



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**



**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ADUCTOS DE AMINAS  
ALIFÁTICAS O CICLOALIFÁTICAS CON RESINAS EPÓXICAS UTILIZADOS  
EN EL ÁREA DE LA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO  
INDUSTRIAL**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD  
DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

Tutor académico:  
Prof. Carlos Alvarado Almarza

Tutor Industrial:  
Lic. Nelson Adrián

Autores:  
Ahmed Osman Cabrera  
Swann C. Rodríguez G.

Valencia, 15 de agosto de 2008



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**



**MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ADUCTOS DE AMINAS  
ALIFÁTICAS O CICLOALIFÁTICAS CON RESINAS EPÓXICAS UTILIZADOS  
EN EL ÁREA DE LA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO  
INDUSTRIAL**

Tutor académico:  
Prof. Carlos Alvarado Almarza

Tutor Industrial:  
Lic. Nelson Adrián

Autores:  
Ahmed Osman Cabrera  
Swann C. Rodríguez G.

Valencia, 15 de agosto de 2008

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios que lo es todo.

A mis padres Sue y Angel por haberme cuidado, protegido, ayudado y apoyado a lo largo de toda mi vida y mi carrera, por siempre esperar lo mejor de mí, lo que me hacía esforzarme para ser cada vez mejor por mí y por ellos. Siempre me ayudaron de distintas maneras y sin ellos no hubiese alcanzado esta meta.

A mi abuela Daysi por ser una segunda madre, sus consejos y ocurrencias siempre me inspiraron; siempre has sido un ejemplo a seguir para mi por ser la mujer que eres fuerte, decidida, trabajadora y segura de ti misma. Gracias por ser tan consentidora y linda conmigo y con todos.

A mis hermanos Josue, Angel y Suzanne. A Josue por motivarme a seguir adelante en mi carrera para lograr superarme rápidamente. A Angel por ser mí mejor amigo, mi confidente y siempre tener una palabra. Finalmente a la pequeña Suzanne no se que sería de mi vida si tu no hubieras llegado, tarde pero seguro; gracias por tus ocurrencias y por ser tan graciosa, eres una niña demasiado linda e inteligente. A todos los quiero mucho.

A toda mi familia, tios, primos, abuelos, entre otros en especial a mi abuela Gerónima quien es la persona más dulce, dedicada y linda que he conocido en mi vida. Los quiero a todos y cada uno me ayudó en diferentes maneras y fueron mi inspiración en el logro de mis objetivos.

A mi prima Dayana y a mi amiga Maria Fernanda, por ser las mejores amigas que he podido tener, por siempre confiar y creer en mi y por demostrarme que yo era capaz de muchas cosas inclusive en los días tristes, por compartir mis celebraciones y mis tristezas, ustedes siempre estuvieron ahí para hacerme entender que todo siempre mejora pase lo que pase, las quiero mucho, en mi corazón son mis hermanas.

A mis amigos: Daniela, Mauro, Arnaldo, Ahmed, Anaís, William, Víctor, Carlos Daniel, Cesar, Luis, Reynaldo, María José, Ricardo, Virginia, Carlos José, María Andreina, José Luis, por estar ahí siempre cuando los necesité y por hacer mi carrera y mi vida más divertida y fácil. Siempre los tendré en cuenta.

Cleyver, me sobran las palabras que puedo decirte, de manera resumida gracias por existir y por estar a mi lado creyendo en mí, apoyándome en todas las decisiones que he tomado, aconsejándome, escuchándome, haciéndome reír y ayudándome cuando más te he necesitado. Estoy muy agradecida por haber conocido a una persona como tú, tan optimista hacia la vida a pesar de las cosas malas, me demostraste que sí se puede, gracias.

A mi amigo Ahmed por ser el mejor compañero de tesis que hubiera podido tener, gracias a ti alcance esta meta, no creo que lo hubiera hecho mejor con otra persona.

A la familia Osman Cabrera, por su apoyo, ayuda y compromiso en el desarrollo de esta investigación. Se comportaron como otra familia.

Al Prof. Carlos Alvarado por ser un tutor académico de primera, por ayudarnos siempre y orientarnos en el cumplimiento de nuestras metas, por toda la ayuda y comprensión dentro de esta investigación.

A los profesores que de alguna manera colaboraron en la realización de esta investigación: Prof. Juan Cristobal García, Prof. Angelina Correia, Prof. María Modroño, Prof. Viky Mujica, Prof. Vanessa Altomare, Lic. Mario Rossi, Prof. Zulay Niño.

Al Laboratorio de Química General por toda la ayuda ofrecida a lo largo de mis años como preparadora, gracias por todas las enseñanzas y oportunidades que me dieron, en especial a los profesores: Alfredo Castillo, Adaucio Villalobos, Morella Acosta, Lily Marcano y Reinaldo Piña.

A la empresa Immerc C.A., especialmente al Ing. Fahim Elias por permitirnos desarrollar nuestra investigación y por siempre procurar nuestro desarrollo y aprendizaje a lo largo de este trayecto.

Al Lic. Nelson Adrián por ser el mejor tutor industrial que hubiésemos podido tener, gracias a su compromiso y dedicación completamos no solo el desarrollo de esta investigación sino el aprendizaje de un sin fin de conocimientos y técnicas útiles para el resto de nuestra vida profesional.

Swann

Le doy gracias a Dios por toda la ayuda que me ha ofrecido a lo largo de mi vida y por la felicidad y unión familiar que he tenido siempre. Le doy gracias por demostrarme que lo mejor es lo que ocurre y por hacerme entender que lo mejor para uno no es siempre lo que uno desea, sino lo que la vida nos facilita a través del esfuerzo.

A mis padres, por ser lo mejor que Dios me pudo dar. Gracias por ayudarme tanto como lo siguen haciendo, por guiarme, por entenderme, por amarme; este logro es tanto mío como de ustedes. Se los agradeceré toda la vida.

A Ahmad, por ser mí hermano y mejor amigo. No tienes idea de todo lo que me has enseñado a lo largo de mi vida, y sé que lo seguirás haciendo. Gracias por todo hermano, por la ayuda y ánimo que ofreciste porque hiciste que todo esto fuese agradable.

A Elisa, por estar a mi lado cada día de mi vida en estos dos últimos años, por toda la ayuda y cariño que me has ofrecido haciéndome sonreír hasta en los peores momentos. Gracias por estar ahí, por todo lo que me has enseñado (no te imaginas cuanto). Eres única en este mundo. Simplemente gracias por estar en mi vida!

A la familia Tromba Ariemma, por ser como otra familia para mí, por ofrecerme ese gran calor familiar y hacerme sentir como en casa. Muchísimas gracias!

A mis padrinos, Mercedes Cabrera y Julián Rivero, por estar ahí atentos a lo largo de mi carrera. Gracias por toda la ayuda que me han ofrecido.

A Melissa, por ser una gran amiga incomparable. Tus experiencias y logros me han enseñado mucho, te admiro y te aprecio muchísimo. Gracias.

A Swann, por ser una excelente amiga y compañera de trabajo inigualable. Gracias por toda la comprensión y ayuda, no sabes cuánto aprendí de ti amiga. Siempre serás especial.

A mis amigos a lo largo de toda mi carrera, que de diferentes maneras me ayudaron a cumplir este logro: Mauro, Daniela, Arnaldo, Yessica, Swann, William, Luis Puerta, Reynaldo, Cesar, Víctor, Carlos Daniel, Enrique, Anais, Simón, Manuel, Nathali, Pedro, Elimes, Amévir, Gabriela, Sergio, Luis Enrique, Oscar, Junior, Diana, Henry, Pipo, Ximena entre otros.

Al Lic. Nelson Adrian, por toda atención y enseñanzas que pudo ofrecernos a lo largo de esta investigación. Por ser ofrecernos y permitirnos la realización de esta investigación y ser un excelente tutor industrial.

Al Ing. Fahim Elías, por toda su colaboración al permitirnos y ayudarnos a la realización de esta investigación.

Al Prof. Carlos Alvarado, por ser además de nuestro tutor académico, por toda la motivación, comprensión y ayuda proporcionada para la realización de esta investigación.

A profesores que de alguna manera colaboraron a la realización de esta investigación:  
Prof. Juan Cristobal García, Prof. Angelina Correia, Prof. María Modroño, Prof. Viky Mujica, Prof. Carlos García, Prof. Vanessa Altomare, Lic. Mario Rossi y la Prof. Zulay Niño.

A todos ustedes, Muchas gracias!

Ahmed

## RESUMEN

El objetivo general de esta investigación fue mejorar el proceso de fabricación de aductos de amina alifática o cicloalifática con resinas epóxicas utilizados en el área de la construcción y mantenimiento industrial. Se empleó un método de fabricación del proceso a escala de laboratorio, realizándose diferentes tratamientos mediante un diseño factorial de tres factores con dos niveles cada uno, seguido de un análisis estadístico de las variables influyentes en el proceso. Los factores considerados en este diseño fueron: control de la temperatura de reacción mediante uso de un sistema de enfriamiento, dosificación controlada de los reactivos y temperatura inicial constante del reactor. Luego se estableció un diseño del proceso a nivel de planta a partir de las condiciones obtenidas a nivel de laboratorio seguido de un estudio económico para la determinar la rentabilidad de la propuesta. A partir de las condiciones más adecuadas según el estudio estadístico se obtuvieron valores de viscosidad iguales a  $(6033 \pm 1)$  cP con aguja número 3, 10 rpm, a una temperatura igual a  $(29,2 \pm 0,1)$  °C para el aducto de amina alifática y  $(2638 \pm 1)$  cP con aguja número 3, 20 rpm, a una temperatura igual a  $(28,8 \pm 0,1)$  °C para el aducto de amina cicloalifática. En el diseño industrial se seleccionaron los siguientes equipos: reactor-mezclador con chaqueta, calentador por inmersión, tanque elevado para dosificación por gravedad y un equipo de bombeo para el sistema de enfriamiento. El diseño propuesto resultó rentable obteniéndose un valor actual y un equivalente anual mayores a cero, y una tasa interna de retorno mayor a la tasa mínima de retorno. El valor actual obtenido para el diseño correspondiente a la fabricación del aducto de amina alifática fue igual a 1268943,34 \$ y de 1207793,63 \$ con respecto al aducto de amina cicloalifática. Se recomienda incorporar un sistema de control automatizado para el sistema de enfriamiento y dosificación de los reactivos.

**Palabras claves:** aducto, amina, viscosidad, diseño, condiciones.

## ABSTRACT

The main objective of this research was to improve the manufacturing process of aliphatic amine adducts or cicloaliphatic with epoxy resins used in the construction and industrial maintenance. Using a method of manufacturing process at the laboratory, performing different treatments through a factorial design of three factors with two levels each, followed by a statistical analysis of the variables influential in the process. The factors considered in this design were: controlled temperature reaction using a cooling system, controlled dosage of reagents and constant initial temperature of the reactor. It was established a design process at the plant from the conditions obtained at the laboratory followed by an economic study to determine the profitability of the proposal. Based on the most suitable conditions according to the statistical study were obtained viscosity equals to  $(6033 \pm 1)$  cP needle number 3, 10 rpm, a temperature equal to  $(29.2 \pm 0.1)^\circ \text{C}$  for the aliphatic amine adduct and  $(2638 \pm 1)$  cP needle number 3, 20 rpm, at a temperature equal to  $(28.8 \pm 0.1)^\circ \text{C}$  for the cicloaliphatic amine adduct. For the industrial process were selected: reactor-mixer with jacket, immersion heater, elevated tank for gravity dosage and pumping equipment for the cooling system. The proposed design was profitable obtaining a current value and an annual equivalent greater than zero, and an internal rate of return higher than the minimum rate of return. The current value obtained for the designs of the manufacture of aliphatic amine adduct was equal to \$ 1301982.91 and \$ 1244665.20 for the corresponding cicloaliphatic amine adduct. It is recommended to incorporate an automated control system for the cooling system and dosage of reagents.

**Keywords:** adduct, amine, viscosity, design, conditions.

## INDICE GENERAL

	<b>Página</b>
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción del problema.....	3
1.2. Formulación del problema.....	8
1.3. Objetivos.....	10
1.4. Justificación.....	11
1.5. Limitaciones.....	12
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	13
2.1. Antecedentes.....	13
2.2. Definición de términos.....	18
2.3. Polímeros.....	19
2.4. Resinas epóxicas.....	20
2.5. Aminas.....	28
2.6. Agentes curantes.....	30
2.7. Aductos de amina.....	38
2.8. Aplicación industrial de los aductos de amina.....	42
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	44
3.1. Identificación del proceso de la fabricación de los aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas.....	44
3.2. Caracterización los aductos obtenidos, para así conocer las propiedades a variar durante el proceso.....	49
3.3. Selección de las variables que influyen directamente en la síntesis de los aductos.....	54
3.4. Estudio las variables seleccionadas del proceso.....	55
3.5. Diseño experimental del proceso de fabricación de aductos de aminas...	66

3.6. Estimación de los costos y beneficios de la propuesta mejorada para la factibilidad del proyecto.....	73
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>85</b>
4.1. Características relevantes del proceso actual y propiedades de los aductos preparados en el mismo.....	85
4.2. Variables seleccionadas del proceso que afectan las características físicas y la funcionalidad de los aductos obtenidos y factores e interacciones más influyentes.....	98
4.3. Diseño y evaluación económica del proceso.....	120
4.4. Factibilidad de la investigación.....	142
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>154</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>158</b>
<b>APÉNDICE A: TABLA DE DATOS.....</b>	<b>163</b>
<b>APÉNDICE B: CÁLCULOS TÍPICOS.....</b>	<b>214</b>
<b>APÉNDICE C: CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE TUBERIAS.....</b>	<b>245</b>
<b>APÉNDICE D: DISTRIBUCIÓN F Y DISTRIBUCIÓN NORMAL.....</b>	<b>252</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.1	Diagrama de bloques del proceso para la formación de un aducto de aminas alifáticas y cicloalifáticas resinas epóxicas.....	5
1.2	Reacciones presentes para el tratamiento de una resina epóxica.....	7
2.1	Configuración de los distintos tipos de aminas alifáticas.....	29
2.2	Mecanismo de reacción en cadena para la generación de ión alcóxido.....	32
2.3	Complejo activado.....	32
2.4	Complejo activado con grupos epóxicos.....	33
2.5	La reacción de las cantidades equivalentes de epoxi e hidroxilo sin catalizador, indica que el orden de reacción es alcohol primario > secundario > terciario.....	34
2.6	La velocidad de los catalizadores de base de Lewis en reacciones de epoxi-hidroxilo es función de la concentración del alcohol.....	34
2.7	Anión generado a partir de una base y el grupo epóxico.....	35
2.8	Reacción entre las bases inorgánicas con grupos epóxidicos a través de la base fácilmente ionizable.....	35
2.9	Anión generado a partir de una base y el grupo epóxico.....	36
2.10	Tasa de reactividad relativa de diferentes hidrógenos donados y su influencia en la reacción de adición de una amina secundaria y un grupo epóxidico.....	36
2.11	Transferencia de protones entre el grupo dador y el grupo hidróxilo	37
2.12	Reacción de la amina secundaria.....	38
2.13	Aducto isoforondiamina (IPDA).....	39
2.14	Formación de carbamatos.....	39
2.15	Reacción del aducto de amina entre el líquido epóxico y una poliamina alifática.....	40
3.1	Esquema del montaje experimental.....	57

3.2	Arreglo factorial de los tratamientos considerados en el diseño experimental para el aducto de aminas alifáticas.....	58
3.3	Arreglo factorial de los tratamientos considerados en el diseño experimental para el aducto de aminas cicloalifáticas.....	59
4.1	Perfil de temperatura para el aducto con amina alifática.....	87
4.2	Perfil de temperatura para el aducto con amina cicloalifática.....	87
4.3	Diagrama causa-efecto de todas las variables que afectan en la fabricación de los aductos de aminas.....	93
4.3.1	Diagrama causa-efecto las variables seleccionadas que afectan al proceso de fabricación de los aductos de aminas.....	98
4.4	Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo de reacción para el arreglo seleccionado del aducto de amina alifática.....	103
4.5	Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo de reacción para el arreglo seleccionado del aducto de amina cicloalifática.....	103
4.6	Viscosidades del aducto de amina alifática para cada uno de los tratamientos y sus respectivas réplicas.....	104
4.7	Viscosidades del aducto de amina cicloalifática para cada uno de los tratamientos y sus respectivas réplicas.....	106
4.8	Representación cúbica de la viscosidad promedio del aducto de amina alifática para todos los tratamientos diferentes.....	106
4.9	Representación cúbica de la viscosidad promedio del aducto de amina cicloalifática para todos los tratamientos diferentes.....	107
4.10	Efectos principales sobre la viscosidad del aducto de amina alifática.....	109
4.11	Interacción doble entre la temperatura inicial del reactor (T) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina alifática (manteniendo constante uno de los niveles en el sistema de enfriamiento).....	111

4.12	Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la temperatura inicial del reactor (T) sobre la viscosidad del aducto de amina alifática (manteniendo constante uno de los niveles en la velocidad de dosificación de la resina).....	111
4.13	Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina alifática (manteniendo constante uno de los niveles en la temperatura inicial del reactor.....	112
4.14	Efectos principales sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática.....	112
4.15	Interacción doble entre la temperatura inicial del reactor (T) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática (manteniendo constante uno de los niveles en el sistema de enfriamiento).....	113
4.16	Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la temperatura inicial del reactor (T) sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática (manteniendo constante uno de los niveles en la velocidad de dosificación de la resina).....	114
4.17	Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática.....	114
4.18	Probabilidad normal de los residuos sobre la viscosidad del aducto de amina alifática.....	115
4.19	Probabilidad normal de los residuos sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática.....	116
4.20	Perfil de temperatura con respecto al tiempo para el aducto de amina alifática a las condiciones seleccionadas.....	117
4.21	Perfil de temperatura con respecto al tiempo para el aducto de amina cicloalifática a las condiciones seleccionadas.....	118
4.22	Comportamiento de la producción anual de aducto de amina alifática base de Imerkote®.....	123

4.23	Comportamiento de la producción anual de aducto de amina cicloalifática base de Imerlux®.....	123
4.24	Diagrama de bloques del proceso para la formación de un aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas.....	130
4.25	Dimensiones del reactor mezclador enchaquetado.....	131
4.26	Diagrama de flujo del proceso para la fabricación de aductos de aminas.....	132
4.27	Curva de calentamiento de la amina alifática.....	134
4.28	Linealización de la curva de calentamiento de la amina alifática.....	135
4.29	Layout del área de producción de Immerc C.A.....	142
4.30	Representación gráfica de la rentabilidad de la propuesta con respecto al precio de venta del producto correspondiente al aducto de amina alifática.....	153
4.31	Representación gráfica de la rentabilidad de la propuesta con respecto al precio de venta del producto correspondiente al aducto de amina cicloalifática.....	153
C.1	Dimensiones, capacidades y pesos de tuberías normalizadas de acero.....	245
C.2	Rugosidad relativa en función del diámetro para tubos de varios materiales.....	246
C.3	Comportamiento del factor de fricción como una función del número de Reynolds y la rugosidad relativa.....	247
C.4	Valores de longitudes equivalentes y de coeficientes de fricción para diversos accesorios.....	248
C.5	Diámetro económico para tuberías de acero comercial catálogo 40...	250
C.6	Propiedades del agua líquida.....	251
D.1	Distribución normal estándar acumulada.....	252
D.2	Puntos porcentuales de la distribución F. ....	254

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
2.1	Ventajas y desventajas de las aminas alifáticas.....	29
2.2	Ventajas y desventajas de las aminas cicloalifáticas.....	30
3.1	Factores a considerar en el diseño experimental.....	56
3.2	Factores e interacciones involucrados en el análisis de varianza.....	61
3.3	Total de la suma de los valores de la variable de respuesta para los tratamientos correspondientes al aducto de amina alifática.....	61
3.4	Total de la suma de los valores de la variable de respuesta para los tratamientos correspondientes al aducto de amina cicloalifática.....	62
3.5	Ecuaciones empleadas para la determinación de los contrastes asociados a cada uno de los factores e interacciones.....	63
3.6	Matriz de identificación de los niveles correspondientes a cada uno de los factores en los diferentes tratamientos.....	65
3.7	Horas laborales al año.....	79
3.8	Tarifa de impuesto sobre la renta.....	82
4.1	Propiedades físicas del aducto con amina alifática aplicando el método actual.....	88
4.2	Propiedades físicas del aducto con aminas cicloalifáticas aplicando el método actual .....	89
4.3	Viscosidad de aducto de amina alifática para diferentes lotes preparados en la empresa Immerc C.A.....	90
4.4	Viscosidad de aducto de amina cicloalifática para diferentes lotes preparados en la empresa Immerc C.A.....	91
4.5	Matriz de selección de las variables más influyentes en el proceso para la fabricación de los aductos de aminas.....	95
4.6	Valores de viscosidad obtenidos para el aducto de amina alifática (teta) en los diferentes modos de preparación.....	99
4.7	Valores de viscosidad obtenidos para el aducto de amina cicloalifática en los diferentes modos de preparación.....	99

4.8	Viscosidad del aducto de amina alifática obtenida a diferentes condiciones de temperatura inicial del reactor, sistema de enfriamiento y velocidad de dosificación de la resina epóxica.....	101
4.9	Viscosidad del aducto de <i>amina cicloalifática</i> obtenida a diferentes condiciones de temperatura inicial del reactor, sistema de enfriamiento y velocidad de dosificación de la resina epóxica.....	102
4.10	Aplicación del análisis de varianza en los datos obtenidos a partir de los tratamientos correspondientes al aducto de aminas alifáticas.....	108
4.11	Aplicación del análisis de varianza en los datos obtenidos a partir de los tratamientos correspondientes al aducto de aminas cicloalifáticas...	109
4.12	Condiciones obtenidas en la preparación de los aductos.....	117
4.13	Propiedades físicas del aducto con amina alifática a las condiciones seleccionadas.....	119
4.14	Propiedades físicas del aducto con amina cicloalifática a las condiciones seleccionadas.....	119
4.15	Porcentaje de clientes que han usado alguna vez Imerkote® o Imerlux®.....	121
4.16	Frecuencia con que los clientes adquieren Imerkote® o Imerlux®.....	121
4.17	Cantidad de juegos que los clientes adquieren de Imerkote® o Imerlux®.....	122
4.18	Comparación entre el consumo y costo de los productos fabricados por Immerc c.a. con respecto a la competencia.....	125
4.19	Volumen del reactor mezclador enchaquetado.....	133
4.20	Calentamiento con respecto al tiempo de la amina alifática.....	134
4.21	Tiempo de calentamiento de la amina alifática y coeficiente global de transferencia de calor.....	135
4.22	Coeficiente global de transferencia de calor combinado para el aducto de amina alifática durante el proceso de enfriamiento.....	136
4.23	Coeficiente global de transferencia de calor combinado para el aducto de amina cicloalifática durante el proceso de enfriamiento.....	137

4.24	Coeficiente global de transferencia de calor combinado promedio y tiempo de enfriamiento para el aducto de amina alifática y cicloalifática	138
4.25	Potencias requeridas para el calentador por inmersión y la bomba centrífuga.....	140
4.26	Datos de diseño del sistema de agitación del reactor.....	140
4.27	Dimensiones de los tanques de agua y resina.....	141
4.28	Resultados relacionados con la determinación de la inversión inicial del proyecto.....	143
4.29	Costo de venta de los productos.....	143
4.30	Producción e ingresos brutos para cada uno de los aductos en el periodo de vida del proyecto.....	144
4.31	Resultados relacionados a la determinación de los costos operativos para el aducto de amina alifática en el periodo de vida del proyecto.....	145
4.32	Resultados relacionados a la determinación de los costos operativos para el aducto de amina cicloalifática en el periodo de vida del proyecto.....	146
4.33	Depreciación acumulada y valor en libro de los activos fijos tangibles presentes en el proceso de fabricación de los aductos en el periodo de vida del proyecto.....	147
4.34	Amortización de los activos fijos intangibles de los aductos en el periodo de vida del proyecto.....	148
4.35	Impuesto sobre la renta para el aducto de amina alifática en el periodo de vida del proyecto.....	148
4.36	Impuesto sobre la renta para el aducto de amina cicloalifática en el periodo de vida del proyecto.....	149
4.37	Flujos monetarios totales para el aducto de amina alifática en el periodo de vida del proyecto.....	150
4.38	Flujos monetarios totales para el aducto de amina cicloalifática en el periodo de vida del proyecto.....	151
4.39	Índices de rentabilidad con respecto al proyecto de inversión del aducto de amina alifática.....	152

4.40	Índices de rentabilidad con respecto al proyecto de inversión del aducto de amina cicloalifática.....	152
A.1	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas según el proceso actual.....	163
A.2	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas según el proceso actual.....	165
A.3	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina.....	166
A.4	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina.....	169
A.5	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la amina sobre la resina.....	171
A.6	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento toda la amina sobre la resina.....	174
A.7	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de resina sobre amina.....	176
A.8	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de resina sobre amina.....	178
A.9	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de amina sobre resina.....	179

A.10	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de amina sobre resina.....	182
A.11	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N°1.....	183
A.12	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 1.....	186
A.13	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 2.....	187
A.14	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 2.....	188
A.15	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 3.....	190
A.16	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 3.....	192
A.17	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 4.....	193
A.18	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 4.....	196
A.19	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 5.....	197

A.20	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 5.....	199
A.21	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 6.....	201
A.22	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 6.....	203
A.23	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 7.....	205
A.24	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 7.....	207
A.25	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8.....	208
A.26	Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8.....	212
B.1	Coeficiente de pérdidas y longitud equivalente de diferentes accesorios utilizados en el circuito de enfriamiento.....	233
B.2	Coeficiente de pérdidas y de los diferentes accesorios utilizados en la chaqueta de enfriamiento.....	234
B.3	Costos de los equipos principales.....	236
B.4	Cantidad y costo por unidad de los accesorios y tuberías.....	236
B.5	Costo del producto final por kilogramo del mismo.....	237
B.6	Costos de toda la materia prima empleada en esta investigación.....	239
B.7	Características en el envasado y etiquetado de los aductos.....	239
B.8	Costos de los servicios.....	240

B.9 Energía consumida por los equipos eléctricos..... 241

## **INTRODUCCIÓN**

Hoy en día los productos a base de resinas epóxicas son ampliamente utilizados tanto en la industria como el campo doméstico. Esto despierta el interés de las industrias creadoras de estos productos en el tema de mejorar la fabricación de los mismos, así como también involucrar nuevas tecnologías y nuevas opciones en el mercado de modo de satisfacer una gran cantidad de clientes. Uno de los tantos productos a base de resinas epóxicas son las llamadas pinturas para pisos industriales, las cuales son usadas ampliamente por la empresas ya que poseen una alta resistencia química, resistencia a temperaturas altas y resistentes al tráfico pesado entre otros. También existen pinturas a base de resinas epóxicas utilizadas para la prevención de corrosión extrema, protección a la humedad, así como también utilizadas ampliamente en ambientes donde se requiere alto nivel de higiene como lo son hospitales.

Todos estos productos son bicomponentes, formados por una parte epóxica propiamente dicha y una parte que actúa como un agente curante. Las aminas son utilizadas como agentes curantes para estos productos, ocurriendo una reacción de polimerización durante la aplicación del mismo, realizada por el usuario. La reacción de polimerización con amina pura sucede de manera muy violenta provocando resultados con características desviadas a lo establecido para un producto de alta calidad. Para ello se hace uso de un compuesto menos reactivo con características similares a la amina pura, esto es, el aducto de amina. Este último proporciona resultados satisfactorios con una calidad elevada dentro sus usos.

Los aductos de amina deben presentar entre otras características, viscosidades bajas por lo que se debe tener sumo cuidado durante la fabricación de los mismos. Las características apropiadas del producto final dependen, en su mayoría de las viscosidades de los aductos, esto es debido a que a viscosidades altas se dificulta la homogenización de los reactivos para la aplicación, obstaculizando la liberación de burbujas de aire que se presentan durante la homogenización de los mismos. Esto hace

que el producto final una vez polimerizado pierda entre otras, resistencia mecánica debido a la presencia de aire en su interior.

Es por esto que a nivel industrial las empresas fabricantes de dichos productos tienen la necesidad de poseer un método de fabricación donde los resultados estén dentro de las especificaciones que conlleven a productos de alta calidad así como también éstas sean constantes lote a lote de producción.

Dicha necesidad trajo como consecuencia la realización de esta investigación cuyo objetivo general fue mejorar el proceso de fabricación de aductos de amina alifática o cicloalifáticas con resinas epóxicas utilizados en el área de la construcción y mantenimiento industrial.

## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

*A continuación se presenta una descripción detallada del problema que se persigue resolver con el presente trabajo, así como la situación actual del proceso y la situación deseada del mismo, los objetivos planteados, la justificación y limitaciones de la investigación a realizar.*

#### 1.1. Descripción del problema

Immerc C.A. Industria Multimanufacturera de Sistemas Epóxicos y Resinas para la Construcción es una empresa venezolana del sector químico orientada a la fabricación de productos especiales para el mantenimiento industrial. Está ubicada en la Zona Industrial Carabobo, en Valencia, en el galpón 3 del Centro Industrial Carabobo. Dicha empresa está enfocada a la fabricación de productos de excelente calidad, reconocida a nivel nacional, ofreciendo además asesoría técnica especializada de acuerdo a las necesidades de los clientes, en las áreas de la construcción y el mantenimiento industrial. Esta industria cada día se preocupa por buscar nuevas soluciones y fabricar productos que garanticen soluciones y satisfagan las necesidades más diversas.

La empresa Immerc C.A. elabora gran variedad de productos tales como: recubrimientos epóxicos, protectores de superficies, selladores, acabados para pisos industriales, recubrimientos impermeables, frisos higiénicos, entre otros. La demanda principal va dirigida hacia industrias químicas, farmacéuticas y alimenticias así como también en hospitales y áreas que ameritan elevada condición de higiene; también pueden ser aplicados o utilizados en almacenes, galpones, talleres mecánicos, edificaciones industriales, tanques, tuberías, etc.

Entre los productos fabricados y con mucha aceptación en el mercado están los acabados epóxicos, los cuales son destinados a recubrimientos autonivelantes para pisos industriales, decorativos y resistentes en pisos con alto tránsito. Sirven también para recubrimientos de tanques y superficies de alta necesidad de higiene,

reparación de muros, tubos, tanques bajo agua, etc. Debido a su apariencia final, se elaboran recubrimientos epóxicos de alto brillo utilizados como decoración para pisos industriales en zonas con tráfico normal a medio, oficinas, zonas comerciales y en áreas que requieren elevada condición de higiene, sanidad y belleza tales como: laboratorios farmacéuticos, fábricas de bebidas, industrias de alimentos y hospitales. Todos estos productos son bicomponentes, formados por una parte epóxica propiamente dicha y una parte que actúa como un agente curante. Para efectuar la aplicación del producto, se mezclan ambos componentes y se precede a su aplicación.

Un agente curante es un producto químico puro o mezclado, que cuando se añade a una sustancia, reacciona con ella, y la convierte en un polímero con nuevas características. Los sistemas industriales que utilizan endurecedores son: sistemas de resinas epoxídicas, sistemas de poliésteres insaturados, isocianatos, vulcanización del caucho, entre otros.

Para que la aplicación sea la más adecuada, es necesario que la mezcla resultante presente viscosidades no mayores a 14000 cP. La viscosidad final del producto a comercializar se ve afectada por la viscosidad del curante, el cual se produce a partir del aducto de amina objeto de la presente investigación.

La razón para elaborar un aducto con amina alifática o cicloalifática es que se obtiene un agente curante que tiene reactividad más controlada que las aminas puras, permitiendo que los productos finales sean mejores para trabajar.

Debido a que el proceso de elaboración del aducto de amina que se lleva a cabo actualmente, carece de límites de control adecuados para su preparación, se tiene como consecuencia la variación constante de las propiedades del mismo, siendo la de mayor interés la viscosidad.

El proceso de elaboración del aducto de aminas alifáticas o cicloalifáticas con un sistema epóxico de peso molecular medio es por lote y consta de varias etapas:

acondicionamiento del sistema, pesada de la materia prima, dosificación de la materia prima al sistema conjuntamente con la reacción orgánica para la formación del aducto y finalmente la descarga; tal como se muestra en la figura 1.1. En la etapa de acondicionamiento del sistema se verifican las condiciones y limpieza de los equipos, tales como los tanques con sistema de agitación y el agitador para los cuales es importante chequear que se encuentren bien secos. El paso siguiente es la pesada de la materia prima, la cual está conformada por la resina epóxica de peso molecular medio, la amina alifática o cicloalifática y el diluyente reactivo; esta etapa se ejecuta de forma manual por parte del personal operario el cual conoce la cantidad necesaria para cada carga. Una vez terminada la pesada se lleva a cabo la dosificación de la materia prima, la cual se realiza de manera diferente dependiendo de la amina a utilizar.

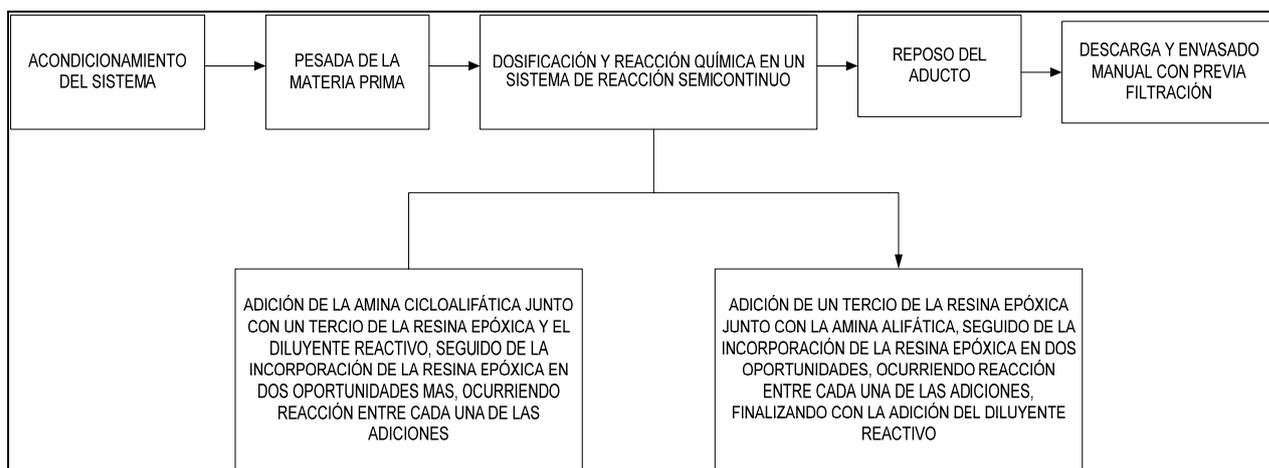


Figura 1.1. Diagrama de bloques del proceso para la formación de un aducto de aminas alifáticas y cicloalifáticas resinas epóxicas.

