	1	339036	104,103	0,000

Análisis de varianza para la regresión de tiempo en función de a temperatura de operación operando el autoclave con aspersores cerrados