En la etapa de dosificación, en el proceso que involucra la amina cicloalifática se agrega inicialmente un tercio de la resina epóxica y el diluyente reactivo, mezclándose ambos en el tanque para luego agregar la amina cicloalifática completamente; la resina se dosifica al tanque de forma parcial en tres tandas, resultando un tiempo total de producción de un lote aproximadamente de tres días. Ahora bien con respecto a la amina alifática se agrega inicialmente la amina y un tercio de la resina epóxica mezclándose por un tiempo determinado en el tanque, luego se dosifica dos veces más la resina epóxica finalizando con la incorporación

del diluyente reactivo realizando la producción en un tiempo total de aproximadamente tres días tal como se muestra en la figura 1.1.

Cabe destacar que el diluyente reactivo no es más que un solvente que se incorpora a la mezcla debido a las altas viscosidades de los aductos de aminas, por lo tanto no forma parte de la reacción. Dicha viscosidad se reduce con el uso de los compuestos antes mencionado o se modifica también con el uso de plastificantes (tal como el alcohol bencílico), esto sin alterar los grupos epóxicos reactivos (Matta & Rufo, 2008).

El sistema de reacción empleado es de tipo semicontinuo ya que se dosifica la materia prima y existe un tiempo de reacción, para luego finalizar con la descarga del mismo.

La dosificación de la amina se realiza en varias etapas debido a que la reacción para la formación del aducto es muy exotérmica por lo tanto se garantiza que la temperatura no se eleve a límites incontrolables, lo cual pudiera ocasionar accidentes en las instalaciones y daños a los operarios. El proceso a altas temperaturas también tiene como consecuencia una variación considerable en las propiedades fisicoquímicas del aducto especialmente la viscosidad; también se ve influenciado el rendimiento del proceso debido a que a estas condiciones ocurre la evaporación de algunos compuestos como por ejemplo las aminas, obteniéndose propiedades muy diferentes en cada lote lo cual conlleva a un proceso de fabricación inestable.

El aumento considerable en la viscosidad afecta directamente los costos de los productos elaborados con el aducto, ya que cuando se tienen viscosidades muy altas es necesario hacer uso de una mayor cantidad de solventes, aditivos de nivelación y control de flujo con la finalidad que el producto final sea manejable y que la aplicación sea la adecuada. Cabe destacar que si el producto final posee alta viscosidad, deja de ser autonivelante y su acabado no es el de una superficie lisa, de alto brillo y belleza.

En el proceso de la formación de un aducto empleando una amina cicloalifática, se dosifica una resina epóxica en el reactor, inmediatamente se mezcla con un diluyente reactivo, con la finalidad de disminuir la viscosidad de la resina, esto se hace aproximadamente por veinte minutos; una vez creada las condiciones apropiadas se agrega al mismo reactor la amina cicloalifática, quien es el agente curativo del proceso, es decir, mejora las propiedades mecánicas de la resina y proporciona una mayor resistencia química.

Durante la reacción mencionada anteriormente el hidrógeno activo de la amina primaria reacciona con un grupo epóxico para formar una amina secundaria y esta última reacciona con un grupo epóxico para finalizar el tratamiento de la resina epóxica, entonces la amina terciaria resultante polimeriza grupos epóxicos obteniendo así el aducto. Las reacciones que ocurren se muestran en la figura 1.2.

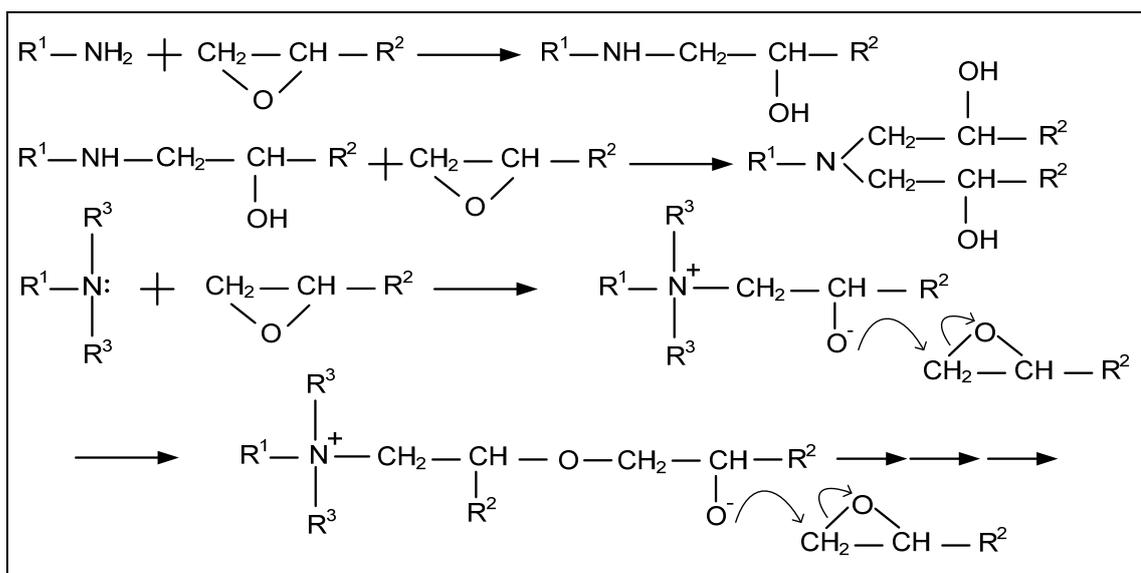


Figura 1.2. Reacciones presentes para el tratamiento de una resina epóxica.

Fuente: Wade, 2006.

Ahora bien, este aducto posee un peso molecular alto, es menos volátil y presenta menos olores penetrantes, es menos tóxico y menos exotérmico con respecto a las aminas, es decir, si el aducto no se preparara previamente y la reacción se realizara directamente entre la amina y la resina, la combinación de estos dos compuestos resulta en una reacción muy violenta y exotérmica, así como también el producto

obtenido no presenta las mismas propiedades mecánicas y físicas que se buscan con la fabricación del aducto. El producto que se forma con la amina alifática tiene características semejantes, sin embargo tiene algunas variaciones en el proceso tales como las descritas anteriormente, el diluyente reactivo agregado al final sirve como solvente para disminuir viscosidad.

Es importante señalar que el proceso descrito anteriormente es llevado a cabo de manera manual, donde la dosificación tiene que hacerse en horas laborales para garantizar el cumplimiento de la dosificación, impidiendo así acortar el tiempo entre cada una de las cargas y por lo tanto se tiene un intervalo de tiempo entre cada una de las dosificaciones que no es exacto. Simplemente se busca garantizar una disminución considerable de temperatura la cual sea apropiada para la próxima dosificación impidiendo así el aumento de la temperatura. Debido a esto el proceso consume una gran cantidad de horas-hombres ya que se requiere la atención y dedicación de un grupo de personas para dicha labor, lo que se traduce en costos operativos que son representativos para la empresa, quien tiene un gran interés de poder disminuirlos por medio de la implementación de un nuevo diseño del proceso donde el tiempo de producción por cargas sea menor, la temperatura se pueda controlar de una manera eficaz y que las propiedades fisicoquímicas no sean variantes lote a lote para así obtener el producto óptimo requerido. En resumen, el proceso llevado a cabo actualmente es largo, sujeto a altos riesgos para el personal operario, susceptible a errores y poco rentable.

Finalmente se procura realizar un mejoramiento en la fabricación de aductos con el fin de poder estabilizar la viscosidad del producto final para cada lote de producción. Unido a esto, se reducirá el tiempo de producción ya que existirá un sistema estabilizado que conlleva a una dosificación de reactivos de forma más continua.

## **1.2. Formulación del problema**

El proceso para fabricar un aducto de aminas alifáticas y cicloalifáticas con resinas epóxicas de peso molecular medio empleado en Immerc C.A. se ejecuta de una manera manual, es decir, las variables involucradas en el proceso carecen de un

sistema de control apropiado ya que el mismo es elaborado por el personal operario, sin contar con equipos apropiados que permitan la eficiencia del proceso; como consecuencia de esto se tiene un producto con viscosidades muy distintas lote a lote de producción, así como también un tiempo elevado de producción y altos costos operativos.

Tomando en cuenta lo descrito, se plantea mejorar el proceso de fabricación de aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas en dicha empresa, procurando así obtener un producto con una viscosidad que se encuentre dentro de unos límites, que se desean establecer, lote a lote de producción y por ende una disminución en el tiempo de fabricación de los aductos.

### **1.2.1 Situación actual**

El proceso actual de la industria Immerc C.A. consta de un sistema abierto al ambiente con dosificación de la materia prima manualmente, el cual carece de un sistema de control térmico. La temperatura es controlada actualmente dejando en reposo el sistema para garantizar una disminución de ésta y llegar a un valor adecuado seguro para el personal operario tomando un tiempo de producción aproximado de tres días. Las variaciones de temperatura ocasionan cambios en las propiedades fisicoquímicas del aducto resultante, el cambio más notable se da en la viscosidad del mismo, ya que varía notablemente lote a lote. Todo el proceso es realizado manualmente elevando los costos de producción y por ende el precio final del producto.

El rendimiento del proceso que se lleva a cabo está alrededor de 98% y a pesar de ser un valor relativamente alto, no se obtiene un 100 % ya que el resto se debe a pérdidas por evaporación de la amina o agua debidas a las condiciones extremas de temperaturas de operación.

### **1.2.2 Situación deseada**

Al concretar un proceso mejorado para la fabricación de aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas en la empresa Immerc. C.A. se establecen

ciertos límites de estandarización en las propiedades fisicoquímicas del producto final y en la funcionabilidad del mismo; así como también se reduce el tiempo de producción y los costos operativos. Con esto se garantiza que el rendimiento del proceso se mantenga igual al que se tiene actualmente así como también la disminución en las pérdidas monetarias debido a las variaciones de las propiedades por lotes del aducto.

En el alcance de la investigación se analizarán y se estudiarán diferentes métodos de fabricación de los aductos así como también aquellas variables involucradas que influyen en el producto final del proceso, esto es, se llevarán a cabo diferentes ensayos y reacciones químicas a nivel de laboratorio, logrando con estas experiencias recopilar y examinar las diferentes condiciones de operación del sistema, concluyendo con un proceso mejorado y una evaluación económica del mismo, más no con su implementación.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Mejorar el proceso de fabricación de aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas utilizados en el área de la construcción y mantenimiento industrial.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Identificar el proceso de fabricación de los aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas, con el fin de conocer el proceso actual.
2. Caracterizar los aductos obtenidos, para así conocer las propiedades a variar durante el proceso.
3. Seleccionar las variables que influyen directamente en la síntesis de los aductos con la finalidad de descartar aquellas que no afecten las propiedades de los productos finales.
4. Estudiar las variables seleccionadas del proceso, que afectan las características físicas y la funcionalidad de los aductos obtenidos con el propósito de controlar las mismas mediante modificaciones pertinentes.

5. Diseñar un proceso a escala de laboratorio para la fabricación de los aductos que perfeccione las características funcionales y físicas, con la finalidad de aumentar la calidad de los mismos.
6. Estimar los costos y beneficios de la propuesta mejorada con la finalidad de determinar la factibilidad de la misma.

#### **1.4 Justificación**

El proceso de fabricación del aducto de aminas alifáticas o cicloalifáticas llevado a cabo actualmente por la empresa Immerc C.A. se desea mejorar con el fin de obtener un método de producción en el cual se obtengan aductos con propiedades y características fisicoquímicas semejantes lote a lote de producción, así como también disminuir los riesgos tanto de los equipos como al personal operario durante el proceso, y el tiempo de producción que se lleva a cabo, ya que actualmente dichos productos son de gran rentabilidad para la empresa, y cada día aumenta su venta lo que es un excelente panorama para la misma. Con un diseño adecuado se podría garantizar la calidad y funcionalidad lote a lote, brindando satisfacción al cliente y evitando reclamos por fallas del producto.

Por otro lado la empresa Immerc C.A. tiene entre sus objetivos principales contribuir con la conservación del medio ambiente, por lo que se ven beneficiados con la elaboración de un mejor diseño de producción donde se toma en cuenta el entorno. Con este diseño se persigue disminuir notablemente los vapores tóxicos emanados por las elevadas temperaturas a la que se puede llegar durante el proceso de fabricación, los cuales actualmente no se encuentran bajo control (carecen de chimeneas para el control de emisiones gaseosas).

Desde el punto de vista académico, la presente investigación es muy importante para la Universidad de Carabobo y de gran ayuda en el área de Ingeniería Química ya que fortalece las bases en lo que respecta a la química orgánica, y tiene una estrecha relación con los procesos químicos industriales y el diseño de los mismos. Esta investigación sirve como base para investigaciones posteriores.

Finalmente con esta investigación se quieren adquirir conocimientos, técnicas y procedimientos que favorezcan el desarrollo profesional de los autores, sirviendo como experiencia para los siguientes desafíos que se puedan presentar a lo largo de toda el desempeño profesional.

### **1.5. Limitaciones**

Una de las limitaciones más relevantes hasta es la falta de información actualizada sobre el tema en específico y la confidencialidad de la información manejada y utilizada, ya que la empresa debe mantener una cierta privacidad con respecto a sus procesos debido a que cualquier información relevante puede ser de gran utilidad en el ámbito competitivo. Esto conlleva a que se pudiera encontrar algunas restricciones que pudieran limitar una correcta ejecución de la investigación, de modo que se retrase el tiempo de culminación de la misma.

## CAPÍTULO II

### MARCO REFERENCIAL

*En esta sección se presentan los trabajos y proyectos científicos, así como también las nociones teóricas que sirven de apoyo para el desarrollo de la investigación y el logro de los objetivos planteados*

#### **2.1. Antecedentes.**

Investigaciones de Hsi-chuan & Souichi (1997) relatan que, un agente curante para resinas epóxicas es preparado partiendo de una amina y un sistema epóxico, cuya estructura es modificada utilizando un compuesto de polisocianato, para obtener un agente curante en forma de partículas esféricas. Estas partículas pueden ser tan pequeñas como 0.1  $\mu\text{m}$ . Dicha característica permite que el agente pueda dispersarse fácilmente en la mezcla y que las propiedades curantes se mantengan estables inclusive en su almacenamiento. El resultado es un compuesto con propiedades que presentan un amplio rango de aplicaciones, incluyendo el área de adhesivos eléctricos y automovilísticos.

El objetivo general de esta investigación fue proponer la invención de un prototipo de reactor por cargas para la preparación de agentes curantes, a partir de un grupo amino y un grupo epóxico, donde la compatibilidad con la resina epóxica fuera excelente, así como también que prometiera propiedades al agente curante tales como: tratamientos a viscosidades bajas, una tasa curativa rápida, entre otras. Tomando en cuenta los resultados obtenidos los investigadores llegaron a la conclusión que la invención de este reactor era un gran aporte para la mejora de las propiedades de los agentes curativos ya que las composiciones curables resultantes tenían un gran campo de aplicación.

Este antecedente presenta similitud con la investigación realizada, en la preparación del aducto o agente curante ya que parten igualmente de una amina y una resina epóxica y

a su vez el producto resultante se emplea como recubrimiento industrial. Cabe destacar que los aductos de aminas son agentes curantes. La principal discrepancia es que en este antecedente se propuso el diseño de un nuevo reactor para la fabricación de aductos y en el caso de la investigación desarrollada se quiere mejorar el proceso actual partiendo de un sistema de reacción ya establecido.

En la investigación de Caléis, De Cook, Kincaid, Pascale, Van Poppel et.al. (2002), los agentes curantes convencionales a base de aminas con baja viscosidad, tienen grupos aminos primarios que cuando son almacenados o utilizados en condiciones de curado a bajas temperaturas o en ambientes con alta humedad producen a la final productos curantes con efectos no deseados. Este fenómeno es el resultado de la reacción de la amina primaria con el dióxido de carbono y la humedad presente en el aire y produce lo que se conoce como carbamatos. Una solución técnica para evitar esta formación fue encontrada utilizando aductos de aminas con sistemas epóxicos o poliamidas lo cuales tienen la propiedad de ser menos reactivo con el dióxido de carbono.

Esta investigación tuvo como objetivo principal elaborar un agente curativo para resinas epóxicas que aportara una viscosidad baja a bajas temperaturas que luego se destinaría a aplicaciones curantes. Por medio de ello se concluyó que la elaboración de dicho agente produce resultados satisfactorios ya que su aplicación es muy amplia para recubrimientos de sólidos para alta resistencia, para adhesivos, etc.

Entre las similitudes, se tiene que la metodología de preparación de los agentes curantes involucran aductos de aminas y resinas epóxicas, y se busca con la modificación de las condiciones obtener una viscosidad baja en los mismos. La principal diferencia es que este trabajo la materia prima utilizada no es similar a la usada en la investigación por ende sus propiedades y comportamientos en la reacción varían; la amina empleada es 1, 2 propileno diamina en la investigación antes explicada.

La investigación de Díaz & Montesinos (2005) expone que el proceso de fabricación de una emulsión de resina epóxica era llevado a cabo de manera rudimentaria, es decir, las variables involucradas eran controladas por el personal operario, originando largas jornadas de producción arriesgándose la seguridad del personal encargado y la calidad de la emulsión.

Este trabajo presentó como objetivo principal mejorar el proceso de fabricación de una emulsión de resina epóxica de peso molecular intermedio que servía como base para la elaboración de productos especiales para el área de la construcción y el mantenimiento industrial. A partir de los resultados obtenidos los autores concluyeron que las mejores condiciones fueron: altas velocidades de agitación y bajas velocidades de dosificación de agua, éstas se compactaron en un diseño de reacción donde las características principales fueron un reactor cerrado con agitación, un calentador por inmersión además de una chaqueta para el sistema de enfriamiento. De esta manera los autores obtuvieron resultados satisfactorios ya que el proceso final minimizó en gran cantidad los costos de producción así como también se redujo el tiempo de elaboración del producto final.

Entre las similitudes se tiene, la mejora de un proceso industrial que utiliza resina epóxica de peso molecular intermedio como materia prima donde las condiciones no estaban controladas. La principal diferencia es que se trató de un proceso de fabricación de una emulsión, en cambio la investigación que se lleva a cabo consiste en una reacción polimérica de una amina y una resina.

Alagar, Denchev & Kumar (2005), realizaron sus estudios tomando en cuenta resinas epóxicas, esto debido a la combinación excepcional de propiedades que presentan, tales como: fácil procesamiento, alta seguridad, excelente disolvente, resistencia a la corrosión mecánica y química, excelente adhesión a diferentes superficies, entre otras. Esta variedad de propiedades en la formulación, hace que las resinas epóxicas puedan ser aplicadas como recubrimiento de superficies y como agentes curativos.

A pesar de las excelentes propiedades en algunos casos; en otros, no son satisfactorias, por ejemplo donde se necesitan recubrimientos para condiciones de extrema corrosión y de altas temperaturas. Gracias a la variación de las propiedades de las resinas en casos extremos, se desarrolló un solvente con base de fósforo y silicón que aportó al sistema epóxico un mejor desenvolvimiento en dichas condiciones. Aquí radica el objetivo principal de esta investigación, obtener un solvente que modificara las propiedades de los sistemas de recubrimiento epóxicos.

Los principales resultados obtenidos influyeron fundamentalmente en las propiedades finales de los recubrimientos, ya que ésta versatilidad en la formulación hace que las resinas epóxicas sean ampliamente aplicadas en recubrimientos de superficies, en adhesivos, en aplicación de pinturas sobre materiales, en semiconductores, en la prevención de la corrosión, entre otros. Esta investigación comprendió el desarrollo experimental y la caracterización del producto obtenido así como también la funcionabilidad del mismo.

La similitud principal con respecto a esta investigación fue que estudiaron los sistemas epóxicos como compuestos ampliamente utilizados en recubrimientos con propiedades mecánicas adecuadas y la mejora de sus propiedades a partir de la incorporación de otro producto; sin embargo presenta diferencias con respecto a la materia prima que se emplea ya que no usan aminas para mejorar propiedades químicas y en la metodología llevada a cabo para caracterizar el sistema obtenido también.

Kravanja & Novak (2006) establecen que los problemas de optimización para el diseño y la síntesis de procesos químicos flexibles son normalmente asociados con modelos altamente discretos, los que se solucionan con el establecimiento de un sistema operativo que sea capaz de seleccionar las variables más importantes de un proceso.

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo general reducir significativamente el grupo de puntos de control y parámetros inciertos presentes en los problemas de

ingeniería química; una cantidad considerable de procesos fueron desarrollados por los investigadores, con la finalidad de identificar el grupo mínimo de puntos críticos necesarios en los diseños de procesos químicos flexibles. Los principales logros de esta investigación fueron la identificación, empleando tres métodos, de los valores críticos principales en los parámetros inciertos mediante la maximización separada de cada variable de diseño, conjuntamente con la optimización simultánea de la parte económica que se puede aplicar a una infinidad de procesos químicos.

Esta investigación se asemeja considerablemente con el trabajo desarrollado en la optimización y mejoramiento de procesos químicos considerando los aspectos económicos y en la selección de puntos críticos de control de dichos procesos, los cuales representan objetivos fundamentales de ambas investigaciones; aún así las diferencias son marcadas ya que emplearon una metodología diferente para determinar lo antes mencionado y a su vez los resultados obtenidos por los autores fueron generales y aplicables a varios problemas en el área de la ingeniería química a diferencia de la investigación nueva donde se buscan obtener resultados específicos para un problema en particular.

En la investigación de Evente, Fischer, Hungerbühler & Introvigne (2007) se establece que los diseños y optimizaciones de procesos de reacción continuos o por cargas han sido de gran interés en el mundo académico en los últimos años sin embargo mucho de los modelos de optimización son desarrolladas e implementadas solo a escala de laboratorio con pocas excepciones una de éstas es la investigación realizada donde la optimización se desarrollo a nivel industrial.

Este artículo tuvo como objetivo principal generar la modelización y optimización de una operación industrial de un reactor por carga con la finalidad de controlar la temperatura y presión del mismo. Una de las conclusiones principales fue que la productividad del equipo aumentó un 36%, gracias a la optimización del proceso de reacción; este valor de productividad es bastante bueno y puede ser comparado con un proceso de

categoría industrial. Otra de las conclusiones sobresalientes fue que la estrategia de implementación de la optimización para el cálculo de perfiles óptimos fue el control óptimo; método desarrollado en la investigación, el cual es definido como el problema de la optimización en donde se emplean ecuaciones diferenciales elementales en la teoría de control y es ampliamente usado en reactores por cargas industriales.

Las principales similitudes son que a partir de la optimización del proceso de reacción se logró mejorar la productividad, es decir, mediante una investigación experimental se obtuvo un proceso mejorado con respecto a la temperatura de reacción además se obtuvieron perfiles de temperatura para diferentes conversiones. Opuesto al trabajo realizado, se tiene que esta investigación se basó en la optimización de un reactor debido a la expansión de un producto que atraviesa una solución líquida para llegar a la superficie, y la causa tomada en cuenta en la nueva investigación es por la inestabilidad de la viscosidad del producto final que se produce lote a lote.

## 2.2. Definición de términos

**Aducto:** compuesto químico originado por combinación directa de dos especies químicas que mantienen en aquel su respectiva ordenación atómica (Matta & Rufo, 2008).

**Agente curante o endurecedor:** es un producto químico puro o mezclado, que cuando se añade a una sustancia, reacciona con ella, y la convierte en un polímero con nuevas características (Lee & Neville, 1967).

**Fluido:** es una sustancia que se deforma continuamente cuando se le aplica una fuerza tangencial, por más pequeña que ésta sea (Silva, 2003).

**Fluido no newtoniano:** los fluidos No-Newtonianos son aquellos cuya viscosidad no es constante y varía según la presión aplicada sobre los mismos (Silva, 2003).

**Funcionabilidad:** Estudio de las características del gelado a causa de la reacción entre el aducto de amina y la resina epóxica.

**Productos bicomponentes:** son aquellos productos comercializados en dos partes, A y B. Dichos productos son homogenizados directamente por el usuario (Air Products, 2000).

**Rentabilidad:** se refiere a obtener más ganancias que pérdidas en un campo determinado (Gómez & Nuñez, 2004).

**Resina epóxica:** una resina epoxica es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o "endurecedor" (Lee & Neville, 1967).

**Viscosidad:** es la propiedad de un fluido para resistir la velocidad a la cual toma lugar la deformación, cuando el fluido es sometido a esfuerzos de corte (Silva, 2003).

### 2.3. Polímeros.

Wade (2004) afirma que un polímero es una molécula de masa molecular elevada que está formada por muchas unidades más pequeñas (monómeros) que se van repitiendo, enlazándose unas con otras. Cuando se habla de polímeros, generalmente se hace referencia a polímeros orgánicos sintéticos en vez de biopolímeros orgánicos naturales como el ADN, la celulosa y las proteínas, o a polímeros inorgánicos como el vidrio y el hormigón.

En menos de 150 años, la sociedad se ha rodeado de polímeros sintéticos: ropa de Nylon y poliéster, alfombras de polipropileno, automóviles con componentes plásticos de poliuretano y ruedas de cauchos sintéticos; por otra parte, se utilizan corazones artificiales y órganos hechos con polímeros de siliconas y muchos componentes de los bolígrafos, computadoras, juguetes y aparatos electrodomésticos están hechos de materiales poliméricos plásticos.

### 2.3.1 Clases de polímeros sintéticos.

Principalmente hay dos clases de polímeros: polímeros por adición y polímeros por condensación. Los primeros se obtienen a partir de la adición rápida de una molécula a una cadena de polímeros en crecimiento, generalmente con un intermedio reactivo (catión, radical o anión) en el extremo de crecimiento de la cadena. A los polímeros por adición a veces también se les conoce como *polímeros de crecimiento de cadena*, ya que el crecimiento generalmente se produce en el extremo de una cadena. Los monómeros generalmente son alquenos y la polimerización implica adiciones sucesivas a los dobles enlaces. El policloruro de vinilo, usado ampliamente como cuero sintético, es un polímero de adición.

Los polímeros por condensación se obtienen mediante la condensación (formación de enlaces con pérdidas de una molécula pequeña) entre los monómeros. Las condensaciones más frecuentes implican la formación amidas y ésteres. En una polimerización de condensación, cualquiera de las dos moléculas puede condensar, no necesitan estar en el extremo de la cadena. A los polímeros de condensación a veces se les denomina *polímeros de crecimiento por pasos* o etapas, ya que cualquier par de moléculas de monómeros puede reaccionar dando lugar a un paso en la condensación.

### 2.4. Resinas epóxicas.

Lee & Neville (1967) establecen que las resinas epóxicas son aquellas moléculas que contienen más de un grupo epóxico (bien sea situado internamente, terminalmente o en estructuras cíclicas) capaz de ser convertido en una forma termoestable útil. El término es usado para indicar las resinas tanto termoplásticas (no curadas) como las termoestables (curadas).

Una resina epóxica o poliepóxido es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o endurecedor (agente curante). Las resinas epóxicas más frecuentes son producto de una reacción entre bisfenol-a y la epiclorohidrina, el bisfenol A se obtiene de fenol y acetona. Las resinas epóxicas están

constituidas comúnmente de dos componentes que se mezclan previamente antes de ser usados; al mezclarse reaccionan causando la solidificación de la resina, su curado se realiza a temperatura ambiente, durante ese curado o secado se forman enlaces cruzados lo que hace que su peso molecular sea elevado (Allstudies, 2008. Disponible en: <http://www.allstudies.com/resinas-epoxi.html>).

#### *2.4.1. Características básicas de las resinas epóxicas.*

Lee & Neville (1967) establecen que un gran número de propiedades han llevado a las resinas epóxicas a tener un rápido crecimiento en sus usos y sus aplicaciones en una gran cantidad de industrias.

Considerando las resinas líquidas: son aquellos líquidos de bajas viscosidades que fácilmente pasan a la fase termoestable con la mezcla del agente curante apropiado. Hay otras resinas líquidas, tales como las resinas fenólicas, poliésteres, resinas acrílicas, entre otras; las cuales curan de una manera similar, pero las resinas epóxicas poseen más bien una combinación única de propiedades, estas se especifican a continuación:

- **Durabilidad:** herramientas epóxicas son usadas para moldear el metal en automotores, aviones y otros trabajos donde hacen uso de metales. Moldes de soplado, termoformado y laminado resisten mejor combinaciones de calor y presión que resinas compuestas para moldeo.
- **Resistencia a altas temperaturas:** formulaciones de adhesivos, resinas laminadas y componentes para morteros retienen más del 50 % de sus valores mecánicos originales a 400 °F y 30 % a 300 °F. Los adhesivos son utilizados para pegar superficies de aluminio en partes exteriores de los aviones proporcionando suaves contornos y reduce así la tensión alrededor de los remaches. Vidrios laminados tejidos son usados para tuberías, tanques y otras estructuras que operan a elevadas temperaturas.

- **Resistencia química:** Las resinas son termoestables con un denso y cerrado entrecruzamiento en su estructura química, los epóxicos son inertes a solventes, ácidos y bases. El agua salada no ataca a los epóxicos rápidamente, por lo que ellos pueden ser usados para productos marinos, tan bien como en recubrimientos para tales estructuras submarinas.
- **Baja viscosidad:** las resinas líquidas y sus agentes curantes forman sistemas de baja viscosidad, fáciles de procesar o modificar.
- **Fácil curado:** las resinas epóxicas curan rápidamente y fácilmente a prácticamente cualquier temperatura desde 5 °C hasta 150 °C, dependiendo de la selección del agente curante.
- **Bajo encogimiento:** Una de las más ventajosas propiedades de las resinas epóxicas es su bajo encogimiento durante el curado. Las resinas epóxicas reaccionan con un rearrreglo pequeño y con una deficiencia de subproductos volátiles involucrados.
- **Alto poder adhesivo:** debido a la estructura química, principalmente a la presencia de grupos hidroxilos polares y grupos éteres, las resinas epóxicas son excelentes adhesivos. Las resinas curan con bajo encogimiento, por lo que las varias superficies de contacto entre la formulación de la resina epóxica líquida y los adherentes no son distorsionados durante el curado. Fuerte adherencia, fuera de las necesidades de todos los tiempos o de las altas presiones, son tal vez los mejores resultados en las tecnologías contemporáneas sobre plásticos.
- **Altas propiedades mecánicas:** La propiedad de adherirse de las resinas epóxicas formuladas correctamente usualmente supera otros tipos de resinas. Esto es probablemente en parte a un resultado de su bajo encogimiento, lo que minimiza perturbaciones en la estructura que de otra manera debilitarían la estructura mecánica.
- **Versatilidad:** Las resinas epóxicas son probablemente las más versátiles de los plásticos contemporáneos. Las propiedades básicas pueden ser modificadas de varias maneras: por mezcla de varios tipos de resinas, por la selección de los agentes curantes y por el uso de modificadores y rellenos.

#### **2.4.2. Propiedades de las resinas epóxicas.**

Las resinas epóxicas presentan un sin fin de propiedades que pueden ser aprovechadas para fines de la construcción y mantenimiento industrial, alguna de estas se presentan a continuación (Allstudies, 2008. Disponible en: <http://www.allstudies.com/resinas-epoxi.html>):

1. La humectación y la adherencia son óptimas.
2. Buen aislamiento eléctrico.
3. Buena resistencia mecánica.
4. Resisten a la humedad.
5. Resisten al ataque de fluidos corrosivos.
6. Resistencia a temperaturas elevadas.
7. Excelente resistencia química.
8. Poca contracción al curar.
9. Excelentes propiedades adhesivas.

#### **2.4.3. Aplicaciones de las resinas epóxicas.**

Lee & Neville (1967) exponen que debido a la versatilidad de las resinas epóxicas estas son usadas en miles de aplicaciones industriales. A continuación se muestran algunas de las tantas aplicaciones:

1. Como adhesivos para las estructuras tipo nido de abejas en los aviones, para las cerdas de los pinceles entre otras cosas.
2. Como soldaduras superficiales y componentes para obstrucción en las reparaciones de las partes metálicas y plásticas presentes en los barcos, automóviles, etc.
3. Como componentes en la fabricación de moldes de corta duración y prototipos, patrones, herramientas, etc.
4. Como compuestos en los recubrimientos y encapsulamientos de equipos eléctricos y electrónicos.

5. Como plastificantes en los fusiles y misiles, para accesorios en la construcción.

Los revestimientos a base de soluciones epóxicas son usados como mantenimiento y en productos acabados, así como también en acabados marinos, en albañilería, en revestimientos de acero, revestimientos para tanques, aviones, revestimientos en cerámica, forros de latas y tambores, entre otros. También son usadas como pinturas sobre pisos de concreto, en gimnasios y barnices sobre pisos, etc.

Las resinas epóxicas son también usadas en aplicaciones decorativas sobre pisos, como morteros con resistencia química, como tintas para la impresión, en el área dental, quirúrgico y para fabricación de prótesis.

Las resinas epóxicas son utilizadas como aditivos para una variedad de otros materiales plásticos, así como sobre resinas vinílicas y acrílicas y también sobre gomas naturales y sintéticas.

#### **2.4.3.1. Otras aplicaciones de las resinas epóxicas.**

A continuación se presentan otras aplicaciones de las resinas epóxicas a nivel industrial:

- *Pinturas epóxicas y acabados.*

Las resinas epóxicas se usan mucho en capas de impresión, tanto para proteger de la corrosión, el ataque de ácidos y químicos como para mejorar la adherencia de las posteriores capas de pintura; debido a su alta densidad manejan una carta de colores muy limitada. Su acabado superficial generalmente tiende a ser semibrillante, pero con el tiempo se vuelve mate. Entre sus usos están: para exterior e interior de superficies en la protección de metal, madera, concreto o asbesto-cemento, humos, polvo, salpique y derrame de solventes alifáticos, para áreas costeras y ambientes marinos. En interior y exterior de tuberías de agua a presión, enterradas o al aire, para fondos de cascos (como pintura de barrera), pintura de suelos industriales o de alto tráfico, para tanques,

estructuras de acero sumergidas, maquinarias y equipos en ambientes industriales de alta agresividad, en exposición atmosférica se decoloran con el tiempo por lo que hay que tener cuidado y de ser necesario recubrir con alguna pintura tipo gel.

- *Adhesivos epóxicos.*

Son adhesivos reactivos bicomponentes que fraguan por reacción química entre una resina epóxica y un endurecedor, al mezclarse los dos componentes. Los adhesivos epóxicos se caracterizan por poseer excelente resistencia a los agentes químicos, al calor y a la humedad, además de gran resistencia a rotura en tracción y cizalla. Es común utilizarlos en la industria aeronáutica y aeroespacial, en la fabricación de coches, bicicletas, esquíes. Sirven para adherir gran cantidad de materiales, incluidos algunos plásticos, y se comercializan rígidos o flexibles, transparentes o de color, de secado rápido o lento. Si el secado de un adhesivo epoxídico se realiza con calor, será más resistente que si se seca a temperatura ambiente.

- *Resinas epóxicas para la fabricación de materiales compuestos.*

Se trata de la mezcla de resinas epóxicas con fibras, comúnmente fibra de vidrio o de carbono, esta mezcla se usa tanto en la fabricación de moldes como de piezas maestras, laminados, extrusiones y otras ayudas a la producción industrial. Los resultados son más económicos, resistentes y rápidos de producir que los hechos de madera, metal, plástico, etc. producen piezas más resistentes. Son muy utilizados además en la escultura, fabricación de piezas prefabricadas y para refuerzo de recuperación de elementos constructivos de gran valor.

- *Epóxicos para sistemas eléctricos y electrónicos.*

Las resinas epóxicas se comportan como óptimos aislantes eléctricos y se usan en muchos componentes y uniones eléctricas, para proteger de cortos, humedad, polvo, suciedades etc.

Los epóxicos en la industria electrónica son utilizados para el encapsulado de los circuitos integrados y los transistores, además se usan en la fabricación de circuitos impresos.

- *Epóxicos en aplicaciones náuticas.*

Se venden también en tiendas de náutica para reparación y restauración de barcos. Su precio en general es elevado, aunque su desarrollo y popular usos, cada vez las hacen más accesibles (Allstudies, 2008. Disponible en: <http://www.allstudies.com/resinas-epoxi.html>).

Investigaciones de Milby (1973) relatan que el mejor mercado para las resinas epóxicas son los recubrimientos, los adhesivos, la plastificación y las herramientas a base de resina, aunque cantidades importantes son utilizadas también para encapsulamientos, macetas y moldes. Resinas sintéticas, epóxicas, silicón, y en especial los vinilos, ahora dominan el campo.

Las resinas epóxicas usadas pueden ser transparentes, opacas, rígidas, flexibles, rellenas o espumosas. Dependiendo de la viscosidad y de los factores de producción, la forma de verterlas, del inyectado manual, desde una unidad dispensadora o usando técnicas de transferencia para moldeo. El aire arrastrado es removido mediante vibraciones, vacío o centrifugación antes de curar. En la técnica de transferencia para moldeo, la producción es basada en un suave flujo de líquido epóxico.

#### **2.4.4. Curado de resinas epóxicas.**

Milby (1973) instituye que muchas industrias prefieren comprar y utilizar sistemas específicos multicomponentes (resinas y agentes curantes) de muchos formuladores confiables que emplean personal orientado hacia el campo de la química así como también mantienen excesivas investigaciones e instalaciones donde realizan todos sus ensayos para probar los productos. Es solo entonces necesario seleccionar un sistema

que cumpla con las necesidades y luego solo se debe seguir las instrucciones de mezclado y curado.

Inclusive los sistemas altamente reactivos que curan rápidamente a temperatura ambiente pueden ser distribuidos como sistemas de un solo componente (epóxicos congelados) en contenedores refrigerados y camiones.

Las resinas epóxicas pueden ser curadas a temperatura ambiente o aplicando calor. La mejora de las propiedades y de la resistencia a altas temperaturas son generalmente obtenidas con agentes curantes que requieren de un calentamiento externo tanto en la etapa de curado inicial como en el ciclo de postcurado.

La selección del mecanismo de curado depende en gran parte del tiempo de trabajo disponible para realizar la tarea, las propiedades deseadas en el producto, la cantidad de calor producido que puede ser tolerado, y el grado en que el calor puede ser disipado durante el curado.

#### ***2.4.5. Plásticos epóxicos***

Milby (1973) expone que casi nadie que ha tratado de reparar una lámpara rota o algún otro utensilio casero conoce los adhesivos epóxicos disponibles en dos tubos en los supermercados y ferreterías. Mezclando cantidades iguales de los tubos A y B y aplicándolos en la unión a pegar, se pueden obtener buenos resultados, frecuentemente entre materiales distintos. Entre las propiedades de los adhesivos epóxicos se tienen la baja contracción de polimerización, la resistencia a químicos y altas temperaturas y alta resistencia mecánica. Los epóxicos han invadido muchas áreas de aplicación en poco tiempo comparado con otras resinas sintéticas.

Ha habido interesantes e inusuales aplicaciones de epóxicos, desde el concepto original del Dr. P. Castan en Suiza durante los años de 1930. La meta de Castan fue desarrollar una resina sintética para dentaduras artificiales o desarrollar un adhesivo de cemento

para los dientes directamente a la mandíbula. Simultáneamente en los Estados Unidos Devoe and Raynolds Company desarrollaron los epóxicos para el uso como recubrimiento. Los recubrimientos son el mercado más importante para los epóxicos, pero los epóxicos están apenas comenzando a sustituir a los acrílicos para su uso en dentaduras.

## **2.5. Aminas.**

Se pueden considerar a las aminas como compuestos nitrogenados derivados del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) en el que uno o más grupos alquilo o arilo están unidos al nitrógeno. El átomo de nitrógeno de la molécula de amoníaco contiene un par electrónico libre, de manera que la forma de esta molécula, considerando en ella al par de electrones no enlazantes, es tetraédrica ligeramente distorsionada. El par aislado de electrones no enlazantes ocupa una de las posiciones tetraédricas. El ángulo del enlace H-N-H del amoníaco es de  $107^\circ$ , y tanto la forma de la molécula como el valor anterior se pueden explicar admitiendo una hibridación  $sp^3$  en el átomo de nitrógeno. El par electrónico libre provoca una compresión del ángulo que forman entre sí los orbitales híbridos  $sp^3$ , reduciéndolo de  $109^\circ$  a  $107^\circ$ .

### **2.5.1. Clasificación de las aminas.**

#### **2.5.1.1. Aminas alifáticas.**

Silaex (2007) establece que las aminas alifáticas son en su mayor parte, de baja viscosidad con olor característico e irritante. Las más utilizadas son: etilendiamina (EDA), dietilentriamina (DETA), trietilentetramina (TETA), tetraetileno pentamina (TEPA), entre otros. En general, las moléculas son pequeñas y muy inestables, que básicamente reaccionan a través de sus radicales libres de hidrógeno.

Como se muestra en la figura 2.1, las aminas primarias se presentan cuando uno de tres átomos de hidrógeno del amoníaco es remplazado por un sustituyente orgánico. Las aminas secundarias tienen dos sustituyentes orgánicos unidos al nitrógeno con un hidrógeno. En las aminas terciarias todos los átomos de hidrogeno son remplazados por

un sustituyente orgánico. Esto también es posible con tener cuatro sustituyentes alquilo en el nitrógeno.

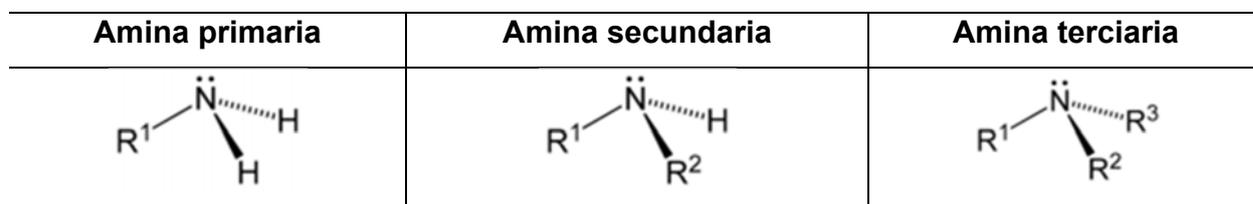


Figura 2.1. Configuración de los distintos tipos de aminas alifáticas.

Fuente: Wade, 2006.

Silaex (2007) expone las ventajas y desventajas de las aminas alifáticas esto se puede observar en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de las aminas alifáticas**

Ventajas	Desventajas
Rápida curación a temperatura ambiente	Corto tiempo de trabajo
Asequibilidad	Alta exotermia
Baja viscosidad	Alta toxicidad
Buena resistencia química	Relación con la mezcla crítica
Fácil mezclado con la resina	Puede causar "vista" (niebla o aceites de superficie)

Fuente: Silaex, 2007.

### 2.5.1.2. Aminas cicloalifáticas.

Silaex (2007) establece que las aminas cicloalifáticas proporcionan menos volatilidad, mayor estabilidad a la luz, menos reactividad y una mejor retención de colores. En su estado puro son extremadamente difíciles de curar a temperatura ambiente, debido a su baja reactividad. Uno de los más utilizados es la isoforondiamina (IPDA), pero por lo general con algunas modificaciones, como el uso de aceleradores de reacción. Las ventajas y desventajas de las aminas cicloalifáticas se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de las aminas cicloalifáticas**

Ventajas	Desventajas
Baja viscosidad	Alto costo
Excelente estabilidad de color	Baja reactividad
Alto brillo	Mediana resistencia térmica
Buena resistencia química	
Fácil mezclado con la resina	
Poco sensibles a la "vista"	

Fuente: Silaex, 2007.

### 2.5.1.3. Aminas aromáticas.

Las aminas aromáticas tienen los átomos de nitrógeno conectados al anillo aromático como una anilina. Los anillos aromáticos disminuyen la basicidad de las aminas, dependiendo del sustituyente. La presencia de un grupo amino incrementa la reactividad del anillo aromático, debido al efecto de la donación de los electrones.

## 2.6. Agentes curantes

Matta & Rufo (2008) investigaron a principios del año 2000 que los agentes de curación han sido los responsables de la permeabilidad de los revestimientos epóxicos. La permeabilidad de este tipo de resina es suficiente como para ser 100 veces mayor en comparación con los anteriores productos. Esta nueva tecnología permite que el vapor de agua pase las microestructuras del recubrimiento epóxico lo que impide la aparición de burbujas. En función de la elevada tensión superficial de la resina, cualquier líquido que cae en el suelo no puede penetrar, porque la estructura de microporosidad de la resina es tan pequeña que sólo una molécula de vapor de agua logra superarla.

Otra ventaja de esta tecnología es la reducción en el tiempo de aplicación del revestimiento epóxico. Si antes era necesario esperar 14 a 28 días para realizar la operación, ahora esto se puede hacer después de 8 horas.

Silaex (2007) expone que las resinas epóxicas pueden curarse con diferentes agentes, también llamados endurecedores, incluidos los ácidos de Lewis. Los principales productos utilizados como endurecedores por la industria son los siguientes:

- Aminas alifáticas.
- Aductos de aminas.
- Poliamidas.
- Aminas cicloalifáticas.
- Anhídridos.
- Aminas aromáticas.
- Polissulfetos.
- Polioxipropilaminas.
- Polimercaptanas.
- Diciandiamida e Trifluoruro de boro.

#### **2.6.1. Agentes curantes básicos.**

Lee & Neville (1967) establecen que los agentes curantes básicos empleados en las tecnologías con resinas epóxicas son las bases de Lewis, bases inorgánicas, aminas primarias y secundarias y las amidas.

##### **2.6.1.1. Bases de Lewis.**

Lee & Neville (1967) exponen que las bases de Lewis son aquellos componentes que contienen un átomo con un par de electrones sin compartir en su capa de valencia. Estos son atraídos hacia las áreas de densidad electrónica reducida en las moléculas con las cuáles reaccionan. Las bases orgánicas, como por ejemplo la trietilentetramina, es una representación de las bases de Lewis, las cuales son más reactivas y adecuadas como endurecedores para las resinas epóxicas.

Las aminas terciarias atacan al grupo epóxico en el átomo de carbono por la parte posterior y forman un enlace dativo de coordinación. En la mayoría de las reacciones se requiere de la presencia de un grupo hidroxilo o su equivalente, los cuales forman

puentes de hidrógeno con el oxígeno epóxico. El estado de transición está conformado por un anillo de tres átomos y favorece la formación de un ión alcóxido, el cual genera un grupo oxidrilo por la reacción ácido base del ión hidrógeno. Una vez que el ión alcóxido está disponible, éste reaccionará luego directamente con un grupo epóxico presente en el sistema, y así generar un nuevo ion alcóxido. El proceso continúa de forma secuencial, es decir, un mecanismo de reacción en cadena (figura 2.2).

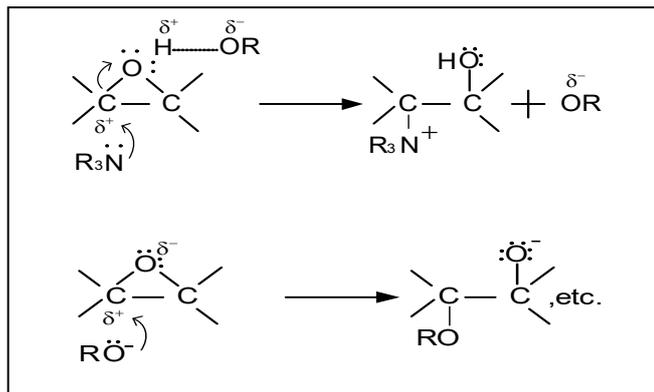


Figura 2.2. Mecanismo de reacción en cadena para la generación de ión alcóxido.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

La presencia de átomos de oxígeno, con su respectivo par de electrones sin compartir, estabilizan el complejo de amonio cuaternario, así como el grupo hidroxilo libre estabiliza al ion alcóxido mediante puentes de hidrógeno.

Como una alternativa al mecanismo mostrado, puede sugerirse que en la reacción inicial no se forma un ion alcóxido separado, sin embargo se forma un complejo activado (figura 2.3). Adicionalmente los grupos epóxicos pueden agregarse al complejo sin aumentar la separación de la carga (figura 2.4).

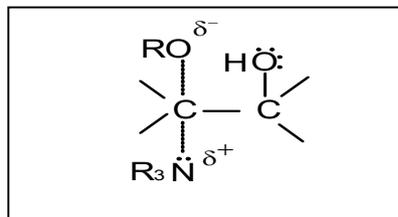


Figura 2.3. Complejo activado.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

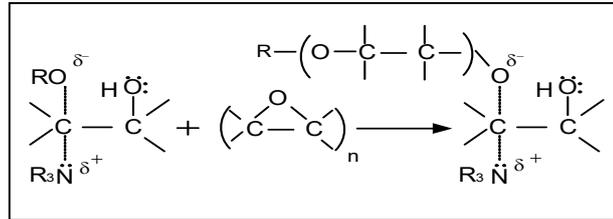


Figura 2.4. Complejo activado con grupos epóxicos.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

La reacción final ocurre con la generación de un nuevo grupo hidroxilo e instauraciones, sin la necesidad del desarrollo de un ion alcóxido libre.

Las aminas terciarias, como único agente curante, son normalmente utilizadas en concentraciones bastante altas, para garantizar que ocurra la reacción de terminación.

La eficiencia de las aminas terciarias como agentes curantes está relacionada con la disponibilidad del par de electrones sin compartir del átomo de nitrógeno el cual es aprovechado por el grupo epóxico (Lee & Neville, 1967).

#### 2.6.1.2. Influencia de los hidrógenos activos en el curado con bases de Lewis.

Lee & Neville (1967) exponen que el anión generado inicialmente en el complejo de amina terciaria y resina epóxica puede reaccionar con un hidrógeno activo presente en el agua, alcoholes, fenoles o carboxilos para generar un nuevo anión. Este nuevo anión es capaz de abrir un segundo grupo epóxico, y la reacción puede ser procesada a través del primer grupo y luego los otros. Los grupos hidroxilos formados durante el paso inicial pueden también participar más adelante en la reacción.

El tipo de hidroxilos alcohólicos ejerce influencia sobre la dirección de la reacción. La preferencia puede ser luego escrita para los catalizadores de las reacciones entre alcoholes y resinas epóxicas como alcoholes primarios > secundarios > terciarios. Este orden en la reacción también ha sido observado en los sistemas no catalizados (figura 2.5).

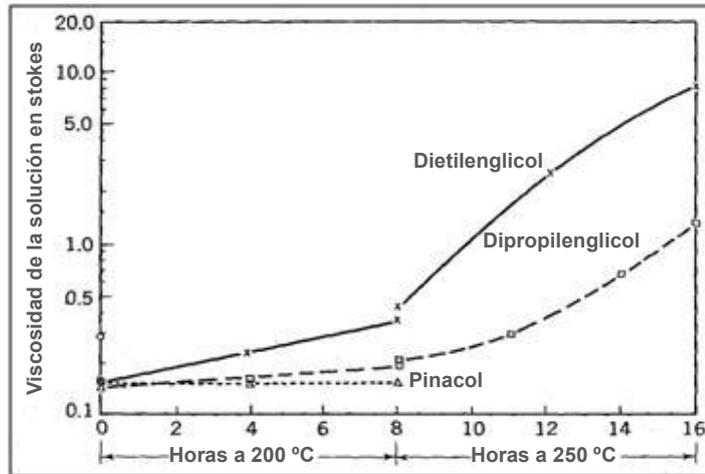


Figura 2.5. La reacción de las cantidades equivalentes de epoxi e hidroxilo sin catalizador, indica que el orden de reacción es alcohol primario > secundario > terciario.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

La rapidez de las reacciones depende de la cantidad de alcohol (figura 2.6).

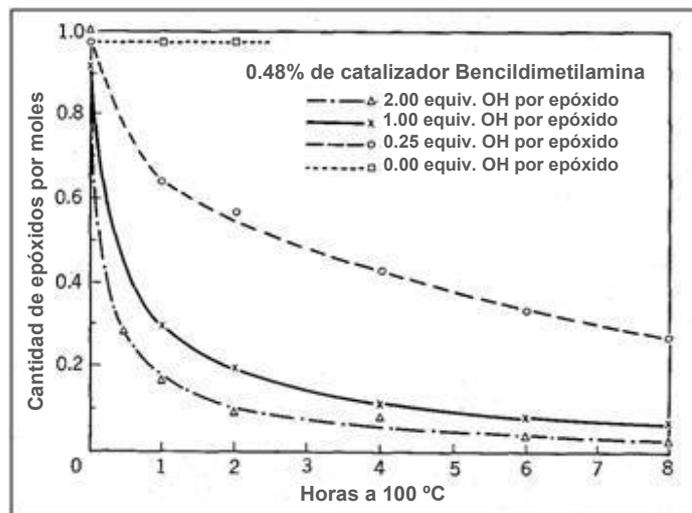


Figura 2.6. La velocidad de los catalizadores de base de Lewis en reacciones de epoxi-hidroxilo es función de la concentración del alcohol.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

### 2.6.1.3. Bases inorgánicas.

Lee & Neville (1967) establecen que las bases inorgánicas reaccionan de acuerdo al mecanismo iónico propuesto para las aminas terciarias; un ejemplo de estas bases es el hidróxido de potasio. La base genera un anión mediante la reacción con el grupo epóxico (figura 2.7).

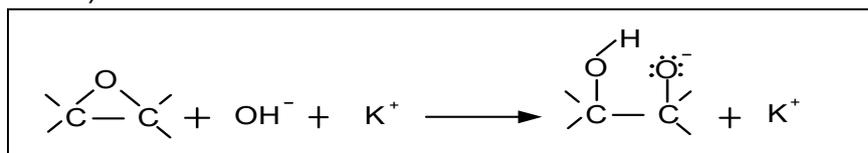


Figura 2.7. Anión generado a partir de una base y el grupo epóxico.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

Esta configuración, tal vez debido a la cercanía del grupo hidroxilo naciente, no parece requerir un estado de transición con puentes de hidrógeno para la reacción con el grupo epóxico en la etapa de inicialización, la velocidad de la reacción es independiente completamente de la concentración del alcohol, como se muestra en la figura 2.8.

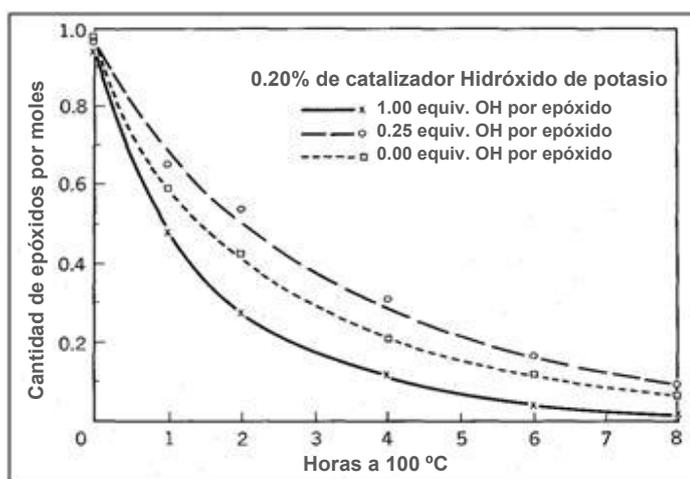


Figura 2.8. Reacción entre las bases inorgánicas con grupos epóxidos a través de la base fácilmente ionizable.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

### 2.6.1.4. Aminas secundarias.

Lee & Neville (1967) exponen que las aminas secundarias reaccionan con los grupos epóxicos mediante el siguiente mecanismo simplificado mostrado en la figura 2.9.

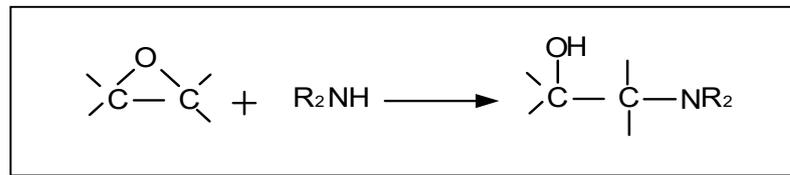


Figura 2.9. Anión generado a partir de una base y el grupo epóxido.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

Como resultado de la reacción, una amina terciaria es formada. En la medida que la formación de la amina terciaria no es de otro modo obstaculizada, una reacción futura puede ocurrir mediante el mecanismo propuesto para las bases de Lewis.

#### 2.6.1.4.1. Progreso de la reacción de adición de aminas.

Las investigaciones de Lee & Neville (1967) relatan que la reacción no puede avanzar cuando se adiciona la amina con la ausencia de grupos hidroxilos u otros grupos donadores de hidrógenos. Los donadores específicos pueden cambiar la velocidad de la reacción pero no el sentido. El efecto de varios compuestos donantes de hidrógeno sobre la velocidad de la reacción está indicado en la figura 2.10.

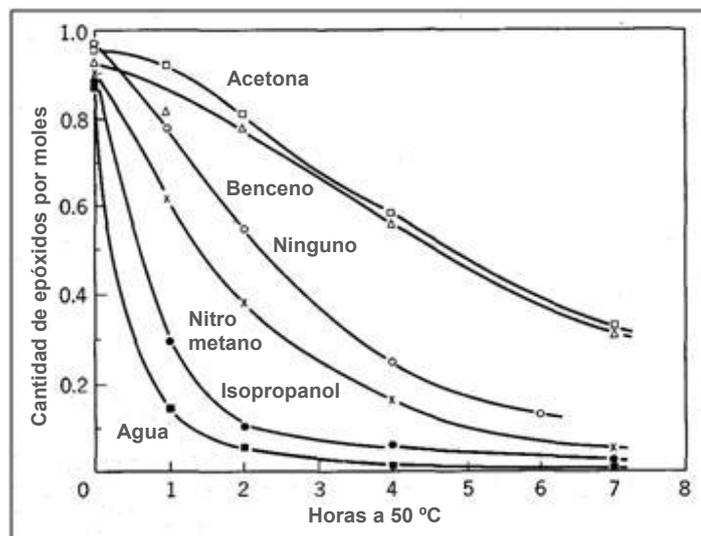


Figura 2.10. Tasa de reactividad relativa de diferentes hidrógenos donados y su influencia en la reacción de adición de una amina secundaria y un grupo epóxido.

Fuente: Lee & Neville (1967).

Los compuestos dadores de hidrógenos no pueden ser enlazados dentro del sistema sin embargo son recuperados al final de la reacción sin cambios.

En ocasiones se han desarrollado explicaciones que involucran dos reacciones bimoleculares sucesivas. El efecto neto es transferir los protones desde el dador hacia el grupo hidroxilo y los protones desde la amina hacia el dador (figura 2.11).

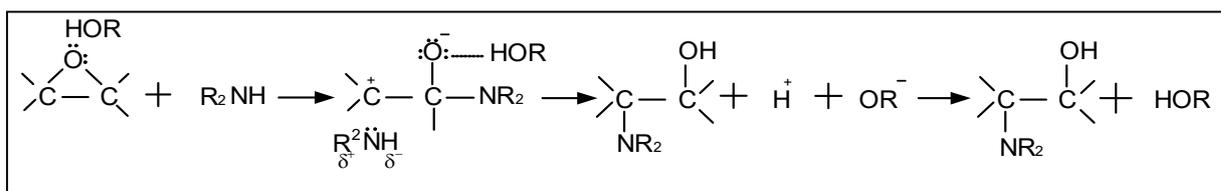


Figura 2.11. Transferencia de protones entre el grupo dador y el grupo hidróxilo.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

Debido a que cada reacción con adición de amina resulta en la generación de un grupo hidroxilo, puede esperarse de la misma que proceda satisfactoriamente cuando solo un poco de grupos hidroxilos alcohólicos están presentes inicialmente, el suministro aumenta a medida que la reacción progresa.

La amina terciaria formada por la reacción de la amina secundaria con el grupo epóxico puede como no puede también ser suficientemente activa para catalizar reacciones futuras. La reactividad dependerá de la accesibilidad del nitrógeno y de la densidad de electrones en el par de electrones desapareados.

Las aminas secundarias pueden servir como un agente curante efectivo. La molécula de amina debe contener más de dos grupos funcionales de la misma (para una resina epóxica disfuncional) o la formación de la amina terciaria no debe ser obstaculizada para promover nuevas reacciones por el mecanismo de Lewis.

### 2.6.1.5. Aminas primarias.

Lee & Neville (1967) exponen que las aminas primarias reaccionan de manera similar que las aminas secundarias (figura 2.12).

En las investigaciones de Lee & Neville (1967) se muestra que las aminas primarias reaccionan acerca de dos veces más rápido que las aminas secundarias, en sistemas de resinas epóxicas algunas aminas terciarias se forman casi inmediatamente a partir de las aminas secundarias.

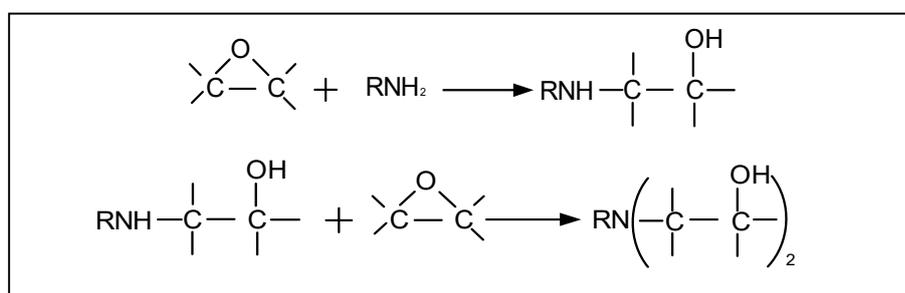


Figura 2.12. Reacción de la amina secundaria.

Fuente: Lee & Neville, 1967.

Generalmente, las aminas terciarias formadas por la reacción de dos grupos epóxicos con una amina primaria resultan catalizadores poco efectivos. Las aminas primarias, sin embargo, pueden ser usadas efectivamente como agentes curantes para las resinas epóxicas.

## 2.7. Aduetos de aminas.

Silaex (2007) expone que los aductos de aminas se derivan de la mezcla de una resina epóxica con un exceso de amina dando lugar a una reacción química. Gracias a esta reacción se obtiene un compuesto más grande y menos volátil, el cual mantiene hidrógenos parcialmente reactivos y por tanto generan menos desprendimiento de calor en las futuras reacciones, su acción de curado es más completa y es menos tóxico. En la figura 2.13. se puede observar la estructura de un aducto formado a partir del compuesto isoforondiamina (amina cicloalifática) y los hidrógenos reactivos presentes.

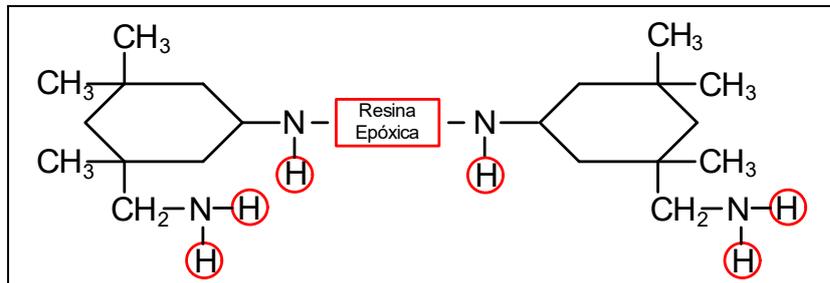


Figura 2.13. Aducto isofofondiamina (IPDA)

Fuente: Silaex, 2007.

Dangayach, Smith & Weinmann (2001) establecen que los requisitos para la resistencia química de los productos finales a partir de los aductos son: la baja temperatura de curado de los recubrimientos epóxicos y que sean resistentes a manchas de agua y otras. Las aminas primarias reaccionan con el dióxido de carbono y agua de la atmósfera para formar carbamatos que pueden depositarse en la superficie y producir coloraciones (figura 2.14). La formación de coloraciones tiene un efecto perjudicial en el desempeño del recubrimiento porque esto puede favorecer en la reducción del brillo, en el cambio a color amarillento, en la poca capacidad de adhesión interna y externa. Condiciones de bajas temperaturas y alta humedad incrementa las probabilidades en su cambio en su coloración. La reacciones químicas involucradas con la formación del carbamato se muestran a continuación:

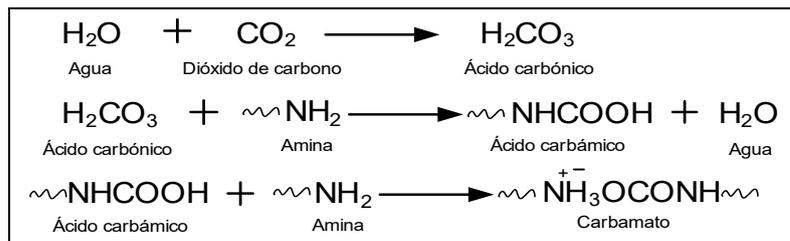


Figura 2.14. Formación de carbamatos.

Fuente: Dangayach et al., 2001

Dangayach et al. (2001) exponen que para minimizar la formación de carbamatos y mejorar primero la resistencia a manchas de agua, los fabricantes de agentes curantes han desarrollado una amplia variedad de aductos de aminas modificados. Estos

aductos reducen o eliminan la formación de cambios de color porque los hidrógenos de las aminas primarias son pre-reactivos con los grupos epoxídicos (figura 2.15).

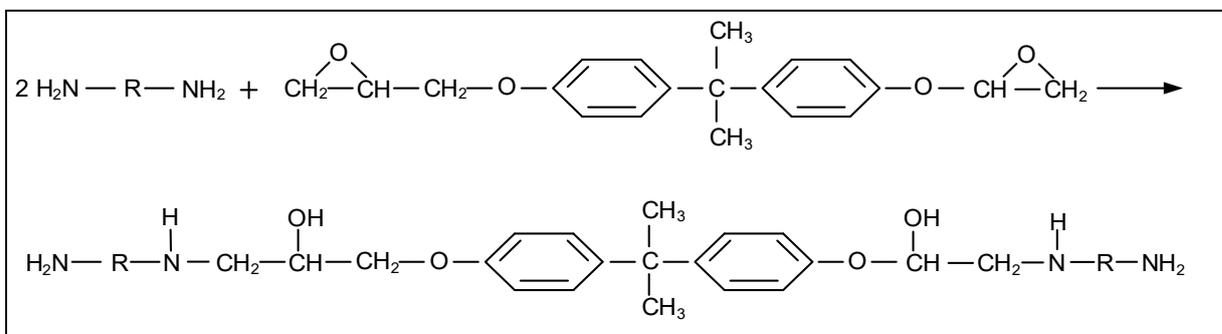


Figura 2.15. Reacción del aducto de amina entre el líquido epóxico y una poliamina alifática.

Una gran variedad de aminas curativas y resinas epóxicas son utilizadas para las reacciones de aductos de aminas. Algunas de las aminas alifáticas o cicloalifáticas más comunes se tienen: dietilentriamina (DETA), trielentetramina (TETA), tetraetilenpentamina (TEPA), isoforondiamina (IPDA), bis-paraaminociclohexilmetano (PACM) and 1,2-diaminociclohexano (1,2-DACH). Desde que las reacciones de aductos de aminas incrementan la viscosidad del sistema, estos productos son menos corrosivos y tienen poca volatilidad con respecto a las aminas no modificadas. Los aductos de aminas son menos susceptibles a cambios en su coloración por lo que son adecuadas para recubrimientos que endurecen a bajas temperaturas. Estas ventajas vienen aunadas a un incremento en la viscosidad en el curado. La alta viscosidad de los aductos de aminas se reduce con el uso de solventes o modificándolos con plastificantes por ejemplo el alcohol bencílico. Para realizar el proceso de curado a bajas temperaturas, estos aductos están frecuentemente formulados con aceleradores que alargan la velocidad de curado hasta el final.

### 2.7.1. Poliamidas convencionales.

Matta & Rufo (2008) establecen que las poliamidas convencionales son agentes endurecedores. Tienen alta viscosidad (330.000cps de la 11.000cps) y la aplicación de este agente requiere el uso de disolventes. La poliamida convencional se obtiene mediante una reacción entre el ácido graso o dimérico con una amina. Los ácidos

grasos se encargan de dar a la poliamida una baja resistencia a los disolventes y ácidos, que es la materia prima utilizada para producir la poliamida y es responsable de la disminución de la resistencia del producto final. Por otra parte, las poliamidas convencionales tienen otras características que limitan la aplicación del producto, tales como la baja penetración en materiales como el hormigón. Químicamente, las poliamidas convencionales no endurecen bien en temperaturas inferiores a 15 ° C, esto significa que en temporadas de mucho frío, la aplicación de estos productos es muy difícil, porque la reacción es muy lenta.

Hoy en día, debido al bajo costo, estos materiales representan en el mercado brasileño de pinturas y revestimientos, alrededor del 50% al 60% del total de agentes endurecedores. En el sector industrial de los suelos, tales endurecedores son menos utilizados debido a que el nivel de demanda de productos es alto. Matta & Rufo (2008)

### ***2.7.2. Aductos de aminas cicloalifáticas.***

Investigaciones de Matta & Rufo (2008) indican que a principios de los 80, la industria química, comenzó a desarrollar nuevas tecnologías para cambiar las características de poliamidas convencionales. Existe entonces los aductos de aminas cicloalifáticas con menor viscosidad (alrededor de 400cps) y alta resistencia química.

La baja viscosidad de las aminas cicloalifáticas permitió la formulación de un piso o recubrimiento que evitara el uso de disolventes. La desventaja es que el endurecedor aún no puede ser aplicado en ambientes con temperaturas inferiores a 15 ° C y alta humedad del aire ya que esto podría presentar problemas de exudación. La causa de este problema es la baja compatibilidad del agente curante con el epóxico ya que las aminas cicloalifáticas tienen dos tipos de grupos aminos diferentes en su estructura: un grupo vinculado a un carbono secundario y terciario.

Además del problema de exudación, existe la posibilidad de que una parte de las aminas se posicione en la superficie del revestimiento, formando una capa de petróleo y el consecuente deterioro de la apariencia del recubrimiento.

En la década de los 90, la industria desarrolló aductos de aminas cicloalifáticas donde el curado del revestimiento epóxico se podía realizar en ambientes con temperaturas alrededor de 3 y 4 °C, con alta humedad y sin defectos superficiales. El aumento de la compatibilidad del agente crante con la resina epóxica es el principal factor de esta evolución. En este agente se trató de colocar a los grupos que participan en aminos carbonos de la misma especie a fin de que la reacción fuese más homogénea. Esto ha generado un endurecedor con menos viscosidad (30 a 400 cps), más resistentes a los agentes químicos y puede ser aplicado sin el uso de disolvente. Esta última característica es muy importante porque responde a la necesidad actual de uso de materiales que no dañan el medio ambiente, o productos, o agua libre de disolventes.

### **2.8. Aplicación industrial de los aductos de aminas.**

La aplicación de revestimientos epóxicos es grande dentro de ciertos parámetros técnicos pero las posibilidades están limitadas a la creatividad de cada formulador.

Los aductos de aminas están diseñados para un alto rendimiento para la protección contra la corrosión en superficies de metal, adecuado para la protección de superficies de concreto especialmente en pisos. Estos productos también son apropiados para su uso en escuelas, hospitales, fabricas, almacenes entre otros siempre y cuando su durabilidad sea baja y posea poco olor. Para los revestimientos sobre madera virgen, el primero se debe aplicar una delgada capa del producto alrededor del 10 % en agua y para suelos de hormigón sin revestir, la primera capa debe contener aproximadamente 25 % en agua, esto con el fin de maximizar la penetración y la adherencia.

Estos productos pueden ser aplicados con brocha, con rodillo o con pistola lijando la superficie previamente antes de cada capa. Estos productos debe ser aplicados cuando

la superficie y la temperatura del ambiente se encuentra entre los 15 ° y 32 °C. Por otro lado los aductos son utilizados como espesantes y también para preparar polisacáridos libres.

Actualmente hay agentes curantes que permiten la aplicación de revestimientos epóxicos a temperaturas de hasta 4 °C, manteniendo las características de secado, brillo, resistencia química. También existe la aplicación de revestimientos epóxicos en superficies húmedas y en las regiones de alta humedad relativa, por encima del 90%. Otros pueden curar por debajo del agua, y desarrollan todas las propiedades típicas de un epóxico.

En resumen, se puede decir que cada año hay nuevas tecnologías en los agentes curantes que amplían las posibilidades de la aplicación de los revestimientos epóxicos.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

*En este capítulo se describen los procedimientos, herramientas, actividades y metodologías necesarias para el logro de los objetivos específicos planteados.*

#### **3.1 Identificación del proceso de la fabricación de los aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas.**

La identificación del proceso actual fue la primera etapa de esta investigación, ya que fue necesario observar todas aquellas características que influían en el mismo, con la finalidad de transformar el proceso de escala industrial a escala de laboratorio y así ejecutar la producción de los aductos con las mismas condiciones que la escala industrial. Al realizar el proceso en escala de laboratorio se logró identificar profundamente las variables involucradas y finalmente se culminó con una descripción detallada, la cual fue clave para las modificaciones posteriores.

##### **3.1.1. Identificación mediante observación del proceso actual.**

La identificación mediante observación del proceso actual, se obtuvo gracias a las visitas realizadas a la planta de la empresa así como también al laboratorio de la misma, aunado a esto se realizaron una serie de consultas con los encargados del proceso, técnicos y el resto del personal, quienes proporcionaron la información necesaria para conocer los equipos y características, los pasos a seguir, la materia prima empleada, las variables involucradas en el proceso, la formulación de los aductos y las condiciones en general (Immerc C.A., 2008) .

Ahora bien se logró obtener una visión general de cuales eran las variables involucradas en el proceso gracias a las observaciones realizadas por los autores y la información recopilada con el personal antes mencionado. Estas variables se afinaron realizando una investigación documental (Mata & Rufo, 2008). También se investigó detalladamente el proceso para la fabricación de los aductos con el objetivo de dominar

más a fondo el tema, así como también adquirir conocimientos importantes a la hora de desarrollar un esquema experimental como el que se realizó en esta investigación.

### **3.1.2. Ejecución del proceso actual a escala de laboratorio.**

La ejecución del proceso actual a escala de laboratorio consistió en realizar una serie de ensayos preliminares, donde se modificó la escala industrial en relación a la preparación del aducto y las condiciones de reacción se asemejaron a las presentes en la planta. Los ensayos preliminares consistieron en preparar los aductos de aminas cicloalifáticas o alifáticas con resinas epóxicas manteniendo todas las características, con lo que se logró describir a nivel de laboratorio la variación de la temperatura durante la reacción las cargas de resinas sobre la amina, por ser una reacción por cargas y las características físicas finales del aducto (Immerc C.A., 2008). También se realizó una observación detallada del durante la fabricación incluyendo los equipos, instrumentos y otras herramientas utilizadas, para así definir cuáles eran las variables que podían manipularse en los tratamientos posteriores.

Para desarrollar esta etapa fue necesario la revisión de los equipos e instrumentos de laboratorio y la disponibilidad de la materia prima por tratarse de sustancias importadas; cabe destacar que inicialmente se realizaron ciertas observaciones en el laboratorio de algunas técnicas, con respecto a la manipulación de la materia prima y al modo de preparación de los aductos, impartidas por el personal especializado con la finalidad de tener una idea inicial de lo que producía la empresa y a su vez lo que se quería modificar.

Las características previas fueron: la reacción se llevaba a cabo en un sistema abierto; la dosificación del reactivo limitante, en este caso la resina, se realizaba por cargas; la agitación no era constante, solo se agitaba al momento de agregar la carga de resina; ésta última se incorporaba luego de un descenso en la temperatura, es decir, por tratarse de una reacción exotérmica, al adicionar una carga, la resina reaccionaba con la amina y provocaba un incremento en la temperatura que luego al finalizar esa

primera etapa de reacción disminuía dando paso a la segunda carga y así hasta finalizar las tres cargas; la disminución de la temperatura carecía de un sistema de enfriamiento por lo que se esperaba un tiempo prudencial hasta que la temperatura disminuyera hasta la temperatura ambiente; el tiempo de espera era elevado entre carga y carga.

**3.1.3. Elaboración de un diagrama causa-efecto para identificar las variables involucradas en el proceso llevado a cabo a nivel de laboratorio.**

Mediante la ejecución de las pruebas preliminares antes descritas, se observaron todas las posibles variables que se veían relacionadas con la fabricación de los aductos, sin despreciar ninguna, es decir, tomando en cuenta todas las que a simple vista pueden afectar o no afectar un proceso, esto con la finalidad de posteriormente descartar cuáles son las variables que realmente no producen cambios significativos en las propiedades del aducto. Existían variables directas y variables indirectas que a la final igual se tomaban en cuenta buscando englobar todas, para luego analizar una por una.

Para la construcción del diagrama causa-efecto (figura 4.3, sección 4.1), se tomaron en cuenta todos los criterios establecidos para el análisis de un proceso, estos fueron: materiales, mano de obra, medición, metodología y medio ambiente (Fudibeq, 2008. Disponible en: <http://www.fundibeq.org>). A continuación se detallan las características que comprenden cada uno de estos.

- **Mano de obra:** En este elemento se consideró el grado de entrenamiento de los operarios el cual es influyente a la hora de ejecutar los trabajos, se cometen errores por falta de experiencia; los incentivos que estos tienen en su lugar de provoca antipatía a la hora de realizar las labores y afecta el desempeño de los mismos; las condiciones inseguras en el área y las maniobras arriesgadas que deben realizar los trabajadores. Las propiedades de los aductos pueden variar como consecuencia de los errores humanos.

- **Medio ambiente:** La temperatura ambiental influyó sobre la reacción, con una variación en la temperatura inicial a la cual ocurrió la reacción (temperatura ambiente) se obtuvieron variaciones significativas en las propiedades finales; también se consideró la situación del sistema de reacción ya que gracias a las altas temperaturas obtenidas, por la ausencia de un control de temperaturas, se lograban pérdidas de reactivos por evaporación.
- **Materiales:** En esta sección se consideraron los equipos y sus características en general y la materia prima. Los equipos empleados para la fabricación de aductos de aminas son reactores, los cuales deben estar fabricados con un material inerte a la reacción, así como también soportar cambios de temperatura sin modificar su estructura. Con respecto a la materia prima se tiene que la pureza de ésta es muy importante ya que afecta directamente las propiedades del producto final. También se incluyó la pesada de la misma ya que durante este procedimiento se puede incurrir en errores por parte de los operarios (mano de obra) ocasionando variaciones en la formulación del aducto.
- **Metodología:** Aquí se consideró el método para la preparación de los aductos y el procedimiento seguido para la dosificación de la materia prima. Los pasos que se seguían para adicionar ésta y el orden en el cual se adicionaban influyeron considerablemente sobre las propiedades finales del aducto.
- **Maquinaria:** En cuanto a la maquinaria se consideró la presencia de equipos inadecuados y la ausencia de sistemas de control para la temperatura, la dosificación y la agitación; con respecto al sistema de control de temperatura, cabe destacar que no solo se necesita un control inicial de temperatura sino también un control a lo largo de la reacción buscando mantener constante un rango las temperaturas, ya que debido a la ausencia del mismo se obtenían temperaturas muy elevadas que ponen en riesgo todo el entorno del sistema.

El control de dosificación fue importante también debido a que no había una dosificación constante y automatizada, ésta se realizaba de manera manual, consumiendo tiempo y esfuerzo de los trabajadores, el hecho que la dosificación no era constante afectaba en cierta parte la formulación del aducto y por supuesto las propiedades finales del mismo. La agitación podía mantenerse constante a lo largo de la reacción para homogenizar la mezcla y así promover la reacción. Con respecto a los equipos inadecuados se podían generar condiciones inapropiadas para la fabricación de los aductos.

- **Medición:** en esta sección se tomó en cuenta la medición inadecuada de la temperatura inicial de reacción, así como también la medición de la materia prima necesaria la cual afecta, como ya se dijo, la formulación del aducto. También afectaban los equipos de medición y el entrenamiento de los operarios para usar dichos equipos, lo cual ya fue considerado en otras secciones.

El diagrama detallado fue único para los dos aductos ya que las condiciones actuales para la fabricación de los mismos eran similares y las variables que influían en primera instancia fueron las mismas (figura 4.3).

#### *3.1.4. Descripción directa y detallada de las características más relevantes involucradas en el proceso.*

A partir de la ejecución del proceso actual a nivel de laboratorio y el desglosamiento por categorías de todas las variables se logró concluir la descripción directa y detallada del proceso de fabricación de los aductos de aminas.

#### *3.1.5. Construcción de perfiles de temperatura.*

Simultáneo a la reacción (Immerc C.A., 2008) para la formación del aducto se realizó el seguimiento de la temperatura desde el primer contacto de la materia prima hasta que la temperatura descendiera por lo menos hasta 35 °C luego del aumento respectivo, esto con la finalidad de construir perfiles de temperatura donde se pudiera observar

claramente la tendencia de la misma durante la reacción así como también el pico máximo de temperatura obtenido en cada una de las cargas (Immer C.A., 2008). Estos perfiles se elaboraron graficando temperatura en función del tiempo de reacción (figura 4.1, sección 4.1).

### **3.2 Caracterización los aductos obtenidos, para así conocer las propiedades a variar durante el proceso.**

Fué importante conocer todas las características y propiedades físicas de los aductos fabricados, siguiendo el procedimiento actual, ya que estas sirvieron como un patrón para los tratamientos posteriores. En esta investigación se quiso lograr, entre otras cosas, un proceso donde las viscosidades fueran las menores posibles y además constantes lote a lote, por lo que la etapa de caracterización durante el desarrollo de la misma, cumplió un papel importante dentro de la ejecución de los ensayos posteriores. Todas las características obtenidas a lo largo de la investigación fueron comparadas con las obtenidas en este objetivo, es decir, las del proceso actual. No solo fueron importantes las características físicas sino también la funcionabilidad de los aductos.

#### ***3.2.1. Revisión de normas ASTM (American Society for Testing and Materials) para análisis físicos.***

Inicialmente se revisaron las normas correspondientes a los métodos necesarios para la caracterización de los aductos de aminas (sección 3.1), tomando en cuenta que las propiedades que se deseaban conocer eran viscosidad por tres métodos diferentes, densidad y porcentaje de sólidos no volátiles por dos métodos diferentes. De estas normas se obtuvieron los materiales, equipos, procedimientos y modelos matemáticos necesarios para determinar finalmente las propiedades. A continuación se especifica esto para cada una de las propiedades determinadas.

### Viscosidad por copa Zahn

Este método cubre la determinación de la viscosidad de pinturas, barnices, lacas, tintas y materiales líquidos similares con una copa de viscosidad. Para la determinación de la viscosidad se sumergió completamente la copa en el aducto, luego se retiró la copa y se midió el tiempo en el cual el material fluyó por un hueco en la base de la copa (Norma ASTM D-4212-05).

A partir del tiempo de flujo se calculó la viscosidad cinemática (**V<sub>c</sub>**) como sigue:

$$V_c = K * (c - t) \quad (3.1)$$

Donde **V<sub>c</sub>** es viscosidad cinemática (cST), **t** es el tiempo de flujo (s) y **K, c** son las constantes apropiadas al número de copa. Para el caso de la copa N° 5 encontrada en el laboratorio de Immerc C.A la ecuación queda de la siguiente manera:

$$V_c = 23,56 * t - (744 / t) \quad (3.2)$$

Con la viscosidad cinemática se calculó la viscosidad dinámica (**μ**) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\mu = V_c * \rho \quad (3.3)$$

Siendo **ρ** la densidad del material (g/mL).

### Viscosidad Brookfield

Este método cubre la determinación de la viscosidad aparente y otras propiedades desconocidas de materiales no Newtonianos. El método para medir viscosidad consistió en determinar la viscosidad aparente de revestimientos y materiales similares midiendo el torque sobre una aguja en rotación a una velocidad constante dentro del material (Norma ASTM D-2196-05, COVENIN 577-2007).

Los resultados reportados por el viscosímetro digital son directamente los valores de viscosidades buscados, para reportar éstos es necesario adjuntar el valor leído junto con los rpm seleccionados y la aguja empleada.

### **Viscosidad por el método Gardner**

Este método cubre la determinación de la viscosidad mediante la medición de los segundos de burbuja. Los segundos de burbuja son aproximadamente igual a los Stokes de la mayoría de los líquidos. El método fue empleado para medir el tiempo de burbuja en el cual la burbuja se desplaza a lo largo del tubo al momento en que este se invierte 180 °. Se comparó este tiempo con valores de viscosidad ya establecidos y se obtuvo una viscosidad aproximada (Norma ASTM D-1545-07, COVENIN 0784-80).

El resultado obtenido fue el tiempo de burbuja en segundos, con el cual se determinó a partir de los patrones de comparación la viscosidad cinemática de la muestra problema y para determinar la viscosidad dinámica se hizo uso de la ecuación (3.3).

### **Densidad**

El método sirve para medir la densidad de pinturas, tintes, barnices, lacas y otros similares cuando se encuentran en forma fluida. Se realizó la calibración del volumen del instrumento empleando agua destilada de densidad conocida a varias temperaturas. El peso de la muestra problema se encontraba contenido en el mismo volumen a la temperatura adecuada, conociendo esto se pudo determinar la densidad de la muestra en gramos por mililitro (Norma ASTM D-1475-03).

A partir de este método se obtuvo la densidad de una muestra problema a una temperatura determinada a partir de la ecuación 3.4. (3.4)

$$\rho = \frac{M - m}{Vol}$$

### Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en la estufa

Este método sirve para determinar el porcentaje de sólidos volátiles y no volátiles de recubrimientos y soluciones a base de solvente o agua. Se colocó aproximadamente 1 g o 3 mL del aducto sobre un platillo de aluminio, luego se llevó esto a la parte interior del horno a una temperatura de 110 °C por un tiempo aproximado de una hora. El porcentaje de sólidos se calculó por la pérdida de peso (Norma ASTM D-2369-07).

A partir de este método se obtuvo el porcentaje de sólidos no volátiles de una muestra empleando la ecuación 3.5.

$$V_A = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} * 100 \quad (3.5)$$

Donde,  $W_1$  es el peso del platillo de aluminio pre-acondicionado,  $W_2$  es el peso de la muestra problema y el platillo de aluminio y  $W_3$  es el peso de la muestra problema y el platillo luego del calentamiento.

### Porcentaje de sólidos no volátiles con desecador infrarrojo

Esto representa una variación en el método anterior, sin embargo se mantuvieron los mismos fundamentos. El desecador infrarrojo es un dispositivo que dada una pequeña muestra (menor a 1 g) aporta el resultado directamente a través de una pantalla digital, así como también de la temperatura de secado, que como parámetro establecido en Immerc C.A. (2008) para la medición de porcentaje de sólidos no volátiles de aductos es igual a 130 °C por un tiempo igual a 30 minutos.

### Funcionabilidad de los aductos

Para determinar la funcionabilidad de los aductos preparados a nivel de laboratorio se extrapoló el procedimiento establecido por Air Products (2000) mediante el cual se determinó la relación entre la resina y el agente curante, en este caso el aducto, apropiada para el curado final, esta relación se puede observar en la siguiente ecuación:

$$pHr = \frac{P_{eq_{Aducto}}}{P_{eq_{Resina}}} * 100 \quad (3.6)$$

Donde **pHr** es la relación entre la resina y el aducto (%), **P<sub>eq<sub>Aducto</sub></sub>** es el peso equivalente del aducto (g/eq) y **P<sub>eq<sub>Resina</sub></sub>** es el peso equivalente de la resina (g/eq).

El peso equivalente de la resina se obtuvo como dato reportado por Air Products (2000). Por otro lado el peso equivalente del aducto se determinó según Air Products (2000) mediante la siguiente ecuación:

$$P_{eq_{Aducto}} = \frac{m_{aducto}}{\frac{m_{amina}}{P_{eq_{amina}}} - \frac{m_{resina}}{P_{eq_{resina}}}} \quad (3.8)$$

Donde **m<sub>aducto</sub>** es la masa del aducto preparada a partir de una cantidad de amina **m<sub>amina</sub>** y una cantidad de resina **m<sub>resina</sub>**.

Una vez determinada esta relación se pudo preparar el producto final el cual fue observado superficialmente para determinar su funcionalidad como se especifica en la sección 3.2.2.

### *3.2.2. Determinación de las propiedades de los aductos fabricados a nivel de laboratorio con los métodos seleccionados anteriormente.*

Realizando las pruebas de caracterización antes descritas se logró obtener las propiedades físicas de los aductos preparados con el mismo procedimiento que en la planta pero a nivel de laboratorio, estos resultados se muestran en la sección 4.1. Es importante destacar que se debieron manejar las pruebas de caracterización correctamente para lograr aplicarlas con rapidez y efectividad durante la realización de todos los tratamientos a lo largo del diseño experimental (sección 4.2).

Por otro lado también se determinó la funcionabilidad de los aductos. El alcance en el estudio de la funcionabilidad de los aductos comprendió solo las propiedades físicas finales como lo son la dureza; el curado en la superficie, es decir, que todo el producto final permanezca seco al tacto, sin áreas húmedas las cuales son indicativos de un mal curado y las características en la superficie del producto final como lo son la ausencia de huecos, que no se rompa fácilmente, entre otros; la coloración y el brillo. Finalmente se resumieron y concluyeron todos los resultados obtenidos (sección 4.2).

### **3.3 Selección de las variables que influyen directamente en la síntesis de los aductos.**

La selección de las variables se hizo a partir del diagrama causa-efecto (figura 4.3) antes descrito complementándolo con una matriz de decisión (tabla 4.5), con la finalidad de establecer cuáles eran las más influyentes dentro del proceso esto tomando en cuenta una serie de criterios que se describen a continuación. A su vez se establecieron los factores necesarios para realizar un diseño experimental el cuál se describe en la sección 4.2.

#### **3.3.1. Determinación de las variables más influyentes en el proceso.**

Para seleccionar las variables más representativas del proceso se elaboró una matriz de selección (tabla 4.5) tomando en cuenta las variables descritas en el diagrama causa-efecto (figura 4.3). Para la matriz de selección se tomaron los siguientes criterios: influencia según resultados obtenidos en pruebas preliminares, influencia según investigaciones previas, libertad de modificación.

Una vez establecidos los criterios para evaluar las variables se construyó la matriz de decisión colocando todas estas en la primera columna, ahora bien se les asignó una puntuación correspondiente de acuerdo al criterio y a estos también se les asignó una ponderación fija, los puntajes se obtuvieron con base a las revisiones bibliográficas (Moretto, Pohmer Schlak, Schneider, Stachulla & Weber, 1995), entrevistas con el

personal capacitado, experimentaciones previas (Immerc C.A., 2008) y a la importancia que consideraban los autores.

Finalmente se seleccionaron las variables con el puntaje mayor en la totalización, estas fueron: temperatura inicial del reactor, presencia de un sistema de enfriamiento y la velocidad de dosificación.

### **3.4 Estudio de las variables seleccionadas del proceso.**

Para el alcance del presente objetivo, primeramente se realizaron ensayos preliminares donde se estudiaron los diferentes modos de preparación de los aductos (Immerc C.A.), de manera de obtener el mejor arreglo en la preparación, tomando como criterio de selección la menor viscosidad del producto final (sección 4.2). Dichos ensayos fueron:

1. Toda la resina sobre la amina.
2. Toda la amina sobre la resina.
3. Cargas parciales de resina sobre la amina.
4. Cargas parciales de amina sobre la resina.

Donde a cada uno se les realizó un seguimiento de la temperatura con respecto al tiempo así como también la determinación de las características físicas a los aductos obtenidos, realizando un análisis de resultados para escoger el modo más apropiado de preparación, escogiéndose para ambos aductos el arreglo denominado cargas parciales de resina sobre la amina.

A partir del arreglo seleccionado se establecieron algunas modificaciones con la finalidad de mejorar el proceso de fabricación, dichas modificaciones parten de la selección de las variables mencionadas en la sección anterior de este capítulo, logrando así un diseño experimental tomando en cuenta el arreglo seleccionado y dichas variables.

Las modificaciones consideradas en el arreglo seleccionado aportaron los factores (tabla 3.1) tomados en cuenta en el diseño experimental, estos fueron: el sistema de enfriamiento, la temperatura inicial del reactor y la velocidad de dosificación de la resina, tal como fueron mencionados en la sección anterior, teniendo para cada factor dos niveles de estudio (sección 4.2).

**Tabla 3.1. Factores a considerar en el diseño experimental.**

Factor	Descripción
<b>Sistema de enfriamiento (S)</b>	Uso de una chaqueta de enfriamiento por la cual circula un flujo de agua con un sistema de bombeo adecuado
<b>Temperatura inicial del reactor (T)</b>	Temperatura del componente dentro del reactor justo antes de comenzar el proceso de reacción
<b>Velocidad de dosificación (V)</b>	Rapidez de adición de la resina al sistema

La variable de respuesta en dicho estudio fue la viscosidad del producto final. Mediante un esquema del arreglo seleccionado para la fabricación de los aductos, la revisión de materiales y equipos disponibles se realizó el montaje experimental. Los montajes se realizaron en cuartos de galón metálicos para una masa total de aducto de 500 g. Para el sistema de enfriamiento se utilizó un galón metálico que contenía en su centro el envase donde ocurría la reacción soportado por una base, en los espacios internos circulaba agua la cual era suministrada al sistema por una bomba centrífuga marca HUBER® unida a un tanque de agua con una capacidad de 80 L, el flujo de agua utilizado para el enfriamiento fue de aproximadamente 0,1513 kg/s. El sistema fue controlado de forma manual con el fin de mantener la temperatura de reacción en un valor constante. Por otro lado cuando no se empleó el sistema de enfriamiento, el reactor se encontraba expuesto directamente a la temperatura ambiente. La temperatura inicial del reactor se consiguió empleando una plancha de calentamiento para llevar el componente dentro del reactor a la temperatura deseada, éstas fueron

30°C para el nivel bajo y 35°C para el alto. Por otro lado la dosificación de la resina fue realizada con un sistema de cuartos de galón elevados, con válvulas de compuerta fijadas en su fondo de manera de poder controlar la adición de la resina al sistema. Los niveles de dosificación fueron establecidos para el aducto de aminas alifáticas como 3,65 mL/min para el nivel bajo y 4,48 mL/min para el alto; y para el aducto de aminas cicloalifáticas como 2,205 mL/min para el nivel bajo y 3,5 mL/min para el alto. Por otro lado dichos tratamientos fueron realizados con un sistema de agitación constante el cual no se incluía como una variable de estudio como fue fijado en la sección anterior. El sistema de agitación se ejecutó empleando agitadores eléctricos marca Oster® con aspas de acero manteniendo una velocidad de agitación igual a 632 rpm y una potencia absorbida de 240 W. La figura 3.1 muestra el esquema del montaje experimental.

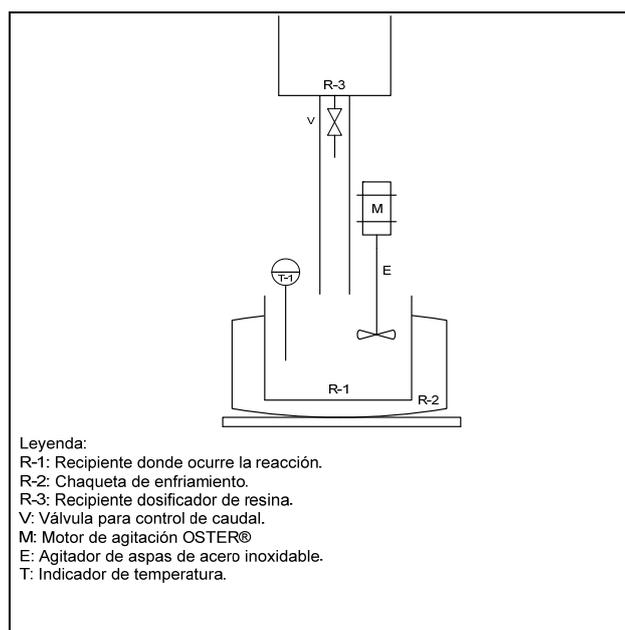


Figura 3.1. Esquema del montaje experimental.

Posteriormente, considerando los ensayos preliminares, los diferentes factores, los niveles para cada factor y el número de réplicas para establecer el alcance de la investigación, se desarrolló un diseño experimental factorial para cada uno de los aductos, los diseños de forma esquematizada se muestran en la figura 3.2 para el aducto de aminas alifáticas y en la figura 3.3 para el aducto de aminas cicloalifáticas.

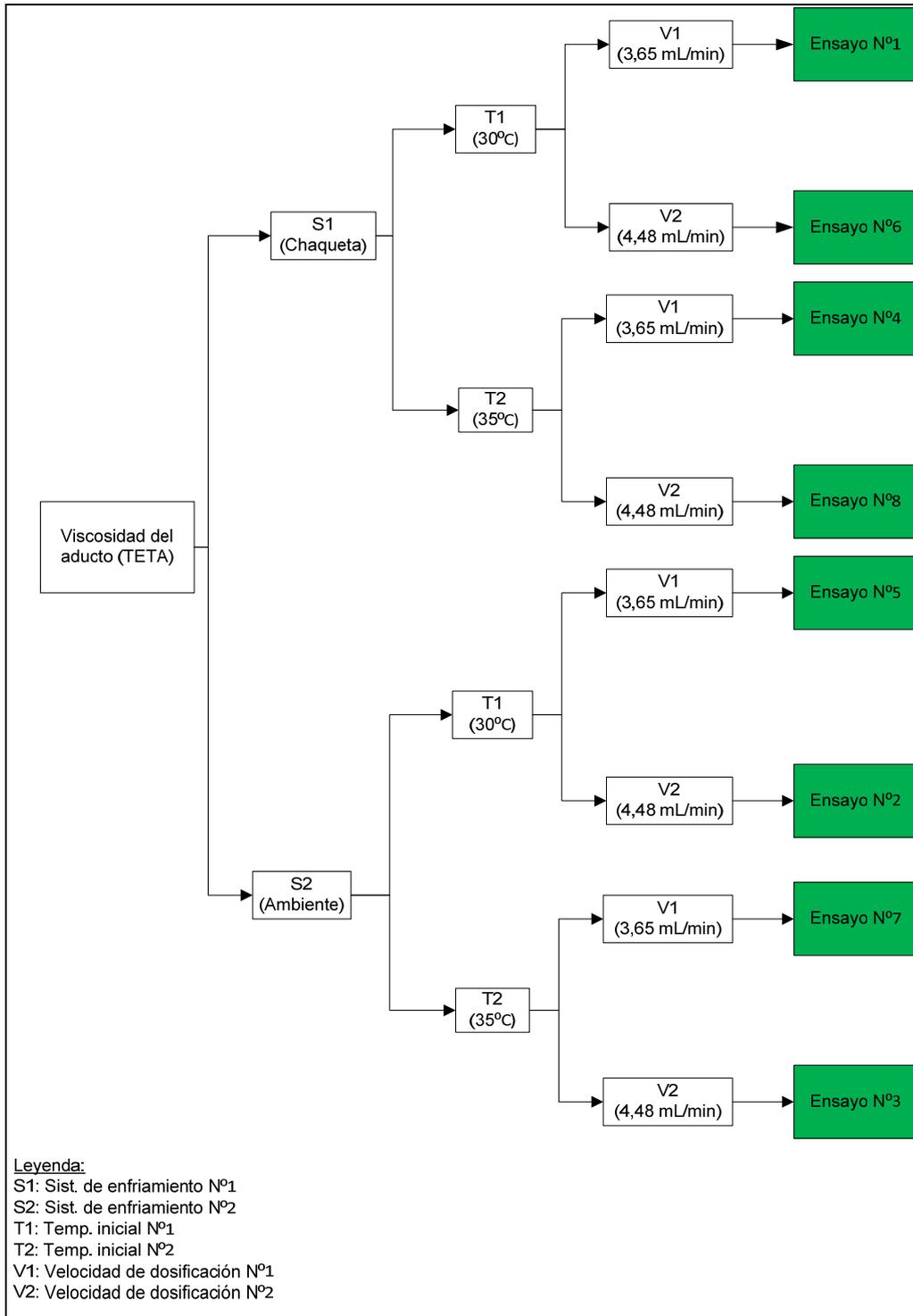


Figura 3.2. Arreglo factorial de los tratamientos considerados en el diseño experimental para el aducto de aminas alifáticas.

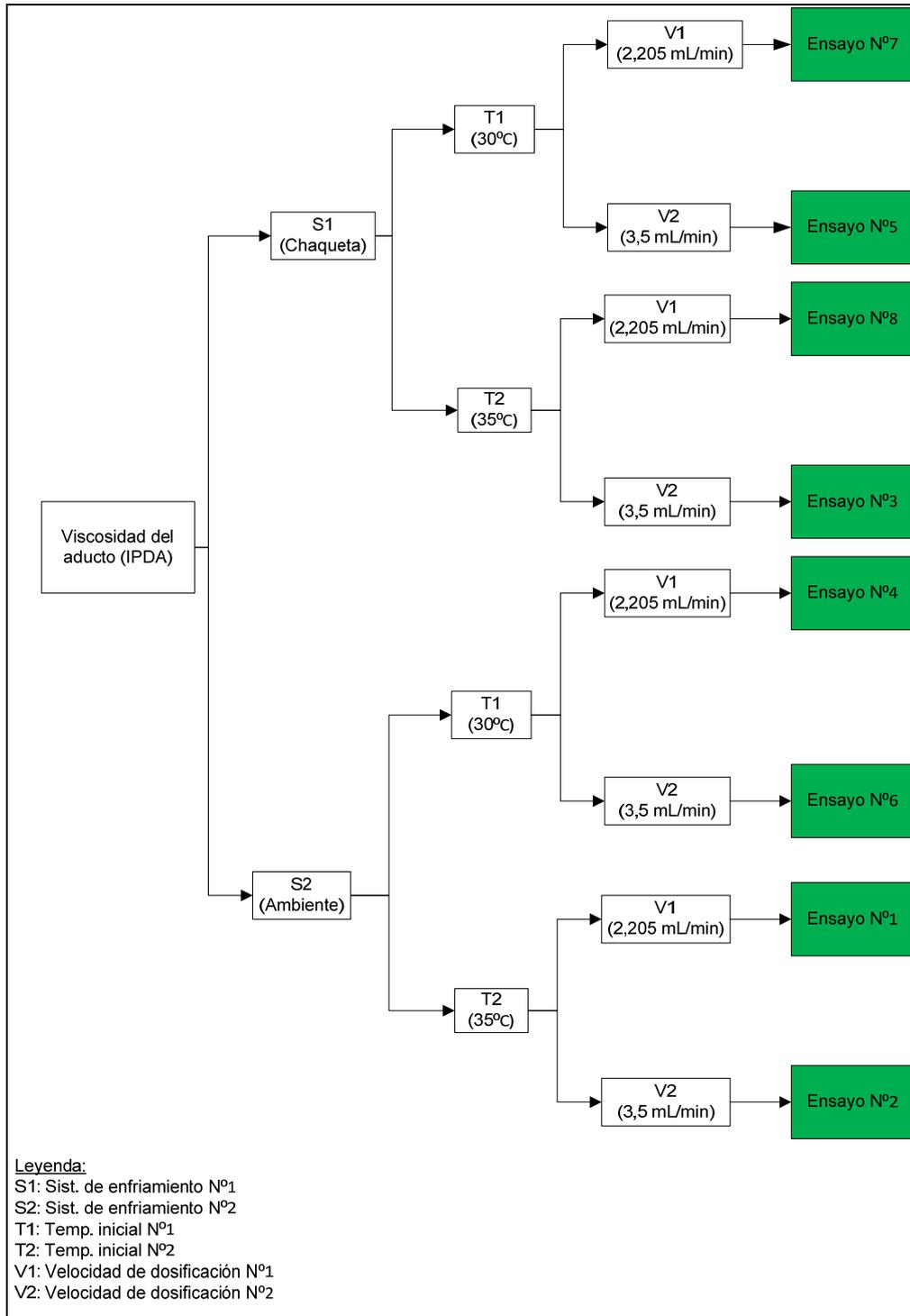


Figura 3.3. Arreglo factorial de los tratamientos considerados en el diseño experimental para el aducto de aminas cicloalifáticas.

A partir de los esquemas mostrados en las figuras anteriores se pudo observar que el diseño experimental ameritaba la realización de ocho tratamientos, y por ello fueron ejecutados de manera aleatoria debido a la presencia de un solo sistema de enfriamiento. La numeración de dichos tratamientos mostrados en las figuras 3.2 y 3.3 fue debida a ese orden aleatorio en la experimentación. Adjuntamente la aplicación de una herramienta estadística factorial conlleva a la realización de réplicas para cada uno de los tratamientos. En este caso se establecieron tres réplicas por tratamiento, lo cual da como resultado que el número de corridas experimentales fue igual a 24 para cada uno de los aductos.

Se elaboraron los instrumentos de recolección de datos y por medio de la realización del montaje de los equipos antes descritos, se llevó a cabo la conducción del experimento. En el apéndice A se muestran los datos obtenidos experimentalmente durante la investigación.

Posteriormente, luego de haber culminado las 24 corridas experimentales para cada uno de los aductos, se realizó un análisis de la varianza tomando en cuenta los procedimientos descritos en diseños factoriales con la forma  $2^k$  para un número de factores igual a tres ( $k=3$ ), determinando de esta manera las influencias de los factores y sus interacciones en la viscosidad del producto final. Dichos factores e interacciones se definen en la tabla 3.2.

El total de la suma de los valores de la variable de respuesta para cada uno de los tratamientos realizados según el orden aleatorio presentado en las figuras 3.2 y 3.3 para el aducto de aminos alifáticos y el aducto de aminos cicloalifáticos respectivamente, se identifican en las tablas 3.3 y 3.4.

**Tabla 3.2. Factores e interacciones involucrados en el análisis de varianza.**

Variable	Factores o interacciones
S	Sistema de enfriamiento
T	Temperatura inicial del reactor
V	Velocidad de dosificación
ST	Interacción doble de la presencia de un sistema de enfriamiento y la temperatura inicial del reactor.
SV	Interacción doble de la presencia de un sistema de enfriamiento y la velocidad de dosificación.
TV	Interacción doble de la temperatura inicial del reactor y la velocidad de dosificación.
STV	Interacción triple de las variables.

**Tabla 3.3. Total de la suma de los valores de la variable de respuesta para los tratamientos correspondientes al aducto de amina alifática.**

Variable	Tratamientos
(1)	Tratamiento N° 1
S	Tratamiento N° 5
T	Tratamiento N° 4
V	Tratamiento N° 6
ST	Tratamiento N° 7
SV	Tratamiento N° 2
TV	Tratamiento N° 8
STV	Tratamiento N° 3

**Tabla 3.4. Total de la suma de los valores de la variable de respuesta para los tratamientos correspondientes al aducto de amina cicloalifática.**

Variable	Tratamientos
(1)	Tratamiento N° 7
S	Tratamiento N° 4
T	Tratamiento N° 8
V	Tratamiento N° 5
ST	Tratamiento N° 1
SV	Tratamiento N° 6
TV	Tratamiento N° 3
STV	Tratamiento N° 2

Seguidamente, se determinaron los contrastes asociados a cada factor como se muestra en la Tabla 3.5.

Consecutivamente, se determinaron los efectos asociados a los factores e interacciones correspondientes, mediante la ecuación 3.9, (Montgomery, 1996).

$$\text{Efecto} = \frac{(\text{Contraste})}{2^{k-1}n} \tag{3.9}$$

Adicionalmente, la suma de cuadrados y la suma total de cuadrados se determinaron por las ecuaciones 3.11 y 3.12 obtenidas en Montgomery, 1996:

$$SS = \frac{(\text{Contraste})^2}{2^k n} \tag{3.11}$$

$$SS_T = \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^c \sum_l^n y_{ijkl}^2 \frac{y_{...}^2}{abcn} \tag{3.12}$$

Donde la suma **SS** representa la suma de cuadrados para cada factor e interacción y **SS<sub>T</sub>** representa la suma total de cuadrados de los mismos. Las variables **a**, **b**, y **c** representan los niveles que contienen cada uno de los factores principales: sistema de enfriamiento, temperatura inicial del reactor y velocidad de dosificación respectivamente. La variable **n** representa el número de réplicas para cada tratamiento, **y<sub>ijkl</sub>** representa la medida de la variable de respuesta en el nivel **i** para el factor **a**, **j** para el factor **b**, **k** para el factor **c** y la réplica **l** de las **n** réplicas en cada uno de los tratamientos; finalmente **y...** representa la sumatoria de la viscosidad en todos los 24 ensayos realizados.

**Tabla 3.5. Ecuaciones empleadas para la determinación de los contrastes asociados a cada uno de los factores e interacciones**

Efectos e interacciones	Contraste
<b>S</b>	$(s + sv + stv + st) - (1 + v + tv + t)$
<b>T</b>	$(t + tv + stv + st) - (1 + v + sv + s)$
<b>V</b>	$(v + sv + tv + stv) - (1 + t + st + s)$
<b>ST</b>	$(st + stv + 1 + v) - (s + t + tv + sv)$
<b>SV</b>	$(sv + stv + 1 + t) - (v + tv + s + st)$
<b>TV</b>	$(1 + s + tv + stv) - (v + t + sv + st)$
<b>STV</b>	$(v + stv + t + s) - (tv + 1 + st + sv)$

Fuente: Montgomery (1996)

Posteriormente, la determinación de la suma de los cuadrados asociadas al error experimental se realizó mediante la ecuación 3.13 (Montgomery, 1996).

$$SS_E = SS_T - SS_S - SS_T - SS_V - SS_{ST} - SS_{SV} - SS_{TV} - SS_{STV} \quad (3.13)$$

Seguidamente, la media de cuadrados asociadas a cada factor e interacción se calcula mediante la ecuación 3.14 (Montgomery, 1996).

$$MS_i = \frac{SS_i}{GL_i} \quad (3.14)$$

Donde,  $MS_i$  representa la media cuadrática asociada al factor  $i$  y  $GL_i$  los grados de libertad relacionados con dicho factor. De esta manera, por medio de la ecuación 3.14, el factor  $f_0$  el cual permite definir la influencia de cada uno de los factores o interacciones sobre la viscosidad del producto final (Montgomery, 1996).

$$f_0 = \frac{MS_i}{MS_E} \quad (3.15)$$

Donde  $MS_E$  es la media cuadrática del error. Para que el factor calculado anteriormente indique una influencia de los factores e interacciones sobre la variable de respuesta con un nivel de confianza  $\alpha$ , debe ser mayor al reportado en la distribución F presentado en el apéndice D.

Finalmente, se realizó una regresión lineal múltiple de manera de determinar el comportamiento de la variable de respuesta a través de los tratamientos realizados basándose en los factores influyentes a partir del análisis de varianza, dicho cálculo se realizó haciendo uso de la ecuación 3.16 (Montgomery, 1996).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon \quad (3.16)$$

Donde,  $Y$  representa la viscosidad del producto final,  $x$  representa las variables influyentes según el análisis de varianza correspondiente para cada aducto y  $\epsilon$  es un término del error aleatorio supuesto con valor igual a cero según Montgomery, 1996. Los coeficientes de regresión  $\beta_1$  y  $\beta_2$  fueron estimados como la mitad de los efectos correspondientes, mientras que  $\beta_0$  es el gran promedio de las viscosidades obtenidas para cada réplica de cada tratamiento.

A partir de la regresión mostrada, se realizó una gráfica de probabilidad normal con la finalidad de determinar si los datos muestrales se ajustan a una distribución normal y consecuentemente verificar si las suposiciones realizadas sobre las variables influyentes son correctas, esto es, luego de conocer cada variable de la ecuación antes

mencionada, se pudieron obtener los valores de viscosidad correspondientes, para esto se sustituyeron los niveles bajos y altos de las variables influyentes en dicha ecuación. Dicho niveles se ilustran en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6. Matriz de identificación de los niveles correspondientes a cada uno de los factores en los diferentes tratamientos.**

Combinaciones de tratamientos	Factores de diseño		
	S	T	V
(1)	-1	-1	-1
S	1	-1	-1
T	-1	1	-1
V	-1	-1	1
ST	1	1	-1
SV	1	-1	1
TV	-1	1	1
STV	1	1	1

Fuente: Montgomery (1996)

Para ilustrar la gráfica de probabilidad normal se graficaron los puntajes normales estandarizados  $z_j$  con respecto a los residuos correspondientes a las viscosidades obtenidas por la regresión. Dichos puntajes normales estandarizados se definen mediante la ecuación 3.17 (Montgomery, 1996).

$$\frac{j - 0,5}{n} = P(Z \leq z_j) = \Phi(z_j) \tag{3.17}$$

Donde,  $(j - 0,5)/n$  representa la frecuencia acumulada cuyo valor de  $j$  es la posición correspondiente al ordenamiento de los datos de forma ascendente. Para dicho valor de frecuencia acumulada existe un valor de  $z_j$  correspondiente, que se obtuvo a través del apéndice D.

Los residuos correspondientes a las viscosidades obtenidas por la regresión se determinaron empleando la ecuación 3.18 (Montgomery, 1996).

$$e_i = y_i - Y_j \quad (3.18)$$

Donde,  $y_i$  es el valor de la viscosidad correspondiente a la réplica  $i$  y  $Y_j$  corresponde al valor ajustado por el modelo de regresión calculado para el factor o interacción  $j$ .

Todo esto fue aplicado para ambos aductos por separado, obteniendo así gráficas representativas para las correlaciones determinadas, permitiendo de esta manera fijar las condiciones más apropiadas para el proceso de fabricación de los aductos.

### **3.5. Diseño experimental del proceso de fabricación de aductos de aminas.**

#### **3.5.1. Evaluación del mercado.**

Por medio de las observaciones, estudios e investigaciones respectivas (Immerc. C.A., 2008) sobre la producción y comercialización actualmente en la empresa Immerc C.A., se pudo detallar la situación actual de la misma. Así mismo se estudió la producción y comercialización específica de los productos que son fabricados a partir de los aductos de aminas alifáticas y cicloalifáticas, siendo estos Imerkote® e Imerlux® respectivamente (sección 4.3.1).

Además se observó que los requerimientos del mercado (Immerc. C.A., 2008) son los que definen la producción de la empresa, ya que la misma no era constante y se realizaba de manera puntual de acuerdo a las necesidades de los consumidores.

Luego a través de los historiales de fabricación de los productos mencionados anteriormente, un análisis del mismo con respecto al tiempo, la situación actual y las exigencias de la empresa (Immerc. C.A., 2008), se determinó la capacidad de producción instalada del sistema a diseñar, luego se realizó una comparación entre el

precio de venta de los productos fabricados y los de la competencia, con el fin de determinar la competitividad de éstos en el mercado.

Con respecto a la capacidad del sistema en los próximos años, para el estudio posterior sobre la factibilidad económica del proceso, se consideró como un incremento del 10 % anual en la producción de dicha empresa según especificaciones técnicas de la empresa Immerc C.A..

### **3.5.2. Selección de la tecnología.**

Por medio de investigaciones pertinentes como Kern, 1967; revisión de catálogos de equipos técnicos como por ejemplo Giropak, 1961; y otras fuentes de información sobre tecnologías para el diseño de sistemas como Ludwing 1967, se obtuvieron diversas opciones para la posterior selección en el diseño.

Estas tecnologías se clasificaron por equipos estudiando diferentes alternativas para cada uno de ellos, dicho estudio consistió en comparaciones entre sus características y condiciones, operatividad entre otros, de manera de determinar aquellos más adecuados para el proceso (sección 4.3.2).

Por último, se seleccionaron los equipos más apropiados para el diseño del proceso apoyándose en los estudios mencionados anteriormente, así como también mediante una comparación de entre las ventajas y desventajas de los mismos, teniendo en cuenta las necesidades y facilidades de adquisición para la empresa (sección 4.3.2).

### **3.5.3. Diseño del proceso de fabricación.**

Una vez seleccionada las tecnologías apropiadas para la fabricación de ambos aductos (sección 4.3.2), las cuales fueron un reactor-mezclador con sistema de enchaquetado, calentador por inmersión mediante resistencia eléctrica y dosificación de la resina por gravedad, se procedió al diseño del mismo. Primero se construyeron los diagramas de flujo y de bloque del proceso para ambos aductos.

Una vez realizado esto, se determinaron las condiciones más adecuadas para los equipos seleccionados comenzando por el sistema de enfriamiento para el cual se calculó el coeficiente de transferencia global de calor combinado donde se involucra la geometría del sistema, los fluidos utilizados y la generación de calor que se producía por medio de la reacción.

A causa de que los aductos son fluidos no newtonianos, la aproximación de dicho coeficiente no puede ser determinado directamente por medio de las expresiones típicas para ese fin, debido a que el error que se puede cometer podría ser grande. Para ello, se hizo uso de los procedimientos realizados durante la fase experimental, dicho valor se determinó utilizando los datos de enfriamiento obtenidos a nivel de laboratorio a las condiciones seleccionadas para ambos aductos, dichos datos se muestran en la tabla A.25.

Para dicho cálculo se hizo uso de la ecuación 3.19 (Perry Volumen II, 2001)

$$\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right) = \frac{U * A * \theta}{M * C} \quad (3.19)$$

Donde el logaritmo neperiano representa la variación de la temperatura del aducto con respecto al tiempo, **T** y **t** es la temperatura de los fluidos caliente y frío respectivamente; **T<sub>1</sub>** y **t<sub>1</sub>** corresponde a la temperatura del aducto al principio del periodo de enfriamiento y la del agua a la entrada al recipiente respectivamente; **T<sub>2</sub>** es la temperatura del aducto al final del periodo de enfriamiento; **U** es el coeficiente global de transferencia de calor combinado; **A** es la superficie de transferencia de calor; **C** es el calor específico del aducto y **θ** es el tiempo. Una vez calculado el coeficiente global de transferencia de calor combinado se pudo determinar el tiempo total del uso del sistema de enfriamiento para el diseño en planta, dicho cálculo se realizó con la ecuación 3.19 haciendo uso de los datos correspondientes al tamaño de los lotes para la fabricación en planta.

Para el cálculo del tamaño de los lotes de producción, se hizo uso de las dimensiones del equipo reactor-mezclador adquirido ya por la empresa el cual se desea emplear dentro de este diseño. Con tales medidas y mediante las ecuaciones de volumen de un cilindro y otro elipsoidal para el fondo del tanque, se determinó el volumen total del reactor (ecuaciones 3.20, 3.21, y 3.22).

$$V_c = \frac{\pi}{4} * D^2 * H \quad (3.20)$$

$$V_f = \frac{\pi}{6} * D^2 * H_f \quad (3.21)$$

$$V_R = V_c + V_f \quad (3.22)$$

Donde  $V_R$  es el volumen total del tanque,  $D$  su diámetro y  $H$  su altura;  $H_f$  es la altura del fondo elipsoidal.

Una vez determinado el volumen total del tanque, se calculó el volumen útil del tanque, considerándose un volumen de seguridad igual a 70 % de la capacidad total del reactor. Luego haciendo uso de la densidad para cada uno de los aductos, se determinó el tamaño de los lotes de producción en kilogramos para cada uno de ellos (ecuación 3.23).

$$M_{\text{lote}} = \rho_{\text{aducto}} * V_{\text{util}} \quad (3.23)$$

Donde  $M_{\text{lote}}$  masa a producir por cada lote,  $V_{\text{util}}$  el volumen útil del tanque y  $\rho_{\text{aducto}}$  la densidad de los aductos. Luego se determinó, a partir de la ecuación 3.24, el número máximo de lotes a producir por año para cada aducto a partir de la capacidad instalada.

$$N_{\text{lote}} = \frac{CI}{M_{\text{lote}}} \quad (3.24)$$

Donde  $N_{\text{lote}}$  es el número máximo de lotes a producir por año y  $CI$  es la capacidad instalada de la planta.

Una vez fijada la producción por lote para cada uno de los aductos, se procedió a la realización de los balances de masa y energía para los cuales se determinaron las cantidades de materia prima en la fabricación de los aductos basándose en su composición y en su preparación, estos cálculos y dichas cantidades no pueden ser mostradas debido a la política de confidencialidad de la empresa.

El tiempo total de lote se determinó como la sumatoria de los tiempos de cada una de las etapas del proceso de fabricación, en estas etapas se encontraron solapados ciertos periodos, quedando descartados al momento de la sumatoria. Para ambos aductos se estableció un tiempo de lote total donde se incluye primero la etapa de calentamiento, la cual fue determinada a partir de los cálculos para el calentador por inmersión, en dicho cálculo se determinó el coeficiente global respectivo al calentamiento de la amina de la misma manera como se determinó anteriormente; luego de esto comienza la etapa de reacción que se dio inicio con la adición de la resina, el tiempo de esta etapa se vio limitado por la variación de la temperatura de reacción la cual aumenta sucesivamente a medida que la resina era dosificada, dentro de esta variación de temperatura se encontraron los periodos de enfriamiento finalizando toda la etapa con el descenso de la temperatura sin el uso del sistema de enfriamiento, cabe destacar que esta etapa involucraba la adición completa de la resina y todos los períodos de enfriamiento necesario. Como se dijo anteriormente durante el periodo de reacción, se hizo uso del sistema de enfriamiento en varias oportunidades, los tiempos de enfriamiento fueron determinados como se muestra en el apéndice B, sin embargo dichos tiempos no se contabilizaron debido a que se encuentran solapados en la etapa de reacción del proceso.

Por último, la etapa de enfriamiento, en esta etapa el sistema es enfriado hasta la temperatura ambiente sin el uso del sistema de enfriamiento.

La potencia del calentador por inmersión fue determinada a partir del tiempo de calentamiento mencionado anteriormente, haciendo uso de la ecuación 3.25.

$$q = \frac{m * C * (T_f - T_i)}{t} \quad (3.25)$$

Donde **q** es la potencia del calentador por inmersión, **m** la masa de la amina a calentar, **C** es la capacidad calorífica de la amina, **T<sub>f</sub>** la temperatura final del calentamiento, **T<sub>i</sub>** temperatura inicial del calentamiento y **t** el tiempo requerido para el calentamiento. En este cálculo se consideró el calentamiento de la amina alifática por ser éste el más crítico del proceso, con el fin de determinar la potencia máxima requerida por el calentador.

Con respecto a la velocidad de agitación, se realizó el escalamiento apropiado a partir de los datos obtenidos a nivel de laboratorio, esto es, se hizo uso de la ecuación 3.26 (Ludwing, 1967).

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{-5/3} \quad (3.26)$$

Donde **N** es la velocidad del agitador en rpm y **D** el diámetro del agitador. El subíndice **1** representa los valores de planta y el subíndice **2** a los valores de laboratorio. El valor del diámetro del agitador correspondiente a la escala de planta fue tomado de los valores disponibles en la empresa, siendo éste igual a 25 cm.

Los tanques para la dosificación de la resina y para el almacenamiento de agua correspondiente al sistema de enfriamiento fueron dimensionados a partir de la capacidad requerida para su fin con un porcentaje adicional de seguridad. Para el tanque de almacenamiento de agua, se consideró el volumen ocupado por las tuberías de todo el sistema, así como también el volumen ocupado por la chaqueta de enfriamiento. La Ecuación (3.20) fue la utilizada para el dimensionamiento de los tanques de forma cilíndrica, considerándose la altura y el diámetro de igual longitud según la ecuación 3.27 (McCabe ,2002).

$$\frac{D}{H} = 1 \quad (3.27)$$

Quedando la expresión del volumen de un cilindro como se muestra:

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{\pi}} \quad (3.28)$$

Para la determinación del volumen correspondiente a las tuberías, se calculó el diámetro nominal de las mismas, esto a partir del nomograma de diámetro económico reportado en (Silva ,2001), para el cual se debió determinar la viscosidad del agua a la temperatura ambiente y el caudal que circularía por dichas tuberías.

El cálculo de la potencia de la bomba, se determinó a partir de la ecuación 3.29 (Silva, 2001).

$$\frac{v_1^2}{2 * g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma} - h_{L,acc} + H_{req} = \frac{v_2^2}{2 * g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \quad (3.29)$$

Donde **v** es la velocidad del fluido, **P** la presión del fluido, **z** la altura desde un punto de referencia definido, **h<sub>L,acc</sub>** las pérdidas por longitud de tuberías y accesorios, **γ** el peso específico del fluido y **g** la aceleración de la gravedad.

El volumen de control seleccionado para el éste cálculo se define por la flor del líquido del tanque de almacenamiento de agua (subíndice **1**) y la descarga del sistema de enfriamiento (subíndice **2**) el cual correspondía al mismo tanque de almacenamiento ya que dicho sistema consistió en una recirculación del fluido. Teniéndose la igualdad entre las presiones, la altura entre la descarga y la flor del líquido en el tanque como despreciable y la baja velocidad del fluido correspondiente al subíndice **1**, el cabezal de la bomba quedó como se muestra en la ecuación 3.30.

$$H_{req} = \frac{v_2^2}{2 * g} - h_{L,acc} \quad (3.30)$$

Las pérdidas correspondientes a las tuberías se determinaron a partir de la ecuación 3.31 (Silva ,2001).

$$h_{L,acc} = \left[ \sum K + \left( \frac{L_t}{D_i} + \sum \frac{L_e}{D} \right) * f_D \right] * \frac{v_2^2}{2 * g} \quad (3.31)$$

Donde **K** representa los coeficientes de pérdidas de los accesorios, **L<sub>e</sub>/D** es la longitud equivalente de los accesorios y **f<sub>D</sub>** el factor de Darcy, el cual se determinó a partir del diagrama de Moody, utilizando el numero de Reynolds (**Re**) y la rugosidad relativa (**ε/D**). Este último es define a partir del diámetro de tubería según (Silva, 2001). El número de Reynolds se determinó por la ecuación 3.32.

$$Re = \frac{\rho * v * D_i}{\mu} \quad (3.32)$$

Donde **ρ** es la densidad del fluido de enfriamiento a la temperatura ambiente y **μ** es la viscosidad del fluido a la misma temperatura.

Luego la potencia de la bomba quedó definida por la ecuación 3.33.

$$P = \frac{H_{req} * Q * \gamma}{76 * \eta} \quad (3.33)$$

Donde **P** es la potencia de la bomba en caballos de fuerza, **Q** el caudal del fluido y **η** la eficiencia de la bomba.

### 3.6 Estimación de los costos y beneficios de la propuesta mejorada para la factibilidad del proyecto.

Finalmente se calcularon los índices de rentabilidad del proyecto diseñado con la finalidad de estimar si el proyecto es factible económicamente o no; estos índices fueron: valor actual, equivalente anual y tasa interna de retorno.

**3.6.1. Determinación de los flujos monetarios asociados con el proyecto de inversión.**

El flujo monetario neto se calculó como la sumatoria algebraica de los flujos monetarios de un proyecto al final de un año, para la determinación del flujo neto se tomó en cuenta la inversión inicial (se considera solo en el primer año del proyecto), los costos operacionales, el impuesto sobre la renta, los cuales representan un gasto, es decir, representan flujos negativos y por otro lado se tienen los ingresos brutos, la capacidad de trabajo y el valor residual (estos dos últimos se consideraron solo para el último año del proyecto) los cuales fueron positivos en la suma de flujos para el cálculo, esto se define a partir de la ecuaciones 3.34, 3.35, y 3.36.

- Para el año cero (inicio del proyecto):

$$F_i = II \text{ Con } i = 0 \quad (3.34)$$

- Para el segundo año hasta el penúltimo año del proyecto.

$$F_i = IB_i - Cop_i - ISR_i \text{ Con } i = 1 \text{ hasta } n-1 \quad (3.35)$$

- Para el último año del proyecto:

$$F_i = IB_i - Cop_i - ISR_i + CT + VL \text{ Para } i = n \quad (3.36)$$

Ahora bien  $F_i$  representa el flujo neto a lo largo de los años del proyecto,  $II$  representa la inversión inicial que se debió ejecutar para el desarrollo del proyecto en el horizonte de planeación,  $IB_i$  representa los ingresos brutos a partir del primer año del proyecto,  $ISR_i$  representa el impuesto sobre la renta el cual se determinó simultáneo a los ingresos brutos; los costos operacionales están representados por  $Cop_i$  los cuales contemplaron todos los gastos relacionados con la ejecución del proyecto; finalmente el capital de trabajo  $CT$  y el valor en libro  $VL$  se consideraron en el último año como un flujo positivo, cabe destacar que  $n$  representa el número total de años del proyecto. La interpretación de todos estos valores y su modelo de cálculo se presentan más adelante.

Según (Gómez y Núñez, 2004), la inversión inicial (**II**) se define como el conjunto de desembolsos necesarios para la adquisición y adecuación de las facilidades de producción donde se incluye, los activos fijos y activos circulantes que se requieren para que el proyecto inicie sus operaciones normalmente. Se calculó a partir de la ecuación 3.37. (3.37)

$$II = CT + CF$$

Donde **CF** es igual al capital fijo el cual comprende la porción inicial destinada a la compra de los activos fijos tangibles e intangibles, se obtiene mediante la ecuación 3.38.

$$CF = AFT + AFI \quad (3.38)$$

Siendo **AFT** los activos fijos tangibles, los cuales fueron todos aquellos activos que se pueden contabilizar económicamente tales como: el terreno donde se quiere instalar el proyecto, la edificación o edificaciones, maquinarias, equipos principales, equipos requeridos para los servicios, entre otros. Los activos fijos tangibles se deprecian durante los años del proyecto y dependiendo de su vida útil tendrán un valor determinado al final del mismo. Por otro lado los activos fijos intangibles **AFI** fueron aquellos que resultaron como consecuencia de los activos tangibles, de estos se conocía el valor inicial pero a diferencia de los activos tangibles no se deprecian durante los años sino que se amortizan, sino poseen un valor al final de los años de planeación; algunos de estos fueron: instalación de maquinarias y equipos, aranceles y otros impuestos por adquisición de activos fijos, estudios de proyecto de ingeniería, imprevistos, etc. Finalmente los activos fijos tangibles considerados en esta investigación fueron los equipos principales y los equipos requeridos para los servicios, así como también las tuberías y accesorios contemplados en el diseño; en el caso de los intangibles fueron los imprevistos y el costo de la instalación de los equipos los considerados en esta investigación. Los modelos adecuados para la determinación de estos valores fueron las ecuaciones 3.39 y 3.40.

$$AFT = \sum_{j=1}^k C_{eq_j} \quad (3.39)$$

$$AFI = \sum_{j=1}^m C_{AFI_j} \quad (3.40)$$

Donde  $C_{eq}$  representa el costo de cada uno de los equipos para un total de  $k$  equipos y  $C_{AFI}$  representa el costo de cada uno de los activos fijos intangibles para un total de  $m$  activos.

En la parte de los activos fijos intangibles se tuvo que la instalación de los equipos ( $I_{Eq}$ ) es el importe para ejecutar la instalación de los equipos principales, lo cual fue complicado de conocer sin embargo según (Gómez y Núñez, 2004) se puede establecer como un 30 % del costo total de los equipos que según lo expresado anteriormente son los activos fijos tangibles, esto se muestra en la ecuación 3.41.

$$I_{Eq} = \frac{30}{100} * AFT \quad (3.41)$$

Otro activo fijo intangible fueron los imprevistos ( $I$ ), los cuales surgen en el proceso para iniciar el proyecto, estos se estimaron a partir de la ecuación 3.42.

$$I = \frac{5}{100} * (AFT + I_{Eq}) \quad (3.42)$$

Por otro lado el capital de trabajo ( $CT$ ) representó la cantidad de dinero necesario para cubrir los requerimientos mínimos de activos circulantes. Es decir, los fondos necesarios para que el proyecto inicie sus operaciones y lo siga haciendo normalmente hasta tanto se produzcan los primeros ingresos; estos costos contemplan los inventarios de materia prima, de productos terminados, de productos en proceso, de repuestos y otros materiales y finalmente el efectivo en caja. Una buena aproximación para el cálculo del capital de trabajo se pudo hacer como lo plantea (Gómez y Núñez, 2004) a partir del 15 % de la inversión inicial, como se muestra en la ecuación 3.43.

$$CT = \frac{15}{100} * II \quad (3.43)$$

Otro de los valores que tomaron en cuenta para el cálculo de los flujos netos durante los años del proyecto fueron los ingresos brutos, estos según (Gómez y Núñez, 2004) representan el producto de la venta de los bienes producidos y/o de los servicios prestados, en este caso viene dado por las ventas de Imerkote® e Imerlux® para esto fue necesario conocer el precio de venta y el volumen de los mismos vendidos cada año. La forma de calcular los ingresos brutos es a partir de la ecuación 3.44.

$$IB_i = Pv * Q \quad (3.44)$$

Donde **Pv** representa el precio de venta por kilogramo y **Q** la cantidad de kilogramos producidos en un año según la planeación del proyecto. El precio de venta se estableció en la sección 3.5 así como también el volumen de ventas para cada uno de los aductos durante los años de planeación.

Ahora bien los costos operacionales involucran una serie de gastos que se deben saldar durante los años de planeación para mantener el proceso funcionando adecuadamente una vez que se pone en marcha, y para mantener también la producción planificada durante los años del proyecto. Para efectos prácticos según (Gómez y Núñez, 2004) esto se contabilizaron al final de cada año, aunque su frecuencia pudo ser mensual, trimestral, semestral, etc. En los costos operacionales se consideraron los costos por materia prima y otros materiales; los sueldos, salarios y beneficios sociales; el combustible y energía; mantenimiento y repuestos; los impuestos exceptuando el impuesto sobre la renta; los alquileres, almacenamiento, distribución y ventas; promoción y publicidad; administración entre otros.

- **Costos por materia prima:** la materia prima según (Gómez y Núñez, 2004) son los elementos que sufren transformaciones hasta alcanzar las especificaciones técnicas requeridas. Deben estimarse de acuerdo a la cantidad de producto a fabricarse en cada uno de los años (ecuación 3.45).

$$C_{mp} = \sum_{i=1}^L (x_i * Q * C_{mp_i}) \quad (3.45)$$

Donde  $x$  es la composición del componente  $i$  dentro del aducto para ambos aductos y  $C_{mp_i}$  es el costo de la materia prima, recordando que ésta involucra la amina, la resina y el diluyente reactivo; los costos varían según sea el aducto, finalmente  $C_{mp}$  representa el costo de la materia prima para cualquier año donde la producción en kilogramos es  $Q$ .

- **Costos por envasado y etiquetado ( $C_{ev-et}$ ):** el envasado y etiquetado representa una inversión considerable que se debe tomar en cuenta dentro de los gastos operacionales, para esto se debió determinar el número de juegos que se pueden preparar anualmente con la cantidad de kilogramos ( $Q$ ) que se especifica en la planeación del proyecto a lo largo de los años, para esto se debió conocer también la cantidad de aducto que lleva involucrado cada uno de los juegos ( $C_{Ad-j}$ ) siendo ésta diferente para los dos aductos. También la cantidad de envases ( $N_{en}$ ) y etiquetas ( $N_{et}$ ) que se utilizan para terminar la presentación de cada uno de los juegos y sus respectivos costos  $C_{et}$  y  $C_{en}$ , en el caso del aducto de amina alifática se emplean dos envases y por consiguiente dos etiquetas y para el aducto de amina cicloalifática tres (ecuación 3.46).

$$C_{en-et} = \frac{Q}{C_{Ad-j}} * (N_{et} * C_{et} + N_{en} * C_{en}) \quad (3.46)$$

- **Costos por mano de obra ( $C_{mo}$ ):** para determinar el costo por mano de obra que la empresa debe invertir todos los años para este proceso, fue necesario tomar en cuenta el total de horas laborales que tiene un empleado normal, así como también se consideró que para la ejecución de la fabricación de los aductos es necesario la presencia de un solo trabajador, el cual además tiene

una remuneración mensual igual al sueldo básico ( $S_{Bm}$ ) establecido en Venezuela para este año (2008) (tabla 3.7).

**Tabla 3.7. Horas laborales al año.**

Descripción	Cantidad de días
<b>Total de días al año</b>	365
Días feriados según ley de trabajo	-10
Sábados del año	-52
Domingo del año	-52
Vacaciones según ley del trabajo	-17
<b>Total del días laborales al año</b>	234
<b>Horas laborales al día</b>	8
<b>Total de horas laborales al año</b>	1872

Fuente: Gómez y Núñez (2004)

Por otro lado se consideró un incremento por concepto de prestaciones sociales, utilidades, INCE y SSO del 77 % con respecto al sueldo normal (Gómez y Núñez, 2004) como un incremento adecuado para las empresas de construcción. También se consideró el tiempo por lotes ( $t_{lote}$ ) y el número de lotes anuales ( $N_{lote}$ ) que se estableció en la sección 3.5. Finalmente se tiene la ecuación 3.47 para calcular los costos anuales por concepto de mano de obra:

$$C_{mo} = \frac{S_{Bm} * 12meses}{1872h/año} * 1,77 * t_{lote} * N_{lote} \quad (3.47)$$

- **Costos por mantenimiento:** los costos de mantenimiento se deben a los desembolsos por concepto de limpieza, revisiones y reparaciones rutinarias, esto se obtuvo como un porcentaje del capital fijo ( $C_F$ ) (Gómez y Núñez, 2004) lo cual para equipos normales se estimó entre 6 y 7 % del capital fijo, en esta investigación se fijó igual al 6,5 % (ecuación, 3.48).

$$C_{\text{man}} = \frac{6,5}{100} * CF \quad (3.48)$$

- **Costos por materiales de consumo:** esta partida se refiere a los materiales e insumos utilizados para las operaciones de mantenimiento del sistema durante el año, lo cual se estimó entre un 5 a 20 % del costo de mantenimiento (Gómez y Núñez, 2004). En esta investigación se fijó igual a 15 % (ecuación 3.49).

$$C_{\text{mat}} = \frac{15}{100} * C_{\text{man}} \quad (3.49)$$

- **Costos por servicios:** son los originados por el consumo de agua y electricidad en el sistema diseñado (ecuación 3.50).

$$C_{\text{Ser}} = C_{\text{Agua}} + C_{\text{Energía}} \quad (3.50)$$

Ahora bien los costos por el consumo de agua anual ( $C_{\text{agua}}$ ) se determinaron partiendo del costo según lo establecido en tarifa nacional por cantidad de agua ( $T_{\text{agua}}$ ) y la cantidad de agua que se necesita en cada uno de los lotes ( $M_{\text{agua-L}}$ ), recordando que el agua se emplea como medio de enfriamiento durante la reacción para la formación de ambos aductos, así como también el número de lotes anuales ( $N_{\text{lote}}$ ) (ecuación 3.51).

$$C_{\text{Agua}} = M_{\text{agua-L}} * N_{\text{lote}} * T_{\text{agua}} \quad (3.51)$$

Al igual se realizó para los costos por consumo de energía considerando la energía total ( $E_{\text{total}}$ ) que consumen los equipos eléctricos, estos eran el calentador por inmersión, la bomba y el sistema de agitación y la tarifa nacional con respecto a los Kw-h de consumo ( $T_{\text{energía}}$ ).

$$C_{\text{Energía}} = E_{\text{total}} * N_{\text{lote}} * T_{\text{energía}} \quad (3.52)$$

- **Costos por seguros:** los seguros incluyen los riesgos industriales y dependen de lo peligroso que sea el proceso, generalmente se estiman como el 1 % del capital fijo (Gómez y Núñez, 2004).

$$C_{\text{seg}} = \frac{1}{100} * CF \quad (3.53)$$

- **Costos de ventas:** aquí se involucraron los métodos de distribución, mercadeo, producción y publicidad del producto para su venta, se estiman como el 8 % de las ventas (Gómez y Núñez, 2004).

$$C_{\text{ven}} = \frac{8}{100} * IB \quad (3.54)$$

- **Costos administrativos:** los gastos administrativos incluyeron los sueldos del personal directivo, alquiler de servicios, gastos de oficina, entre otros. Esos se estiman entre el 2 y 3 % del total de ventas, en esta investigación se fijó igual a 2,5 %.

$$C_{\text{adm}} = \frac{2,5}{100} * IB \quad (3.55)$$

- **Costos por investigación y desarrollo:** contempla los desembolsos que tiene la empresa con respecto a cubrir nuevas investigaciones y desarrollos de nuevos productos para la mejora de su producción. Estos costos se estimaron entre el 1 y 2,5 % del total de las ventas, siendo fijado en esta investigación igual a 1,5 %.

$$C_{\text{inv}} = \frac{1,5}{100} * IB \quad (3.56)$$

Ahora bien considerando todos estos gastos se tiene que los costos operativos fueron:

$$C_{\text{op}_i} = C_{\text{mp}} + C_{\text{en-et}} + C_{\text{mo}} + C_{\text{man}} + C_{\text{mat}} + C_{\text{ser}} + C_{\text{seg}} + C_{\text{ven}} + C_{\text{adm}} + C_{\text{inv}} \quad (3.57)$$

Una vez considerados todos estos gastos, se tuvo que el impuesto sobre la renta (**ISR**) (Gómez y Núñez, 2004) era el costo que se incurre por la obtención de beneficios, se define como la remuneración que percibe el estado y que se deriva de la obligación que tienen las personas naturales y jurídicas de retribuirle un porcentaje de las ganancias (ecuación 3.58).

$$ISR_i = T * ING_i - S \quad (3.58)$$

Donde **T** representa la tasa impositiva según la Ley, **S** es un valor que se debe restar según sea la cantidad del ingreso neto grabable (**ING**). Estos valores se encuentran tabulados para diferentes ingresos netos grabables, como se muestra en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8. Tarifa de impuesto sobre la renta**

Ingreso neto grabable (U.T.)	Tarifa (%)	Sustraendo (U.T.)
Hasta 2000	15	0
De 2001 hasta 3000	22	100
De 3001 en adelante	34	500

Fuente: Gómez y Núñez (2004).

El ingreso neto grabable, se calculó como se muestra en la ecuación 3.59, cabe destacar que fue necesario transformar el resultado a unidades tributarias para poder obtener la tarifa y el sustraendo.

$$ING_i = IB_i - Cop_i - (D + AAFI) \quad (3.59)$$

Donde **D** representa la depreciación total, que como se dijo anteriormente sufren los activos fijos tangibles y **AAFI** representa la amortización de los activos fijos intangibles, el primer término se calculó con la ecuación 3.60.

$$D = \sum_{j=1}^k D_j = \sum_{j=1}^k \frac{C_{eq_j} - V_{Req_j}}{ni} \quad (3.60)$$

Donde  $ni$  la vida útil del y  $V_{Reqj}$  es el valor monetario residual de un equipo al final del proyecto que generalmente se asume igual a cero, sin embargo en este caso se asumió como el 10 % del costo inicial del equipo para una mejor aproximación (ecuación 3.61).

$$V_{Reqj} = \frac{10}{100} * C_{eqj} \quad (3.61)$$

Ahora bien la amortización de los activos fijos intangibles se obtuvo por la ecuación 3.62 (Gómez y Núñez, 2004).

$$AAFI = \frac{AFI}{na} \quad (3.62)$$

Otro término importante para el cálculo de los flujos monetarios netos es el valor en libro total ( $V_{Lt}$ ) del proyecto que no es más que la sumatoria de los valores en libro de todos los activos fijos tangibles ( $V_{LAFTi}$ ) el cual solo se consideró en el último año del proyecto (ecuación 3.63).

$$V_{Lt} = \sum_{j=1}^k V_{LAFTi} = \sum_{j=1}^k (C_{eqj} - D_j * na) \quad (3.63)$$

### 3.6.2. Determinación de la factibilidad económica del diseño propuesto a partir de modelos de rentabilidad.

Los modelos de rentabilidad se emplean para distinguir si un proyecto es rentable o no, estos modelos son: valor actual, equivalente anual y tasa interna de retorno.

El valor actual ( $V_{Actual}$ ) (Gómez y Núñez, 2004) expresa la rentabilidad de un proyecto de inversión en forma de una cantidad de dinero en el presente que es equivalente a los flujos monetarios netos del proyecto a una tasa mínima de rendimiento establecida, este valor se calculó a partir de la ecuación 3.64.:

$$V_{Actual} = \sum_{p=0}^{na-1} \frac{F_p}{(1+ii)^p} \quad (3.64)$$

La tasa mínima de rendimiento (**ii**) se obtuvo como la tasa de interés que aporta el banco en la actualidad, la cual según investigaciones es igual a 13 %, ahora bien si el valor actual resulta un valor monetario mayor a cero el proyecto es considerado rentable.

El equivalente anual ( $E_{\text{Anual}}$ ) (Gómez y Núñez, 2004) representa el beneficio o pérdida equivalente en forma de una serie anual uniforme y se determinó mediante la ecuación 3.65.

$$E_{\text{Anual}} = V_{\text{Actual}} * (R/P_{ii,na}) \quad (3.65)$$

Donde el factor  $R/P_{ii,na}$  representa el factor de recuperación de capital el cual se obtuvo tabulado y se pudo conseguir en dicha tabla conociendo el valor de tasa mínima de rendimiento (**ii**) y los años de vida de proyecto (**na**), esto se puede observar en el apéndice B.

La tasa interna de retorno (Gómez y Núñez, 2004) expresa el beneficio neto actual que se obtuvo en relación a la inversión pendiente por recuperar (ecuación 3.66).

$$V_{\text{Actual}}(ii_n) = 0 \quad (3.66)$$

Donde se debe despejar  $ii_n$  por ensayo y error, este último se comparó con la tasa mínima de rendimiento reportada por el banco y si resulta mayor el proyecto es rentable.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSION

*A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados y las discusiones respectivas.*

#### **4.1 Características relevantes del proceso actual y propiedades de los aductos preparados en el mismo.**

Las condiciones del proceso actual para la fabricación de los aductos fueron tomadas y extrapoladas a un proceso a escala de laboratorio, donde se obtuvieron las características principales durante la reacción y finalmente, una vez producido el aducto, se pudieron obtener las propiedades físicas y la funcionabilidad del mismo. Gracias a esto se obtiene la descripción detallada del proceso actual (Immerc C.A.)

A partir de lo observado se obtuvo que el proceso actual para la fabricación de aductos tanto de aminas alifáticas como cicloalifáticas se lleva a cabo en un reactor cilíndrico construido en acero inoxidable cuyas dimensiones son de diámetro 120 cm y de altura 120 cm. El procedimiento de producción se divide en varios pasos, primero está el acondicionamiento del sistema, que implica el desalojo de cualquier residuo en el reactor; el siguiente paso es la medición de la materia prima donde se pesa toda la amina y se agrega al reactor donde se incorpora un tercio de la resina epóxica mezclándose estos dos compuestos manualmente, una vez realizada la mezcla se deja reposando mientras la reacción está ocurriendo, la temperatura de reacción sube durante varias horas alcanzando un valor máximo posterior a eso ésta desciende, lo que indica que la reacción de esta primera parte ha concluido; la dosificación se realiza por cargas en tres oportunidades, la segunda parte se dosifica una vez que la temperatura haya descendido hasta la temperatura ambiente, realizando de la misma manera un mezclado manual y esperando el tiempo prudencial mientras la temperatura sigue el mismo comportamiento antes mencionado para proceder con la tercera y última carga finalizando así el proceso. Cuando la última etapa de reacción finaliza se

incorpora el diluyente reactivo, el cual se usa para disminuir la viscosidad en el sistema, se mezcla igual manualmente y luego se deja reposar el aducto para su posterior descarga. El producto final se filtra y se envasa manualmente para su comercialización.

Los porcentajes de los componentes contenidos en los aductos no se pueden mostrar debido a que son datos confidenciales de la empresa. Sin embargo es importante destacar que la amina se agrega en mayor proporción que el resto de los compuestos y esto se debe a que en la reacción para la formación de los aductos siempre la ésta es el reactivo en exceso (Dangayach et al., 2001).

De los ensayos preliminares realizados a las mismas condiciones antes descritas (como se realizan en planta) se obtuvieron valores importantes, como lo son los perfiles de temperatura para cada uno de los aductos a estas condiciones y las propiedades físicas iniciales que sirven como patrón para los ensayos realizados posteriormente, los perfiles de temperatura se muestran en la figura 4.1 y 4.2 y las propiedades físicas obtenidas en la tabla 4.1 y 4.2.

En la figura 4.1 se muestra el perfil de temperatura para el aducto con amina alifática donde se observa la variación de las temperaturas obtenidas en cada carga partiendo siempre de un tiempo cero, a diferencia de la figura 4.2 donde se muestra el perfil de temperatura para el aducto con amina cicloalifática en el cual se observa la variación de la temperatura a lo largo de todo el tiempo de reacción para las tres cargas. Esto con la finalidad de mostrar las diferentes maneras de construir un perfil de temperaturas con respecto al tiempo, sin embargo para los ensayos posteriores se realiza de la segunda forma, es decir, la variación de la temperatura a lo largo de todo el tiempo de reacción hasta su disminución.

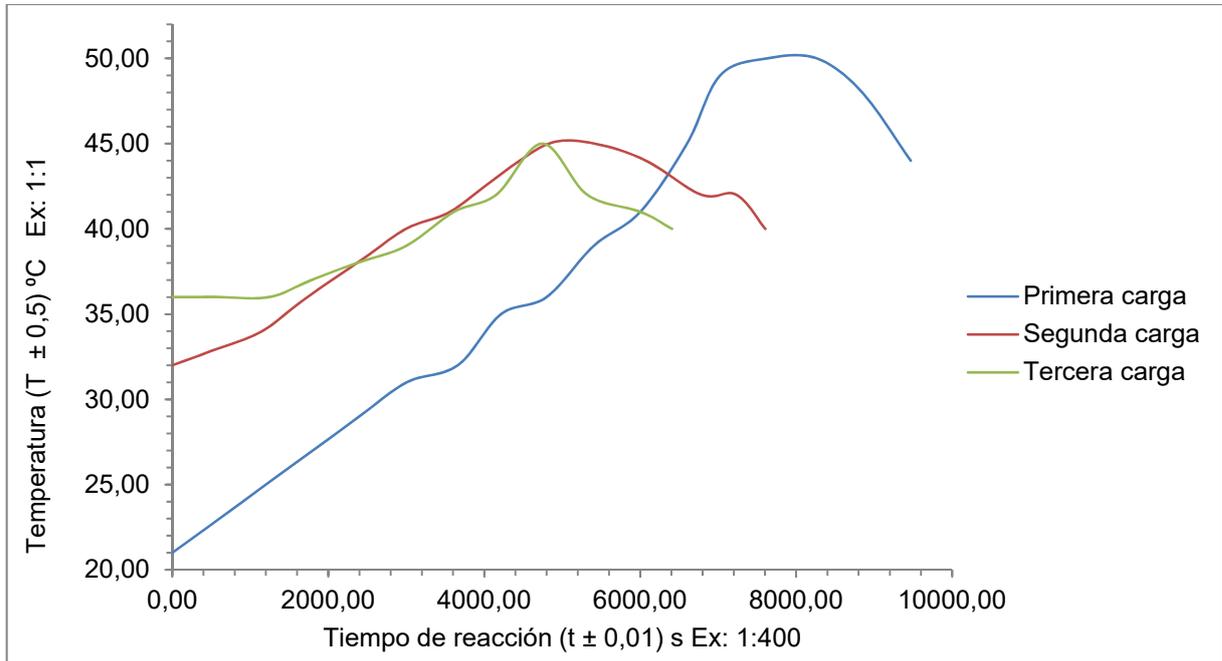


Figura 4.1. Perfil de temperatura para el aducto con amina alifática.

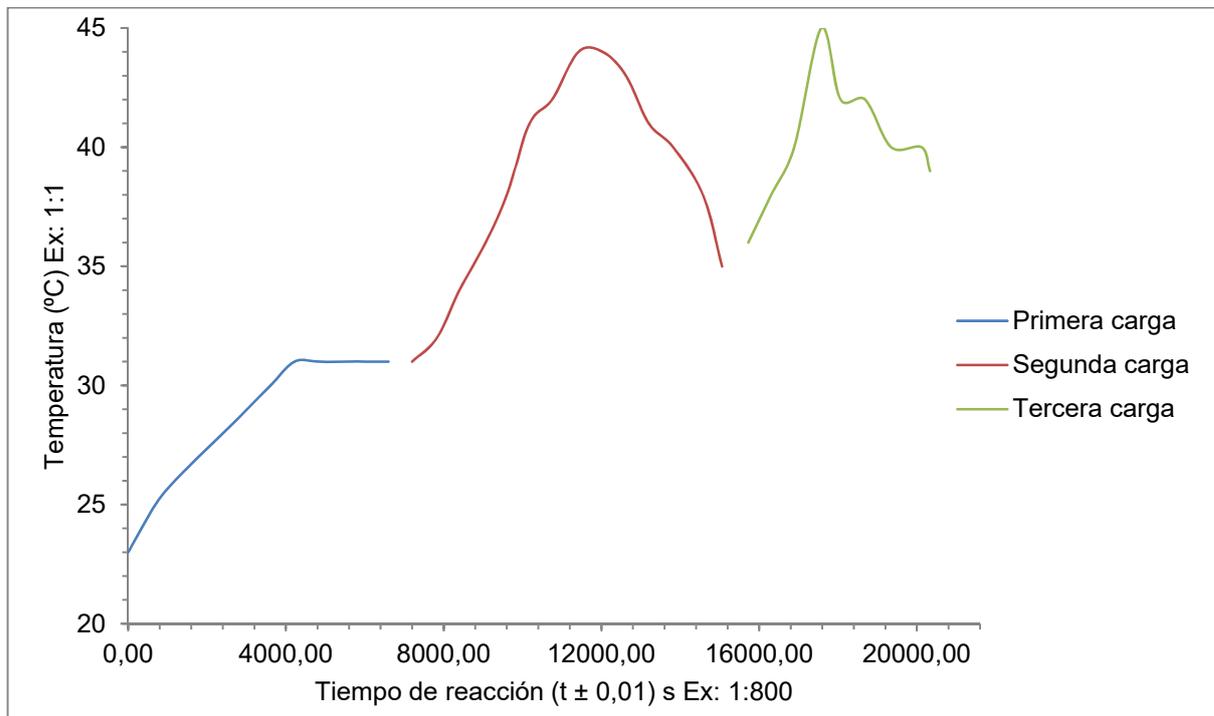


Figura 4.2. Perfil de temperatura para el aducto con amina cicloalifática.

De las figuras 4.1 y 4.2 se observa que la temperatura tuvo un aumento considerable a medida que el tiempo avanzaba, luego alcanzó un valor máximo en cada una de las cargas y comenzó la disminución de la misma hasta la siguiente adición, éste a pesar de haber sido un proceso relativamente controlado ya que las temperaturas que se obtuvieron no son tan elevadas, igual seguía siendo un proceso engorroso debido a que desde el punto de vista del tiempo de producción éste seguía siendo alto, además las propiedades, en concreto la viscosidad, variaban considerablemente lote a lote como se muestra en las tablas 4.3 y 4.4. Esto lo concuerda con lo expuesto por Moretto et al. (1995) con respecto al comportamiento de la reacción para la formación de aductos.

**Tabla 4.1. Propiedades físicas del aducto con amina alifática aplicando el método actual.**

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Valor experimental</b>
Densidad ( $\rho \pm 0,002$ ) g/mL (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	1,022 (25,0)
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en la estufa (%NVM <sub>1</sub> ± 9) %	85
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en el desecador infrarrojo (%NVM <sub>2</sub> ± 0,01) %	92,66
Viscosidad por el método de Brookfield ( $\mu_1 \pm 1$ ) cP (Aguja, RPM, Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	7780 (3, 10, (28,8))
Viscosidad por el método de copa Zahn ( $\mu_2 \pm 32$ ) cP (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	13501 (25,0)
Viscosidad por el método de Gardner ( $\mu_3 \pm 1$ ) cP (Patrón, Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	9850 (Z5, (25,0))

**Tabla 4.2. Propiedades físicas del aducto con aminas cicloalifáticas aplicando el método actual.**

Propiedades físicas	Valor experimental
Densidad ( $\rho \pm 0,002$ ) g/mL (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	1,044 (25,0)
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en la estufa (%NVM <sub>1</sub> $\pm 5$ ) %	48
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en el desecador infrarrojo (%NVM <sub>2</sub> $\pm 0,01$ ) %	48,16
Viscosidad por el método de Brookfield ( $\mu_1 \pm 1$ ) cP (Aguja, RPM, (Temperatura ( $T \pm 0,1$ ) °C))	3530 (3, 20, (28,4))
Viscosidad por el método de copa Zahn ( $\mu_2 \pm 15$ ) cP (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	6304 (25,0)
Viscosidad por el método de Gardner ( $\mu_3 \pm 1$ ) cP (Patrón, (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C))	5417 (Z4-Z5, (23,0))

Una vez realizada la prueba de funcionalidad, tomando en cuenta el valor de **pHr** (relación entre el peso equivalente del aducto y la resina (sección 3.3)), se realizó el curado y se obtuvieron las siguientes observaciones experimentales de las características superficiales en cada uno de los aductos:

- Aducto con aminas alifáticas: Se observó un producto final semicristalino, con superficie uniforme, no pegajosa y brillante. Su curado fue rápido y las temperaturas alcanzadas fueron moderadas.
- Aducto con aminas cicloalifáticas: El producto final obtenido tuvo características similares al aducto descrito anteriormente, la única diferencia fue su cristalinidad, éste era más cristalino.

Por otro lado se puede observar en las tablas 4.3 y 4.4, que a diferentes temperaturas iniciales, en producciones pasadas hechas en Immerc C.A., se obtuvieron diferentes viscosidades en ambos aductos a las condiciones especificadas para el proceso actual, lo que a simple vista se pudo considerar como una variable influyente en el proceso, esto más adelante se toma en cuenta para verificar su influencia mediante un estudio estadístico detallado.

**Tabla 4.3. Viscosidad de aducto de amina alifática para diferentes lotes preparados en la empresa Immerc C.A.**

Lote de producción	Temperatura inicial ( $T \pm 0,5$ ) °C	Viscosidad del producto final ( $\mu \pm 1$ ) cP
1	28,0	7319
2	26,0	15540
3	28,0	6171
4	25,0	13217
5	26,0	13567
6	28,0	1438
7	27,0	18079
8	25,0	16440
9	26,0	8285
10	26,0	24568
11	25,0	34786
12	28,0	4493
13	27,0	8481

Fuente: Immerc C.A. (2007)

Gracias a los ensayos preliminares también se obtuvo una primera lista de las variables influyentes en el proceso de elaboración de los aductos, estas son: grado de entrenamiento de los operarios, los incentivos que estos tienen, la pesada de la materia prima, las condiciones inseguras del sistema, la temperatura ambiente, ausencia de un control en la temperatura de reacción, altas temperaturas, pérdidas por evaporación, la pureza de la materia prima, los proveedores, el tamaño del reactor, el material de

construcción del mismo, modo de adición de la materia prima, el método para la fabricación de los aductos, ausencia de un sistema de agitación y de dosificación, ausencia de un proceso automatizado y finalmente la medición inadecuada de la materia prima.

**Tabla 4.4. Viscosidad de aducto de amina cicloalifática para diferentes lotes preparados en la empresa Immerc C.A.**

Lote de producción	Temperatura inicial ( $T \pm 0,5$ ) °C	Viscosidad del producto final ( $\mu \pm 1$ ) cP
1	26,0	5078
2	27,0	5385
3	26,0	7494
4	28,0	4565
5	26,0	4250
6	26,0	6078
7	25,0	7800
8	27,0	10715
9	28,0	6434
10	26,0	6838
11	25,0	2900
12	28,0	3701
13	26,0	7330

Fuente: Immerc C.A. (2007)

A partir de dichos valores se estableció un promedio de las menores viscosidades obtenidas por la empresa, menor a 10000 cP con respecto al aducto de amina alifática y menor a 6000 cP con respecto al otro aducto, esto es con el fin de fijar un valor estándar que sirvió como comparación para los ensayos posteriores, siendo para el aducto de amina alifática igual a  $(6331 \pm 1)$  cP y para el aducto de amina cicloalifática igual a  $(2518 \pm 1)$  cP.

Todas estas variables fueron clasificadas en un diagrama causa-efecto (figura 4.3), con la finalidad de resumir por áreas como mano de obra, metodología, medio ambiente, materiales, maquinaria y medición, dichas variables.

De las investigaciones previas y las pruebas preliminares puede observarse como la temperatura inicial, es decir, la temperatura ambiente influye notablemente, ya que a diferentes temperaturas iniciales se obtienen diferentes viscosidades como se muestra en la tabla 4.3 sin ninguna tendencia, lo que lleva a la suposición que dicha temperatura puede influir en las propiedades finales.

Otra variable importante es la agitación ya que sin la debida homogenización de la materia prima la reacción tarda en comenzar el cambio ascendente en la temperatura provocando un tiempo de reacción elevado así como también algunas áreas muertas que no reaccionan para formar el aducto provocando errores en su funcionabilidad.

Cabe destacar que la temperatura de reacción no está controlada adecuadamente por esta razón el proceso se realiza en varias cargas, evitando de esta manera un aumento brusco en la temperatura. Esta temperatura podría mantenerse si existiera la presencia de un sistema de control, reduciendo así el número de cargas y por ende el tiempo de reacción para la producción de los aductos Moretto et al. (1995). Con esto surge la inquietud de que si el número de cargas puede ser reducido porque no se realiza una dosificación continua ó una dosificación en una sola carga y con agitación continúa; actualmente no existe un sistema de dosificación y todas las maniobras se realizan manualmente lo cual también puede influir en las propiedades finales. Como el proceso es netamente manual, salvo por la reacción química, todos los errores asociados a equivocaciones de los operarios pueden influir.

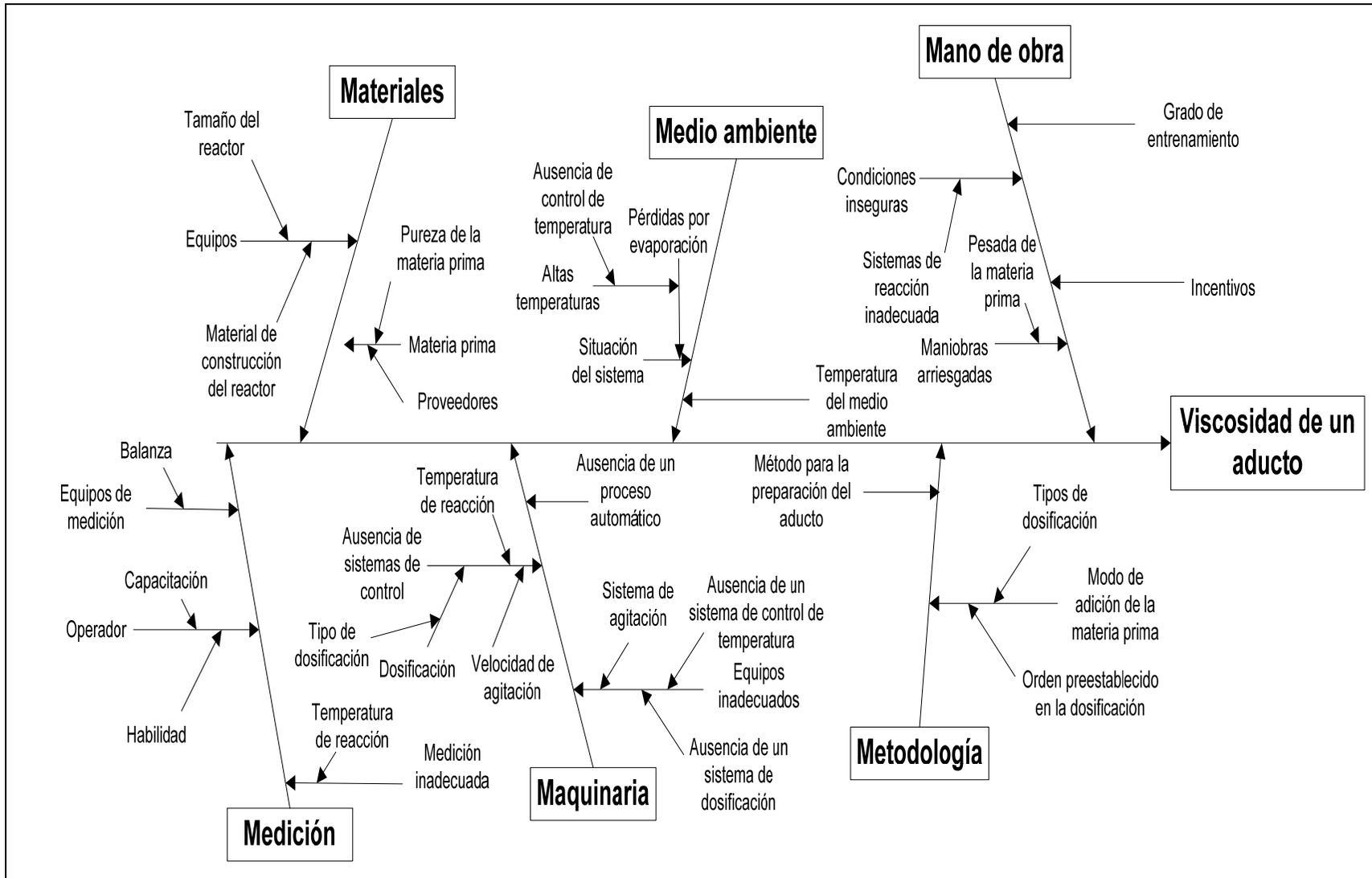


Figura 4.3. Diagrama causa-efecto de todas las variables que afectan en la fabricación de los aductos de aminas.

Por otro lado la materia prima influye en las características finales sin embargo son variables que difícilmente se pueden modificar ya que la empresa no produce estas materias primas sino que las adquiere por proveedores externos, lo que se recomienda mantener un control de la materia prima adquirida, realizándoles estudios para así conocer la calidad de las mismas.

Las condiciones del reactor no afectan directamente las propiedades finales sin embargo afecta el rendimiento de la reacción, debido a que a las altas temperaturas que se obtienen se dan pérdidas por evaporación de la amina y estas pérdidas se escapan al ambiente por ser un reactor completamente abierto. Sin embargo se desconoce la influencia de las condiciones de diseño del reactor y del sistema sobre el proceso por no tener una comparación con otro sistema en otras condiciones, para así observar cuáles serían las variaciones en las propiedades de los aductos de ser el caso.

Gracias a toda esta investigación se logró construir una matriz de selección mostrada en la tabla 4.5 donde se le asignó un puntaje a cada una de las variables para finalmente deducir que las variables más influyentes fueron: temperatura del medio ambiente, ausencia de un sistema de dosificación y ausencia de un sistema control para la temperatura de reacción (figura 4.3.1.).

Para determinar esto se establecieron criterios de evaluación donde la libertad de modificación de las variables obtuvo el mayor valor, ya que es insignificante escoger una variable que sea difícil o casi imposible modificarla para observar su efecto a diferentes valores; el siguiente criterio tuvo un menor puntaje, éste fue la influencia de las variables en el proceso obtenida por investigación teórica, el cual a su vez tuvo un mayor puntaje que la influencia por pruebas preliminares, esto se debe a que lo investigado teóricamente tiene un mayor peso, ya que se supone que es el producto de investigaciones exhaustivas en diferentes condiciones, así como también las investigaciones realizadas en la empresa son producto de años de fabricación de

aductos, lo que le da a las personas especializadas mayor credibilidad en la información suministrada en comparación con los resultados obtenidos en los ensayos preliminares realizados por los autores de éste trabajo.

**Tabla 4.5. Matriz de selección de las variables más influyentes en el proceso para la fabricación de los aductos de aminas.**

Variables		Criterios (Ponderación)			Total
		Influencia por pruebas preliminares (20)	Influencia por investigación teórica (35)	Libertad de modificación (45)	
Mano de obra	Grado de entrenamiento	2	1	2	165
	Incentivos	1	1	1	100
	Maniobras arriesgadas	1	1	1	100
	Pesada de la materia prima	2	2	2	200
	Sistemas de reacción inadecuada	1	1	1	100
	Condiciones inseguras	1	1	1	100
Medio ambiente	Temperatura del medio ambiente	4	3	4	365
	Pérdidas por evaporación	2	2	3	245
	Ausencia de control de temperatura	4	4	4	400
	Altas temperaturas	4	3	4	365

**Tabla 4.5. Matriz de selección de las variables más influyentes en el proceso para la fabricación de los aductos de aminas (continuación).**

Variables		Criterios (Ponderación)			Total
		Influencia por pruebas preliminares (20)	Influencia por investigación teórica (35)	Libertad de modificación (45)	
Materiales	Pureza de la materia prima	1	1	1	100
	Proveedores de materia prima	1	1	1	100
	Material de construcción del reactor	2	2	1	155
	Tamaño del reactor	1	1	1	100
Metodología	Modo de adición de la materia prima	3	2	4	310
	Orden preestablecido en la dosificación	3	2	4	310
	Método actual para la preparación del aducto	3	3	3	300
Maquinaria	Ausencia de un sistema de dosificación	3	3	4	345
	Sistema de agitación	1	2	3	225
	Ausencia de un sistema control para la temperatura de reacción	3	3	4	345
	Ausencia de un sistema de control para la dosificación	3	2	3	265

**Tabla 4.5. Matriz de selección de las variables más influyentes en el proceso para la fabricación de los aductos de aminas (continuación).**

Variables		Criterios (Ponderación)			Total
		Influencia por pruebas preliminares (20)	Influencia por investigación teórica (35)	Libertad de modificación (45)	
Medición	Medición inadecuada de la temperatura de reacción	2	2	3	245
	Capacitación y habilidad del operador	1	1	1	100
	Equipos de medición	1	1	1	100

**Leyenda:** 1: Bajo, 2: Medio, 3: Alto, 4: Muy alto

Se elaboró una matriz de selección a partir de la toda la información recopilada con la realización de los ensayos preliminares, así como también por entrevistas con el personal especializado en la empresa, resultando un método práctico para la escogencia de las variables influyentes.

Era necesario considerar implícitamente aquellas variables que al ser modificadas aportaran mejores condiciones para la fabricación de los aductos desde el punto de vista ingenieril, es decir, aquellas donde se obtuvieran menores tiempos de reacción, mayores ganancias a un bajo costo de inversión, o por el contrario un alto costo de inversión pero con mejores resultados en la producción y en la comercialización de los aductos.

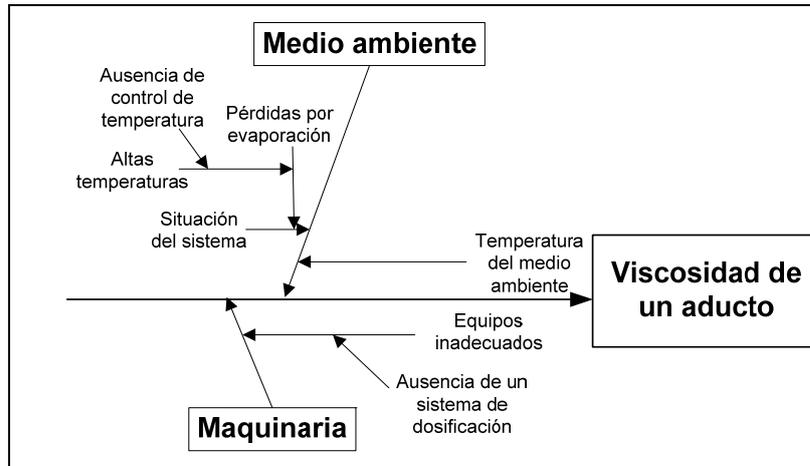


Figura 4.3.1. Diagrama causa-efecto de las variables seleccionadas que afectan al proceso de fabricación de los aductos de aminas.

En la sección 4.2 se explica el diseño experimental que permite describir si las variables seleccionadas influyen o no en la fabricación de los aductos y también se determinan las mejores condiciones para ésta.

#### 4.2 Variables seleccionadas del proceso que afectan las características físicas y la funcionalidad de los aductos obtenidos y factores e interacciones más influyentes.

##### 4.2.1. Selección y estudio de las variables que afectan las características de los aductos.

Luego de haber realizado los distintos modos de preparación de los aductos, se obtuvieron los diferentes resultados para ambos reportados en las tablas 4.6 y 4.7. En dichas tablas se pueden observar las discrepancias que proporcionan en la variable de respuesta y los diferentes modos de preparación.

**Tabla 4.6. Valores de viscosidad obtenidos para el aducto de amina alifática en los diferentes modos de preparación.**

Modos de preparación del aductos	Viscosidad del aducto ( $\mu \pm 41$ ) cP		
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
Toda la resina sobre la amina	14438	16320	15463
Toda la amina sobre la resina	14563	17463	17132
Cargas parciales de resina sobre la amina	14454	13362	13370
Cargas parciales de amina sobre la resina	16807	13778	13768

**Tabla 4.7. Valores de viscosidad obtenidos para el aducto de amina cicloalifática (Ipda) en los diferentes modos de preparación.**

Modos de preparación del aductos	Viscosidad del aducto ( $\mu \pm 25$ ) cP		
	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
Toda la resina sobre la amina	7794	7058	8215
Toda la amina sobre la resina	6783	8357	8181
Cargas parciales de resina sobre la amina	4787	7479	6027
Cargas parciales de amina sobre la resina	10468	10810	10158

Si se comparan los valores de viscosidad obtenidos a través de los diferentes modos de preparación, se observa que las menores viscosidades se consiguieron para el modo de preparación denominado cargas parciales de resina sobre la amina en ambos aductos, ya que lo que se desea alcanzar es la menor viscosidad posible en el proceso de fabricación, de tal modo que dicho resultado es el mejor arreglo para la selección. La selección de este arreglo se hace simplemente mediante la comparación de los resultados obtenidos sin ningún análisis estadístico ya que estos ensayos son preliminares y lo que se busca es plantear un modo de dosificación previo.

Con relación al seguimiento de la temperatura con respecto al tiempo, se obtuvieron las figuras 4.4 y 4.5 para el aducto de amina alifática y cicloalifática respectivamente, cuyos

datos se encuentran reportados en el apéndice A. En dichas figuras se observa que la máxima temperatura de todas las réplicas correspondientes al aducto de amina alifática fue igual a  $(116,0 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$  obtenida en la segunda réplica, y para el aducto de amina cicloalifática fue igual a  $(81,0 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$  correspondiente a la tercera réplica. La discrepancia en el seguimiento de la temperatura entre las réplicas, se debió principalmente a la temperatura inicial del reactor, ya que como no se controlaba, las temperaturas iniciales dependían de la temperatura ambiente al comienzo de la reacción.

Posteriormente, una vez terminada la realización de los 48 tratamientos para ambos aductos a partir del diseño experimental y haber calculado la viscosidad para cada uno de ellos, obtenida según el modelo matemático mostrado en la ecuación 3.3, se obtuvieron los resultados reportados en las tablas 4.8 y 4.9 para ambos aductos. En dichas tablas se puede observar la influencia de cada una de los factores considerados en el diseño experimental del proceso de fabricación.

Si se compara cada uno de los valores de viscosidad obtenidas para las diferentes combinaciones posibles, se observa para el aducto de amina alifática que la variable de respuesta sufre mejoras (viscosidades bajas) para las condiciones de enfriamiento. Esta tendencia es válida ya que según Mata y Rufo (2008) a temperatura controlada el ordenamiento de las moléculas presente en la red de polímeros se realiza de una manera más adecuada produciendo menores viscosidades en el aducto. Con respecto a la velocidad de dosificación se observa que la mejora en la variable de respuesta ocurre a velocidades altas en condiciones de enfriamiento, ya que es donde existe una menor discrepancia en los valores de viscosidad réplica a réplica en comparación cuando no se emplea un sistema de enfriamiento. A pesar de tratarse velocidades altas de dosificación, la adición de la resina sigue siendo a velocidad graduada, por lo que coincide con lo investigado por Moretto et al (1995) donde afirma que la preparación de aductos debe ser a temperatura de reacción controlada y suministro gradual de los reactantes.

**Tabla 4.8. Viscosidad del aducto de amina alifática obtenida a diferentes condiciones de temperatura inicial del reactor, sistema de enfriamiento y velocidad de dosificación de la resina epóxica**

Réplicas	Condiciones del sistema							
	Con sistema de enfriamiento				Sin sistema de enfriamiento			
	Temperatura de reacción 1 (30,0 ± 0,5) °C		Temperatura de reacción 2 (35,0 ± 0,5) °C		Temperatura de reacción 1 (30,0 ± 0,5) °C		Temperatura de reacción 2 (35,0 ± 0,5) °C	
	Velocidad de dosificación 1 (3,65 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (4,48 mL/min)	Velocidad de dosificación 1 (3,65 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (4,48 mL/min)	Velocidad de dosificación 1 (3,65 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (4,48 mL/min)	Velocidad de dosificación 1 (3,65 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (4,48 mL/min)
	Viscosidad del aducto ( $\mu_2 \pm 27$ ) cP							
	Tratamiento 1	Tratamiento 6	Tratamiento 4	Tratamiento 8	Tratamiento 5	Tratamiento 2	Tratamiento 7	Tratamiento 3
1	8653	7002	8122	7512	7189	11095	8814	8873
2	9019	6464	8054	7183	8214	9856	6445	9374
3	7973	7006	7354	7181	6766	9013	6624	8102

**Tabla 4.9. Viscosidad del aducto de *amina cicloalifática* obtenida a diferentes condiciones de temperatura inicial del reactor, sistema de enfriamiento y velocidad de dosificación de la resina epóxica**

Réplicas	Condiciones del sistema							
	Con sistema de enfriamiento				Sin sistema de enfriamiento			
	Temperatura de reacción 1 (30,0 ± 0,5) °C		Temperatura de reacción 2 (35,0 ± 0,5) °C		Temperatura de reacción 1 (30,0 ± 0,5) °C		Temperatura de reacción 2 (35,0 ± 0,5) °C	
	Velocidad de dosificación 1 (2,205 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (3,5 mL/min)	Velocidad de dosificación 1 (2,205 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (3,5 mL/min)	Velocidad de dosificación 1 (2,205 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (3,5 mL/min)	Velocidad de dosificación 1 (2,205 mL/min)	Velocidad de dosificación 2 (3,5 mL/min)
	Viscosidad del aducto ( $\mu_2 \pm 36$ ) cP							
	Tratamiento 7	Tratamiento 5	Tratamiento 8	Tratamiento 3	Tratamiento 4	Tratamiento 6	Tratamiento 1	Tratamiento 2
1	3785	2731	4662	4263	5249	7773	14701	7524
2	4575	4503	3622	5299	5901	6611	8330	6839
3	3955	2101	4855	4782	5418	7335	6652	5550

Con relación a la temperatura inicial (figuras 4.4 y 4.5), ésta no posee una tendencia definida, por lo que su influencia sobre el proceso en la variable de respuesta será justificada con mayor exactitud en base a los resultados de análisis estadístico (figuras 4.10 y 4.14).

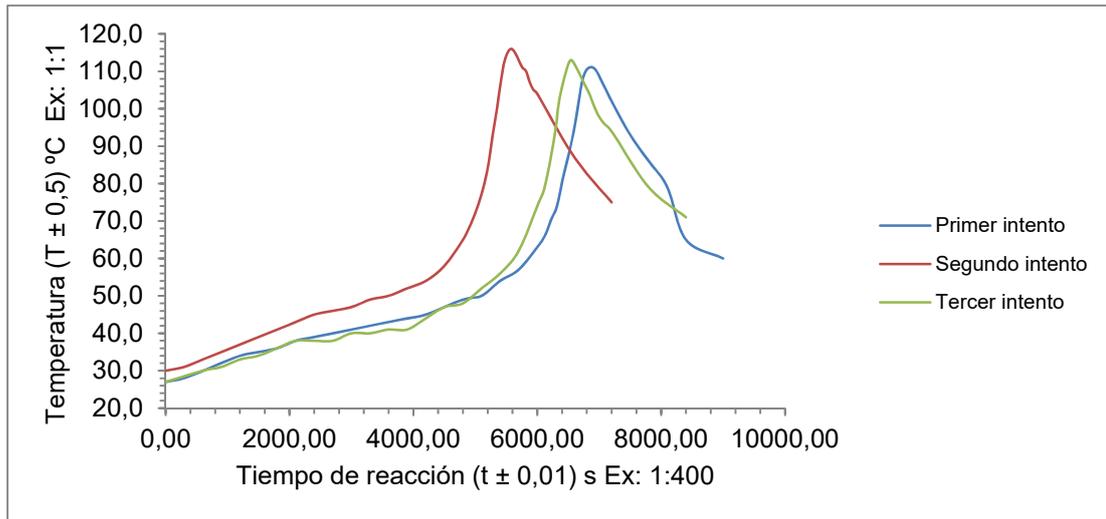


Figura 4.4. Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo de reacción para el arreglo seleccionado del aducto de amina alifática.

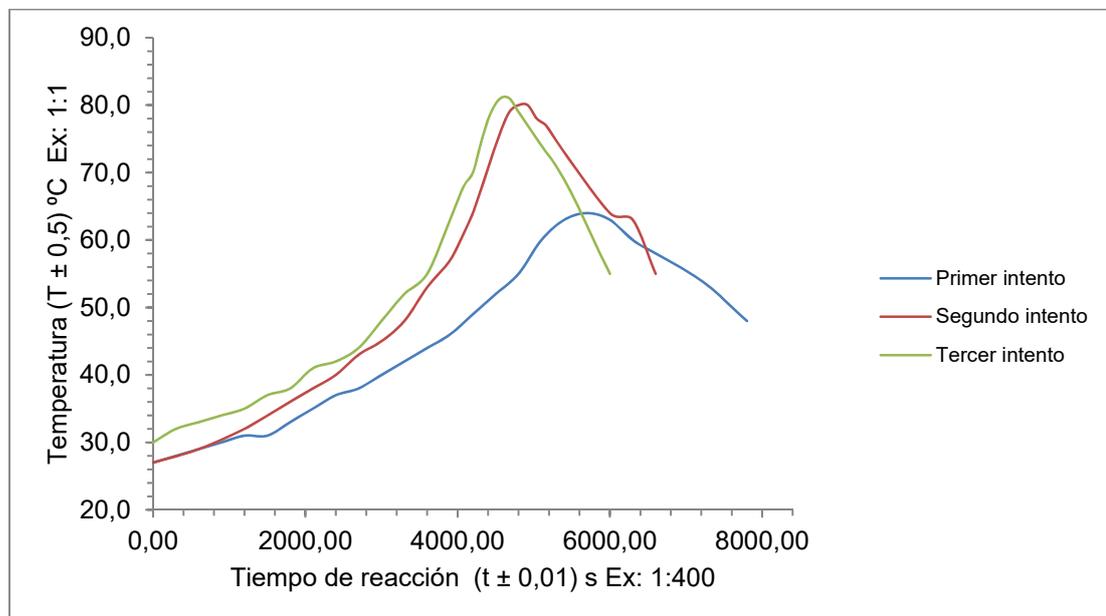


Figura 4.5. Comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo de reacción para el arreglo seleccionado del aducto de amina cicloalifática.

De manera gráfica se pueden observar las viscosidades para diferentes tratamientos (a sus respectivas condiciones) en las figuras 4.6 y 4.7, en estas se compara la variabilidad entre cada una de las réplicas y la diferencia entre cada uno de los tratamientos. De la figura 4.6 se observa que el tratamiento con menores valores en la viscosidad es el número seis y a su vez tiene una tendencia más o menos constante en las viscosidades para cada una de las réplicas, en comparación con el tratamiento número dos el cual tiene una marcada diferencia entre sus réplicas y aporta las mayores viscosidades del sistema.

Con respecto al aducto de amina cicloalifática, los valores de viscosidad obtenidos para las diferentes combinaciones posibles, fueron menores a la condiciones de enfriamiento.

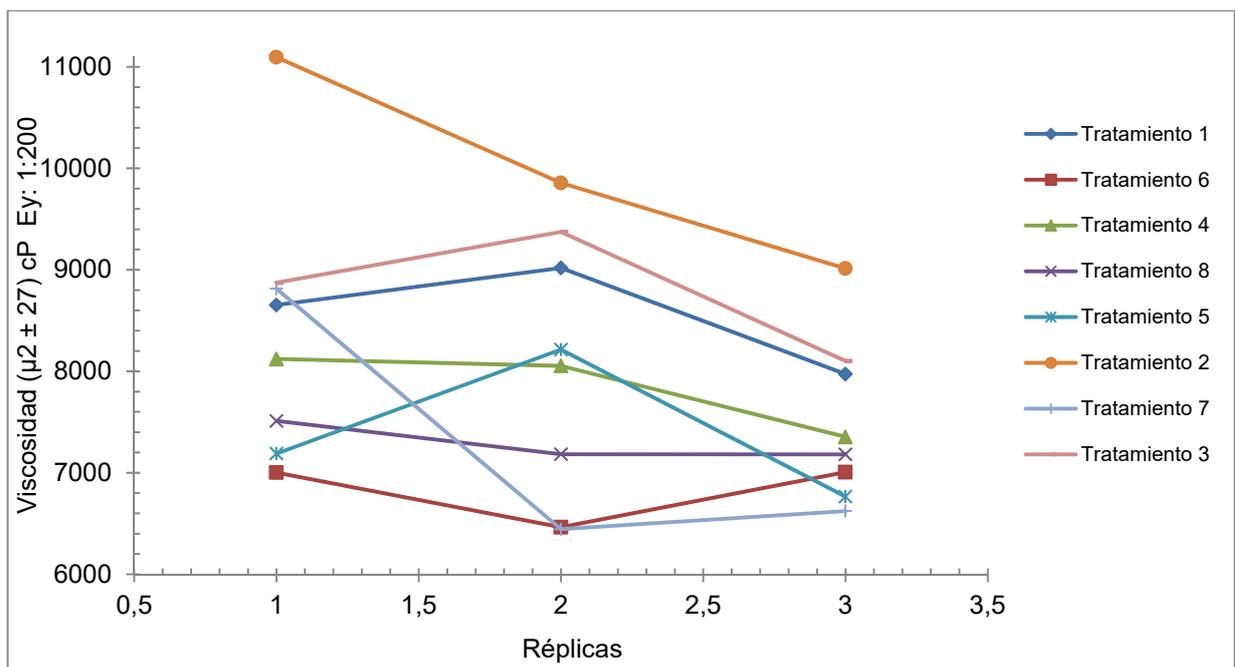


Figura 4.6. Viscosidades del aducto de amina alifática para cada uno de los tratamientos y sus respectivas réplicas.

Este resultado es válido por lo explicado anteriormente para el aducto de amina alifática sobre el reordenamiento de las moléculas. Con relación a la temperatura inicial, se observa que a menor temperatura existe una mejora en la variable de respuesta. Dicho resultado tiene validez debido a que a temperaturas iniciales altas la reactividad de amina aumenta, provocando así una reacción violenta y por ende viscosidades altas. Cabe destacar que la reactividad entre distintos componentes no se da a las mismas condiciones de temperatura, ya que ésta depende de su estructura molecular lo que concuerda con lo mencionado por Moretto et al, 2001. Por último, se observó igualmente una mejora en la viscosidad del aducto con un aumento en la velocidad de dosificación, lo que se justifica con lo explicado anteriormente para el aducto de amina alifática.

Por otro lado en la figura 4.7 se puede observar que el tratamiento número cinco presenta las menores viscosidades, sin embargo su divergencia entre los resultados de las réplicas es representativa, recordando que se quiere hallar aquel proceso donde las viscosidades sean las menores y que estas se mantengan constantes lote a lote; de la misma figura se puede observar que el tratamiento número siete presenta viscosidades bajas en comparación con los tratamientos tres, uno, seis, dos, cuatro y ocho, así como también tiene una tendencia constante entre los resultados de sus réplicas. El tratamiento número uno tiene una variación significativa en la viscosidad de la primera réplica con respecto a las otras dos réplicas esto se debe a errores experimentales al momento de la dosificación de la resina sobre la amina durante la realización del ensayo.

Todas estas comparaciones se realizaron tomando en cuenta los valores promedios para cada uno de los tratamientos los cuales están representados en las figuras 4.8 y 4.9.

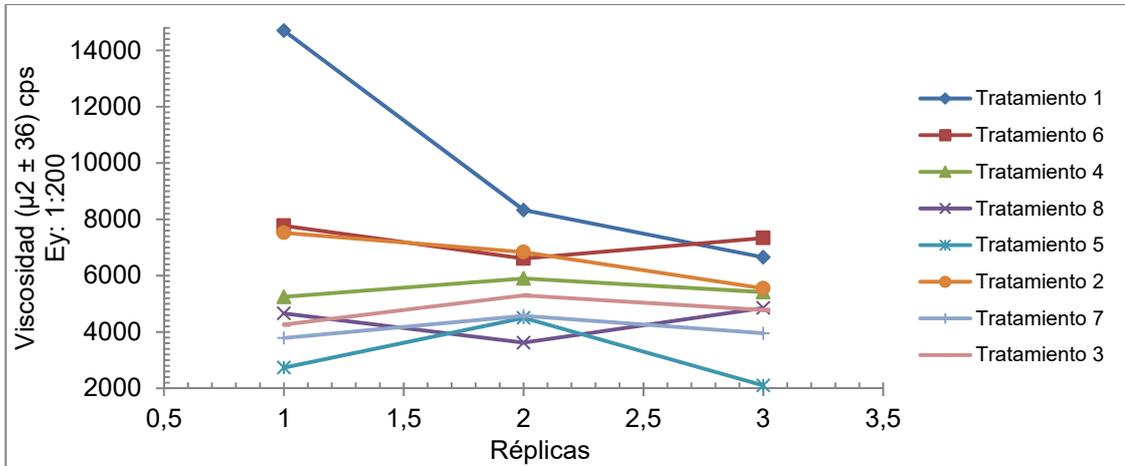


Figura 4.7. Viscosidades del aducto de amina cicloalifática para cada uno de los tratamientos y sus respectivas réplicas.

Según la estadística obtenida, el valor determinado de los cuadrados medios es la desviación estándar de las medidas debido al error experimental más la contribución de la fuente de variación a la respuesta estudiada. Luego el valor  $F_0$  determinado representa una comparación entre las desviaciones debido al factor o interacción de la variable de interés con respecto a la desviación debido al error experimental. La influencia de los factores o interacciones está definida por el patrón de comparación con el valor de distribución F mostrada en el apéndice D (Montgomery, 1996).

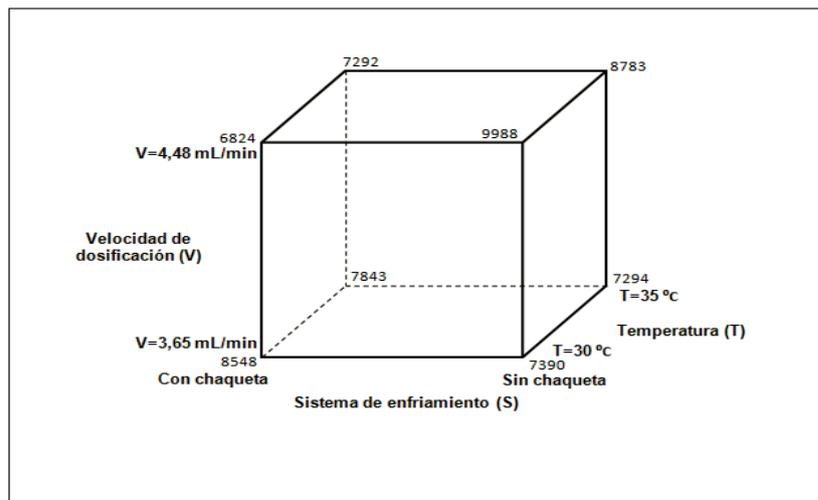


Figura 4.8. Representación cúbica de la viscosidad promedio del aducto de amina alifática para todos los tratamientos diferentes.

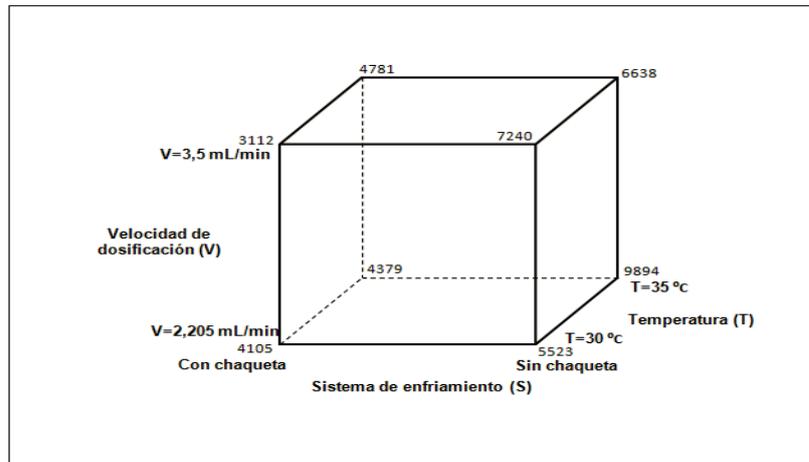


Figura 4.9. Representación cúbica de la viscosidad promedio del aducto de amina cicloalifática para todos los tratamientos diferentes.

Según los resultados obtenidos con respecto a los grados de libertad de los factores e interacciones en el análisis de varianza presentados en la tabla 4.10 y 4.11., la distribución F para el aducto de amina alifática e igualmente para el aducto de amina cicloalifática fue igual a 4,49 para un 95 % de confianza ( $\alpha = 0,05$ ) y de 8,53 para un nivel de confianza igual a 99 % ( $\alpha = 0,01$ ). Según esto se puede establecer que el sistema de enfriamiento y la interacción entre éste último y la velocidad de dosificación son los factores influyentes en la viscosidad del producto final para el aducto de amina alifática, ya que los valores de  $F_0$  para ellos superan el valor establecido por la bibliografía para un nivel de confianza igual a 95 %, siendo éste un valor apto de confiabilidad para dicho análisis. Con respecto al aducto de amina cicloalifática, de la misma manera el sistema de enfriamiento es un factor influyente en la viscosidad del producto final, así como también la temperatura inicial del reactor y la interacción entre los tres factores principales, esto es por lo mismo explicado para el aducto de amina alifática con respecto a los valores  $F_0$  obtenidos.

En la figura 4.10 se puede observar la influencia de las variables principales sobre la viscosidad promedio del aducto de amina alifática, donde la que más afecta dicha propiedad es el sistema de enfriamiento provocando una diferencia de casi 2000 cP en

la viscosidad del mismo, por lo que se comprueba lo demostrado por medio del análisis de varianza ya explicado; de aquí también se puede observar que la temperatura y la velocidad de dosificación tienen una variación sobre la viscosidad de menos de 1000 cP, según los cálculos estadísticos estas variables no influyen significativamente sobre la variable de respuesta. También se puede establecer que empleando un sistema de enfriamiento y a velocidades de dosificación altas las viscosidades son bajas, así como también a temperaturas iniciales altas lo que concuerda con lo expuesto por Moretto et al, 2001.

**Tabla 4.10. Aplicación del análisis de varianza en los datos obtenidos a partir de los tratamientos correspondientes al aducto de aminas alifáticas.**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (GL)	Media de cuadrados (MS)	Fo	F teórico $\alpha=0,05$	F teórico $\alpha=0,01$	Influencia
<b>S</b>	3258649,38	1	3258649,38	5,93	4,49	8,53	*
<b>T</b>	887069,17	1	887069,17	1,61			NS
<b>V</b>	1230142,13	1	1230142,13	2,24			NS
<b>ST</b>	424382,49	1	424382,49	0,77			NS
<b>SV</b>	15178046,94	1	15178046,94	27,62			**
<b>TV</b>	1522,25	1	1522,25	0,00			NS
<b>STV</b>	1954334,46	1	1954334,46	3,56			NS
<b>Error</b>	8793154,77	16	549572,17	-			-
<b>Total</b>	31727301,59	23	-	-	-	-	

**Tabla 4.11. Aplicación del análisis de varianza en los datos obtenidos a partir de los tratamientos correspondientes al aducto de aminas cicloalifáticas**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (GL)	Media de cuadrados (MS)	Fo	F teórico $\alpha=0,05$	F teórico $\alpha=0,01$	Influencia
S	62572680,01	1	62572680,01	22,83	4,49	8,53	**
T	12241892,81	1	12241892,81	4,47			*
V	1703186,07	1	1703186,07	0,62			NS
ST	1249279,23	1	1249279,23	0,46			NS
SV	337533,50	1	337533,50	0,12			NS
TV	4803566,57	1	4803566,57	1,75			NS
STV	15208646,54	1	15208646,54	5,55			*
Error	43858189,92	16	2741136,87	-			-
Total	141974974,6	23	-	-	-	-	

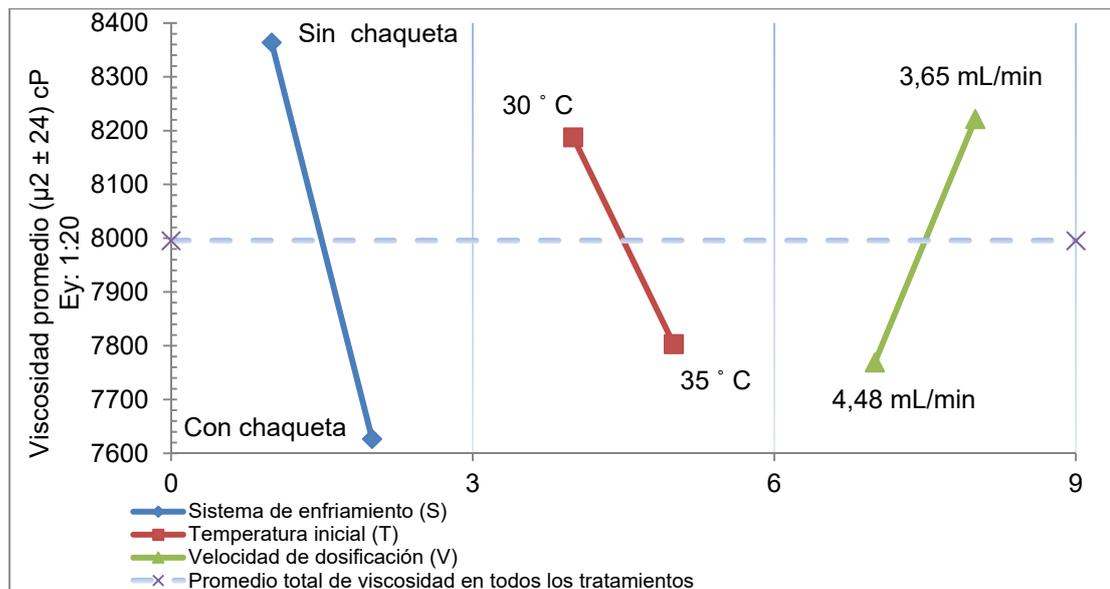


Figura 4.10. Efectos principales sobre la viscosidad del aducto de amina alifática.

Por otro lado se sabe que frente a la existencia de diversos factores en un diseño experimental surge una interacción entre estos que puede o no afectar las propiedades, como si se tratara de una nueva variable de interés; estadísticamente se demostró que la interacción entre el sistema de enfriamiento y la velocidad de dosificación de la resina

influye considerablemente sobre la viscosidad del aducto de amina alifática, ahora bien de manera gráfica también se puede observar esta influencia, analizando las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se puede observar a simple vista que en la figura 4.11 las dos rectas no se cruzan entre sí, esto indica según Montgomery (1996), que no existe interacción entre las variables de estudio, en este caso la temperatura inicial del reactor y la velocidad de dosificación de la resina; esto ocurre también en la figura 4.12, no hay interacción entre el sistema de enfriamiento y la temperatura inicial del reactor. Tomando en cuenta lo anterior y al observar la figura 4.13 se puede notar el cruce entre las rectas, este hecho representa una interacción que influye en el proceso, llamada “SV” lo que concuerda perfectamente con lo demostrado en el análisis estadístico.

Ahora bien en la figura 4.11 se puede observar que manteniendo un nivel en el sistema de enfriamiento constante se tiene que a velocidades de dosificación bajas la diferencia en las temperaturas no afecta considerablemente la variable de respuesta, de manera inversa ocurre cuando las velocidades de dosificación son altas; en la Figura 4.12 no existe un cambio significativo entre el uso de un sistema de enfriamiento o no con respecto las temperaturas sin embargo a temperaturas altas el uso o no de una chaqueta afecta la viscosidad en menor magnitud que a temperaturas bajas.

La influencia de las variables principales sobre la viscosidad promedio del aducto de amina cicloalifática se puede observar en la figura 4.14, donde las variables más influyentes son el sistema de enfriamiento y la temperatura inicial del reactor ya que para niveles diferentes presentan una gran variación en la viscosidad del aducto, teniendo un poco más de 3000 cP de variación para la primera variable y aproximadamente 1500 cP para la segunda, esto concuerda perfectamente con lo demostrado estadísticamente; por otro lado la velocidad de dosificación no afecta considerablemente la viscosidad del aducto de aminas cicloalifáticas. En la figura 4.14 se puede observar que a temperaturas altas y empleando un sistema de enfriamiento se obtienen las menores viscosidades, lo que es de gran interés para esta investigación.

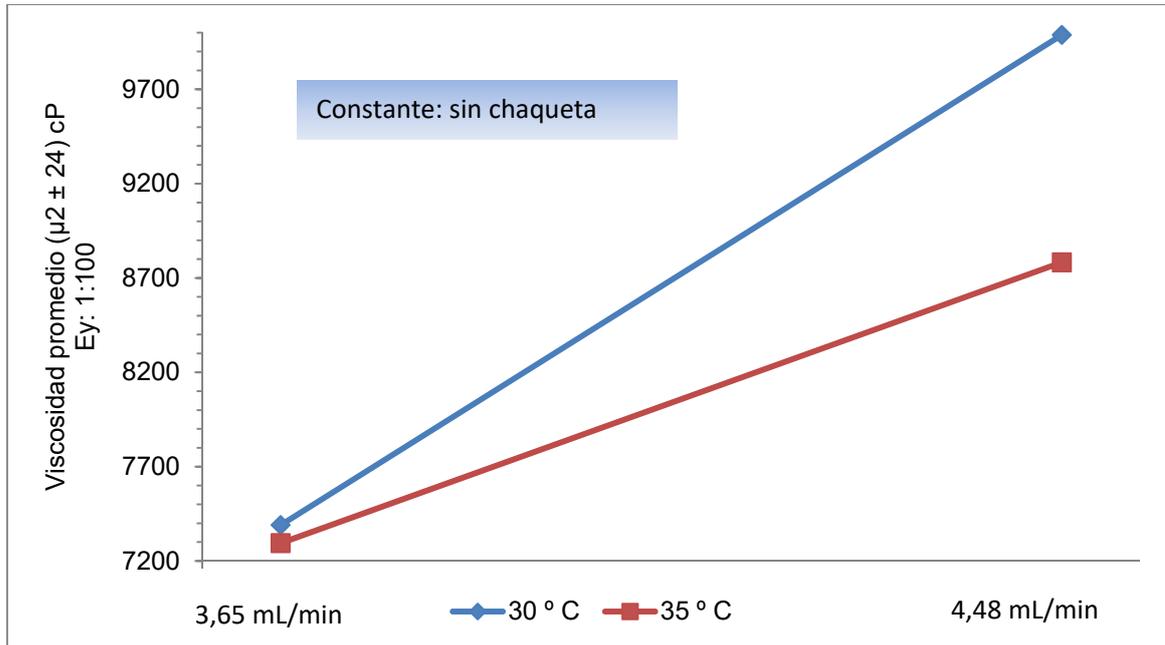


Figura 4.11. Interacción doble entre la temperatura inicial del reactor (T) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina alifática (manteniendo constante uno de los niveles en el sistema de enfriamiento).

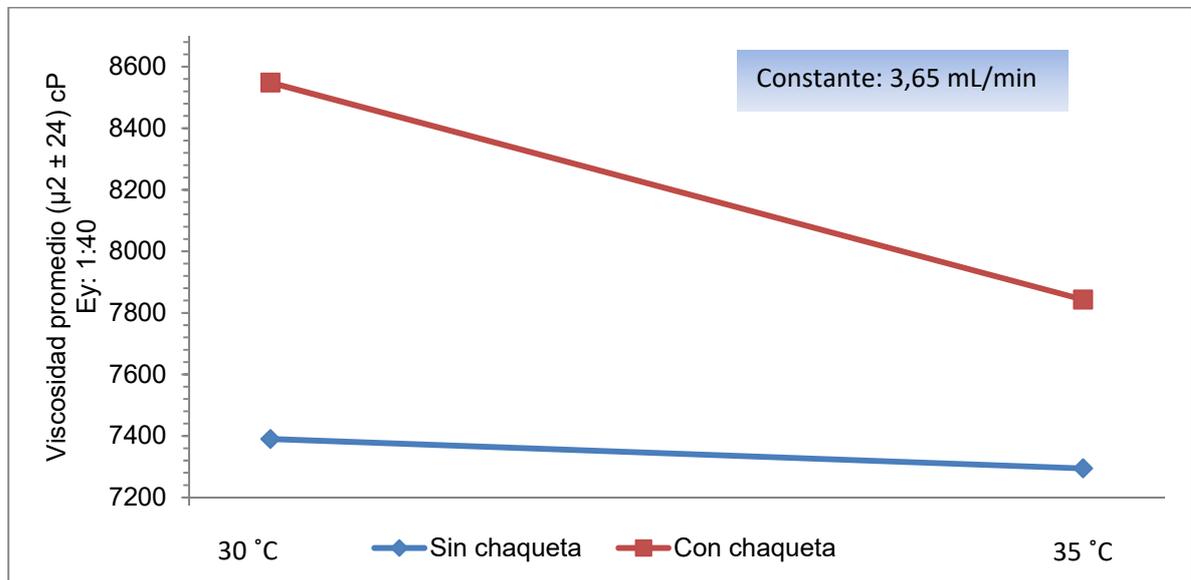


Figura 4.12. Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la temperatura inicial del reactor (T) sobre la viscosidad del aducto de amina alifática (manteniendo constante uno de los niveles en la velocidad de dosificación de la resina).

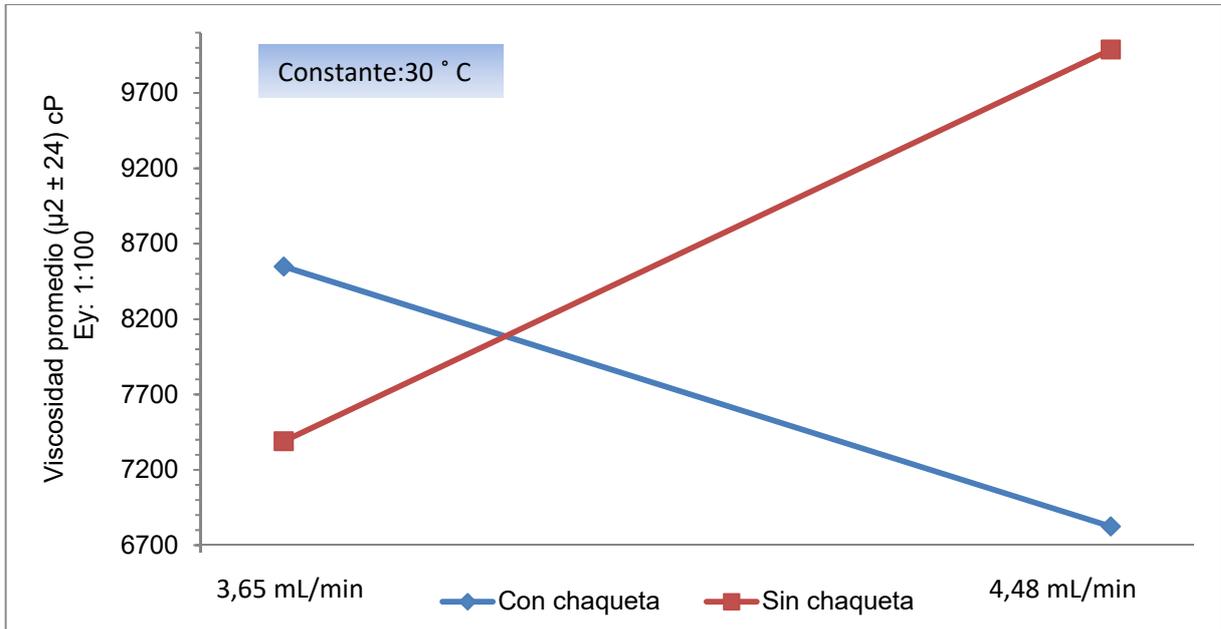


Figura 4.13. Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina alifática (manteniendo constante uno de los niveles en la temperatura inicial del reactor).

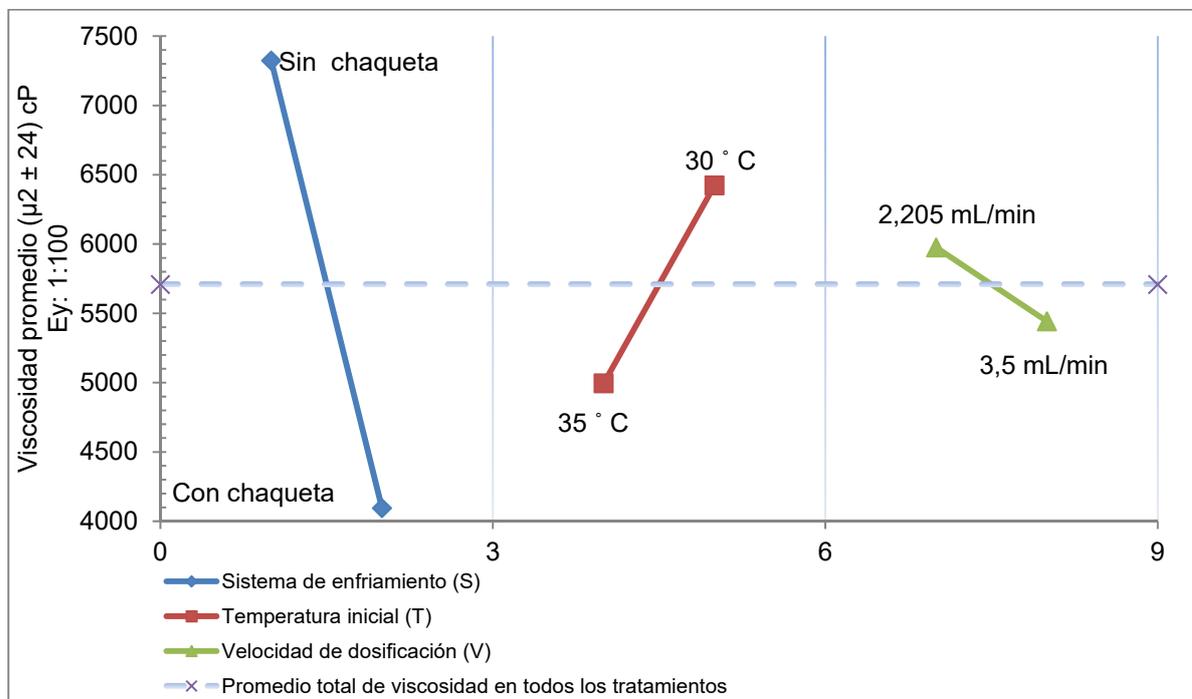


Figura 4.14. Efectos principales sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática.

Ahora bien en este sistema no puede faltar la consideración de las interacciones entre los factores, observando la figura 4.15 se puede notar que a menor velocidad de dosificación de la resina la influencia de la temperatura sobre la variable de respuesta es menor (menos de 500 cP) que cuando dicha velocidad de dosificación es mayor (más de 1600 cP), ahora bien de la figura 4.16 se puede observar que a temperaturas bajas hay una menor influencia del uso o no de un sistema de enfriamiento que cuando la temperatura es mayor donde hay una mayor influencia, finalmente de la figura 4.17 se puede destacar que hay una menor influencia del empleo de un sistema de enfriamiento o no a velocidades de dosificación bajas que cuando éstas son más altas.

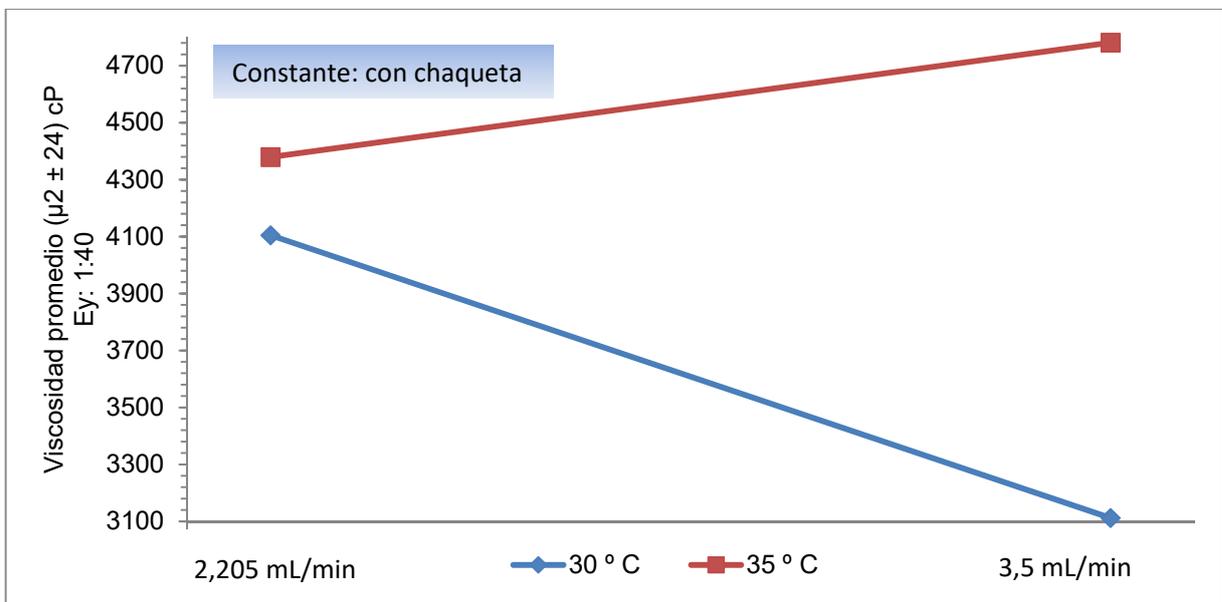


Figura 4.15. Interacción doble entre la temperatura inicial del reactor (T) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática (manteniendo constante uno de los niveles en el sistema de enfriamiento).

La regresión lineal múltiple realizada arrojó la correlación representada por la ecuación 4.1, entre la viscosidad del producto final y los factores e interacciones más influyentes en la variable de respuesta para el aducto de amina alifática.

$$Y = 7995,367719 + 368,4793853 \times S + 795,2475228 \times SV \quad (4.1)$$

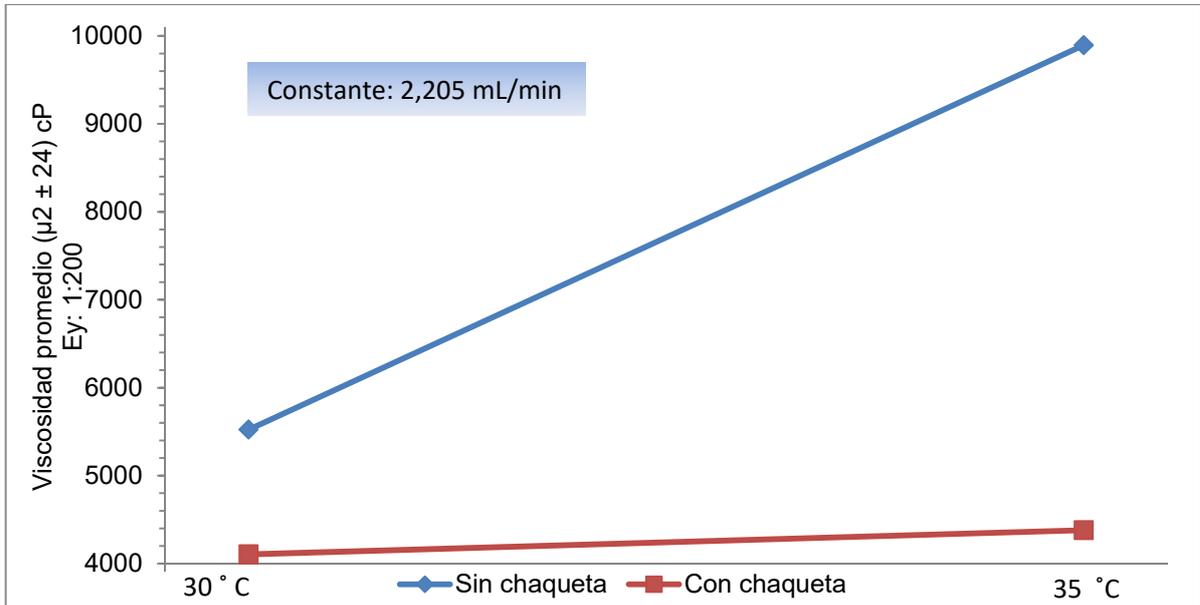


Figura 4.16. Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la temperatura inicial del reactor (T) sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática (manteniendo constante uno de los niveles en la velocidad de dosificación de la resina).

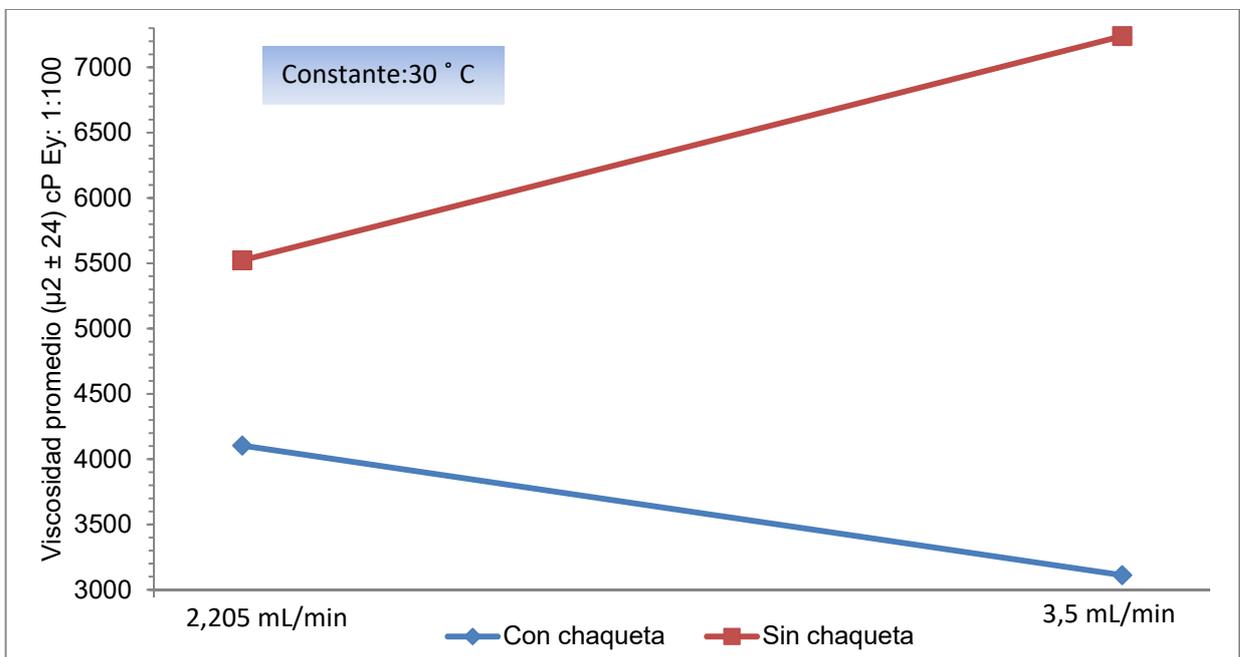


Figura 4.17. Interacción doble entre el sistema de enfriamiento (S) y la velocidad de dosificación de la resina (V) sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática.

Y para el aducto de amina cicloalifática (ecuación 4.2.)

$$Y = 5708,955866 + 1614,681083 \times S + 714,1980588 \times T - 796,0487459 \times STV \quad (4.2)$$

La figura 4.18 y la figura 4.19 representan las gráficas de probabilidad normal a partir de valores presentados en el apéndice D obtenidos empleando las ecuaciones de regresión lineal presentadas anteriormente, dichas gráficas arrojaron una distribución normal adecuada, es decir, se obtuvo una tendencia lineal con un valor de  $R^2$  mayor a 0,90 para ambos aductos, por lo que se verifica que no existe sospecha de algún problema con la normalidad de los datos utilizados para el análisis estadístico, y se verifica la hipótesis de que las variables influyentes en la viscosidad del producto final son las antes mencionada, todo esto siguiendo el procedimiento establecido por Montgomery, 1996 para el estudio estadísticos de diseños factoriales.

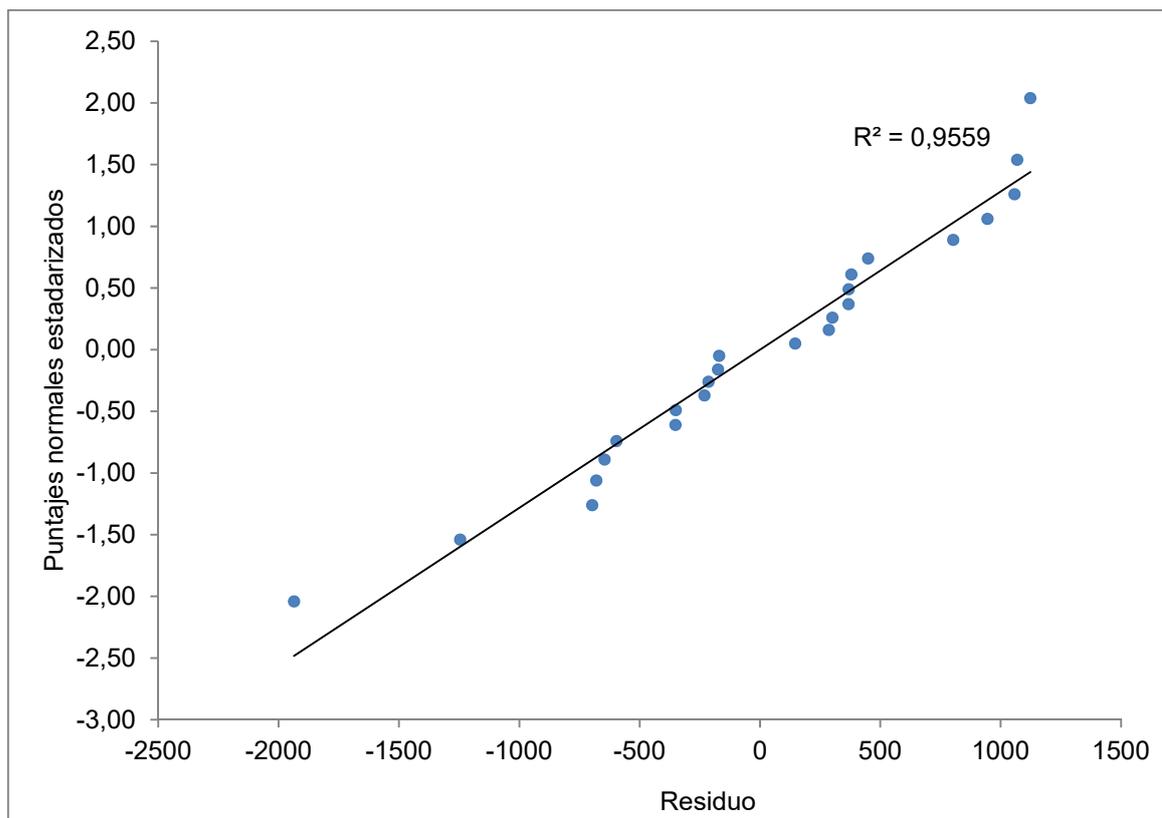


Figura 4.18 Probabilidad normal de los residuos sobre la viscosidad del aducto de amina alifática.

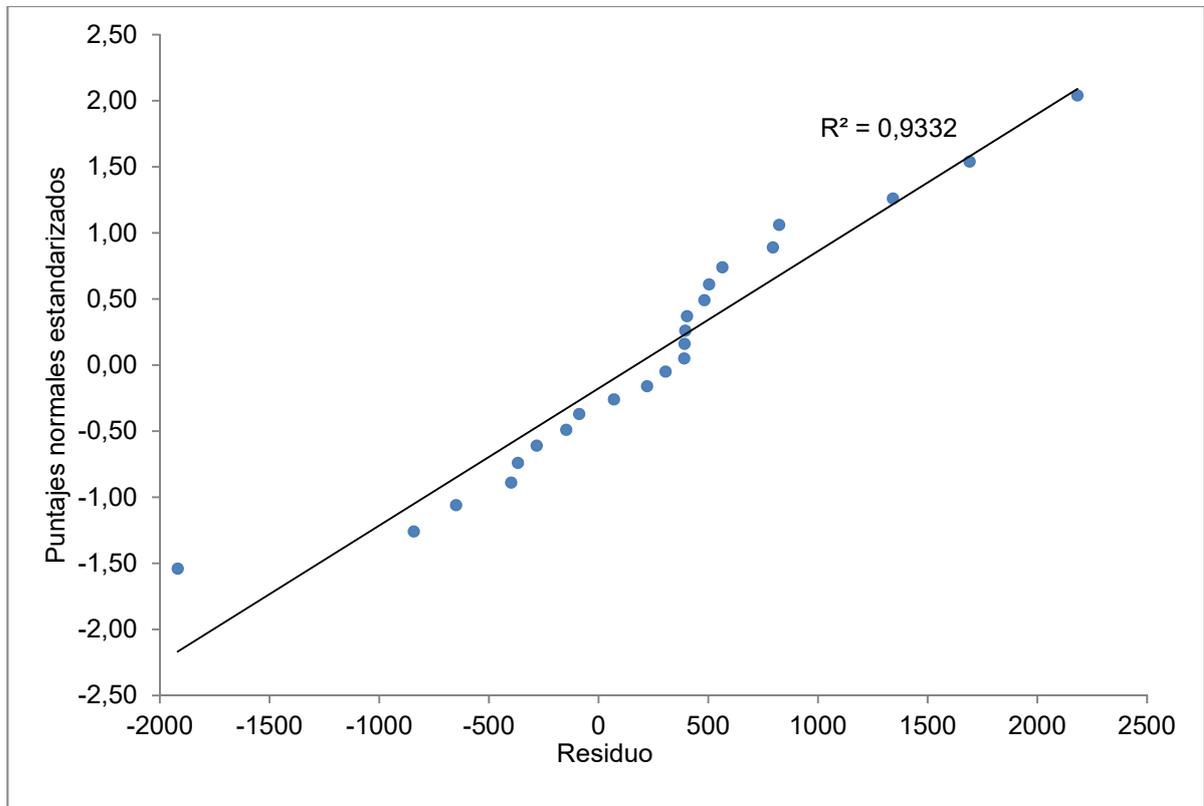


Figura 4.19. Probabilidad normal de los residuos sobre la viscosidad del aducto de amina cicloalifática.

#### 4.2.2. Condiciones de operación adecuadas para la fabricación de los aductos.

Las condiciones más adecuadas para la fabricación de aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas son aquellas que proporcionen resultados a las menores viscosidades posibles, así como también se mantengan éstas dentro de un rango constante lote a lote de producción y la reacción ocurra en un sistema con un control térmico. Las mejores condiciones obtenidas se muestran en la tabla 4.12.

Según estas condiciones las características del aducto de amina alifáticas son las presentadas en la tabla 4.13 y las del aducto de amina cicloalifática son las presentadas en la tabla 4.14; éstas pueden servir como puntos de referencias en fabricaciones futuras siguiendo las condiciones ya mencionadas. También se obtuvo un rango de temperaturas que como se puede ver en la figura 4.20 está entre 60 y 70 °C al igual que el presentado en la figura 4.21 para el aducto de amina cicloalifática. Los datos para la

construcción de estos perfiles de temperatura se encuentran reportados en el apéndice A.

**Tabla 4.12. Condiciones obtenidas en la preparación de los aductos.**

Variables	Condiciones	
	Aducto de amina alifática	Aducto de amina cicloalifática
<b>Sistema de enfriamiento</b>	Con chaqueta	Con chaqueta
<b>Velocidad de dosificación (mL/min)</b>	Alta, aproximadamente igual a 4,48	Baja, aproximadamente igual a 2,205
<b>Temperatura inicial del reactor (°C)</b>	Alta, aproximadamente Igual a 35	Baja, aproximadamente igual a 30

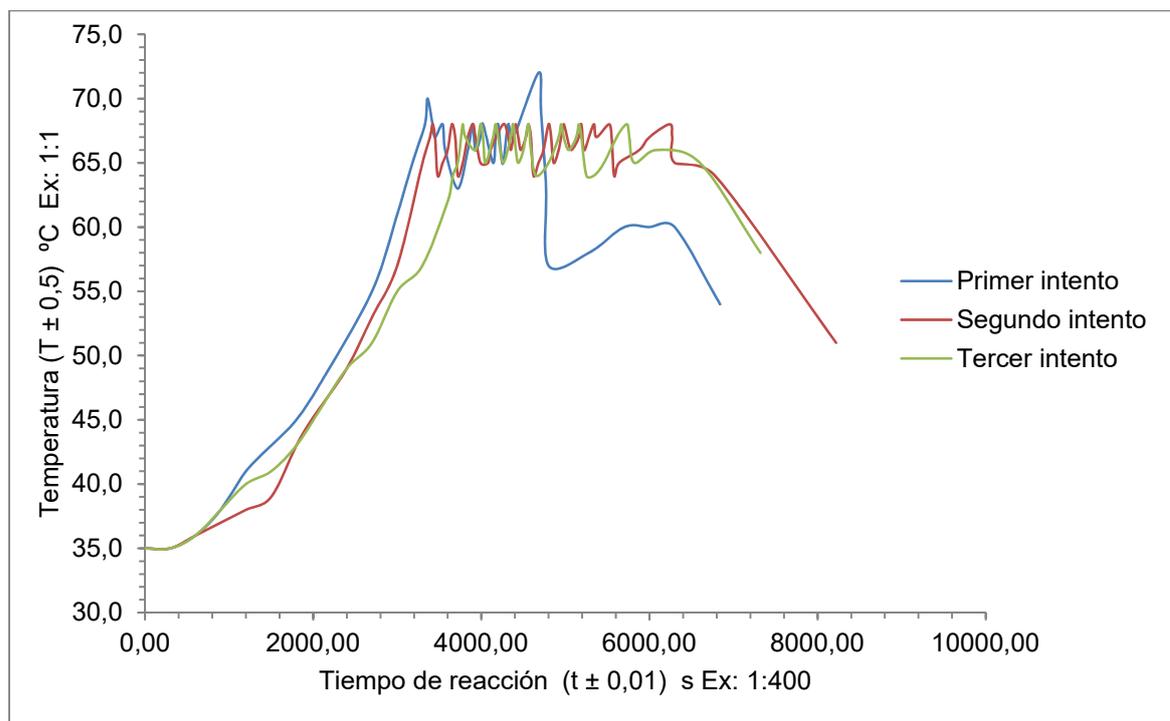


Figura 4.20. Perfil de temperatura con respecto al tiempo para el aducto de amina alifática a las condiciones seleccionadas.

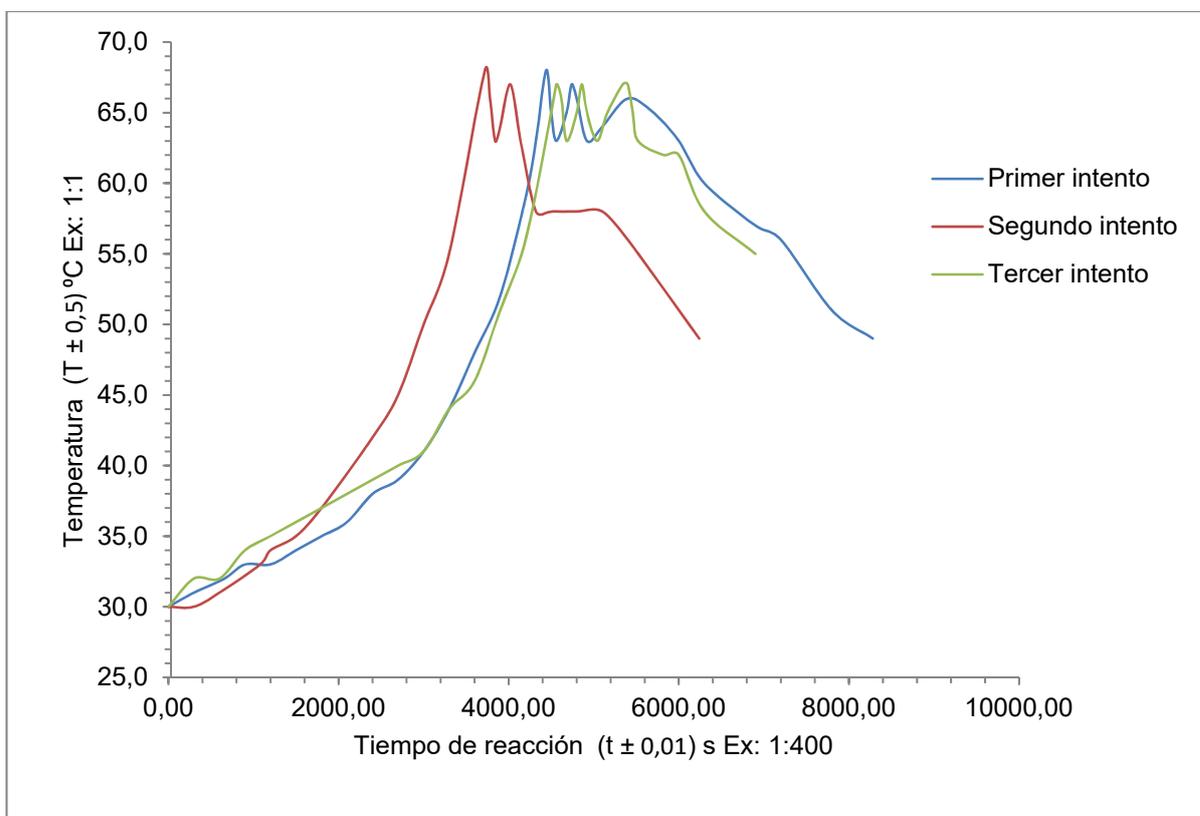


Figura 4.21. Perfil de temperatura con respecto al tiempo para el aducto de amina cicloalifática a las condiciones seleccionadas.

Los productos finales obtenidos a partir de las condiciones obtenidas (tabla 4.12) arrojaron características funcionales adecuadas para su aplicación, siendo éstas un curado adecuado, brillo y dureza a lo largo de toda la superficie, así como también una superficie no pegajosa.

Estas condiciones conllevan al diseño y adquisición de cierto equipo para la elaboración del proceso a nivel de planta, estos equipos pueden ser la de un equipo apropiado para el calentamiento previo de la amina en el reactor, un sistema apropiado para la dosificación de la resina, un reactor encamisado con una capacidad adecuada, así como también la presencia de un agitador de velocidad rotatoria moderada. Dichos equipos y condiciones a nivel de planta, se establecerá más adelante en el estudio del diseño del proceso de fabricación.

**Tabla 4.13. Propiedades físicas del aducto con amina alifática a las condiciones seleccionadas**

Propiedades físicas	Valores experimentales
Densidad ( $\rho \pm 0,002$ ) g/mL (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	1,003 (25,0)
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en la estufa (%NVM <sub>1</sub> $\pm 43$ ) %	83
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en el desecador infrarrojo (%NVM <sub>2</sub> $\pm 0,01$ ) %	95,38
Viscosidad por el método de Brookfield ( $\mu_1 \pm 1$ ) cP (Aguja, RPM, Temperatura ( $T \pm 0,1$ ) °C)	6033 (3, 10, (29,2))
Viscosidad por el método de copa Zahn ( $\mu_2 \pm 18$ ) cP (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	7315 (25,0)

**Tabla 4.14. Propiedades físicas del aducto con amina cicloalifática a las condiciones seleccionadas**

Propiedades físicas	Valores experimentales
Densidad ( $\rho \pm 0,002$ ) g/mL (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	1,042 (25,0)
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en la Estufa (%NVM <sub>1</sub> $\pm 35$ ) %	49
Porcentaje de sólidos no volátiles con secado en el desecador infrarrojo (%NVM <sub>2</sub> $\pm 0,01$ ) %	47,24
Viscosidad por el método de Brookfield ( $\mu_1 \pm 1$ ) cP (Aguja, RPM, Temperatura ( $T \pm 0,1$ ) °C)	2638 (3, 20, (28,8))
Viscosidad por el método de copa Zahn ( $\mu_2 \pm 11$ ) cP (Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C)	4279 (25,0)

### 4.3. Diseño y evaluación económica del proceso.

#### 4.3.1. Análisis del mercado.

##### 4.3.1.1. Situación actual de Immerc C.A.

Con respecto a la situación actual de la empresa, ésta pertenece al grupo de la mediana industria la cual ha experimentado grandes cambios a lo largo de su desarrollo a causa de la experiencia lograda a través de los años de producción; siempre dando lo mejor de manera de cubrir las necesidades de los consumidores. A partir de la calidad de sus productos y de la funcionabilidad de los mismos, Immerc C.A. ha crecido día a día de una manera rápida, por lo que se han visto motivados a la mejora de sus productos tanto en la calidad como en la implementación de procesos de fabricación modernos y automatizados, dos de estos procesos de manufactura son los desarrollados en esta investigación. Con estos procesos se obtienen dos productos los cuales son fabricados a partir de una amina alifática y otra cicloalifática con resina epóxica que son la base para productos como Imerkote® e Imerluxe®.

Los aductos de amina son la base de una amplia gama de productos fabricados por Immerc C.A. siendo los mencionados anteriormente los más comercializados por dicha empresa. El aducto de amina alifática es utilizado solo para la producción de Imerkote®, lo que permite decir que la producción de éste aducto debe ser igual a las exigencias del Imerkote® y de la misma manera, la producción del aducto de amina cicloalifática debe ser equivalente a los requerimientos del Imerluxe®, debido a que dicho aducto solo es usado para la producción de éste último.

Cabe destacar que la producción de estos productos se hace contra pedido, es decir, según las exigencias de los consumidores por lo que no es un proceso continuo en el tiempo se fabrican lotes ocasionalmente, aún así la demanda anual ha ido aumentando los últimos tres años. Otra de las razones por las cuales no existe una producción continua de los aductos es por el desconocimiento del mantenimiento de las propiedades de los aductos lo cual está fuera del alcance de ésta investigación.

Por otro lado según datos de la empresa Immerc C.A. se tienen que la cantidad de clientes más representativos está alrededor de 230 clientes. Todos estos clientes conocen de la existencia de los productos Imerkote® e Imerluxe®, sin embargo el porcentaje de estos clientes que han usado estos productos algunas vez se muestra a continuación en la tabla 4.15.

**Tabla 4.15. Porcentaje de clientes que han usado alguna vez Imerkote® o Imerluxe®.**

Productos	Porcentaje de clientes que han usado estos productos alguna vez (%)
Imerkote®	83
Imerluxe®	90

Fuente: Immerc C.A, 2008.

En la tabla 4.15 se puede observar que a pesar que el 100 % de los clientes conocen la existencia de los productos, gracias a la publicidad realizada en la empresa, no todos adquieren el producto por lo que hay un mercado potencial para el consumo de estos que pueden ser atraídos con mejores labores de mercadeo obteniendo así un aumento en la demanda de los productos.

Por otro lado se tiene la frecuencia con la cual los consumidores adquieren los productos antes mencionados, esto se muestra en la tabla 4.16.

**Tabla 4.16. Frecuencia con que los clientes adquieren Imerkote® o Imerluxe®.**

Frecuencia	Porcentaje de clientes que adquieren los productos en la frecuencia establecida (%)
Semanal	10
Quincenal	45
Mensual	45

Fuente: Immerc C.A., 2008.

Donde se puede observar que la mayoría de los clientes tienen un consumo quincenal y mensual lo que comprueba la decisión de la empresa Immerc C.A. de fabricar los productos antes mencionados contra pedido.

En la tabla 4.17 se muestra la cantidad de juegos que los clientes adquieren al momento de realizar la compra siendo lo más común de 20 a 30 juegos, considerando que esto se realiza cada quince días o un mes se puede decir que el producto tiene gran aceptación y demanda en el mercado.

También se tiene la producción de la empresa Immerc C.A. con respecto a los aductos de aminas alifáticas o cicloalifáticas en los últimos tres años, como se puede observar en la figura 4.22 para el caso de del aducto de amina alifática base de Imerkote® y en la figura 4.23 para el caso del aducto de amina cicloalifática base de Imerlux®.

**Tabla 4.17. Cantidad de juegos que los clientes adquieren de Imerkote® o Imerlux®**

Cantidad de juegos	Porcentaje de clientes que adquieren los productos en la frecuencia establecida (%)
5 a 10	8
10 a 20	19
20 a 30	35
30 a 40	30
Más de 50	8

Fuente: Immerc C.A., 2008.

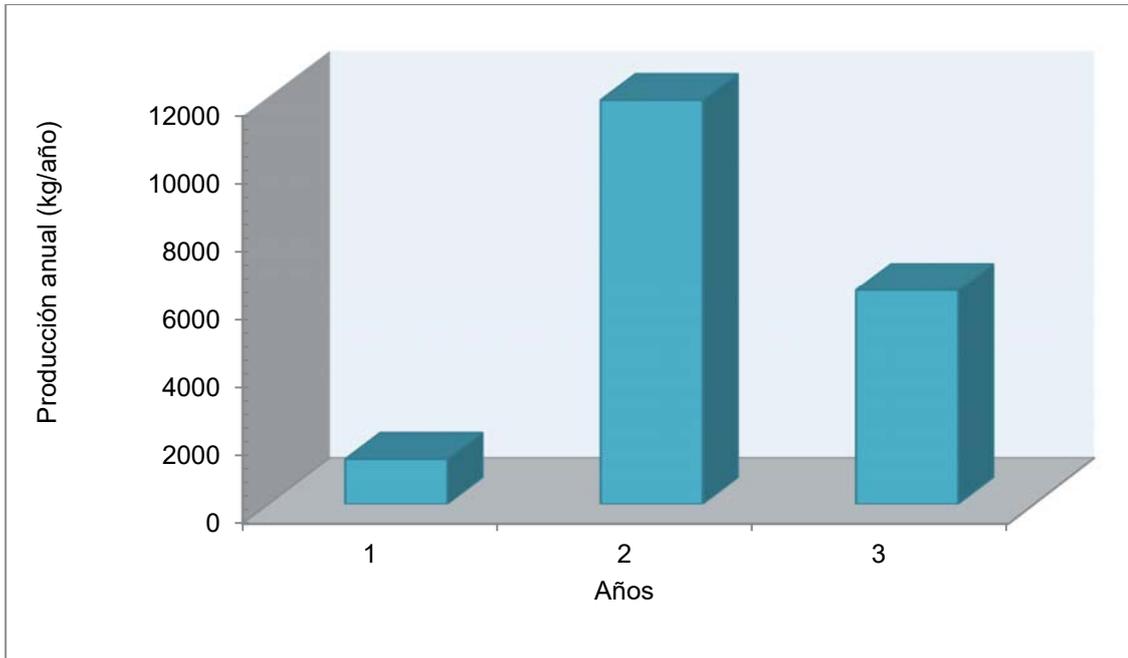


Figura 4.22. Comportamiento de la producción anual de aducto de amina alifática base de Imerkote®.

Fuente: Immerc C.A., 2008.

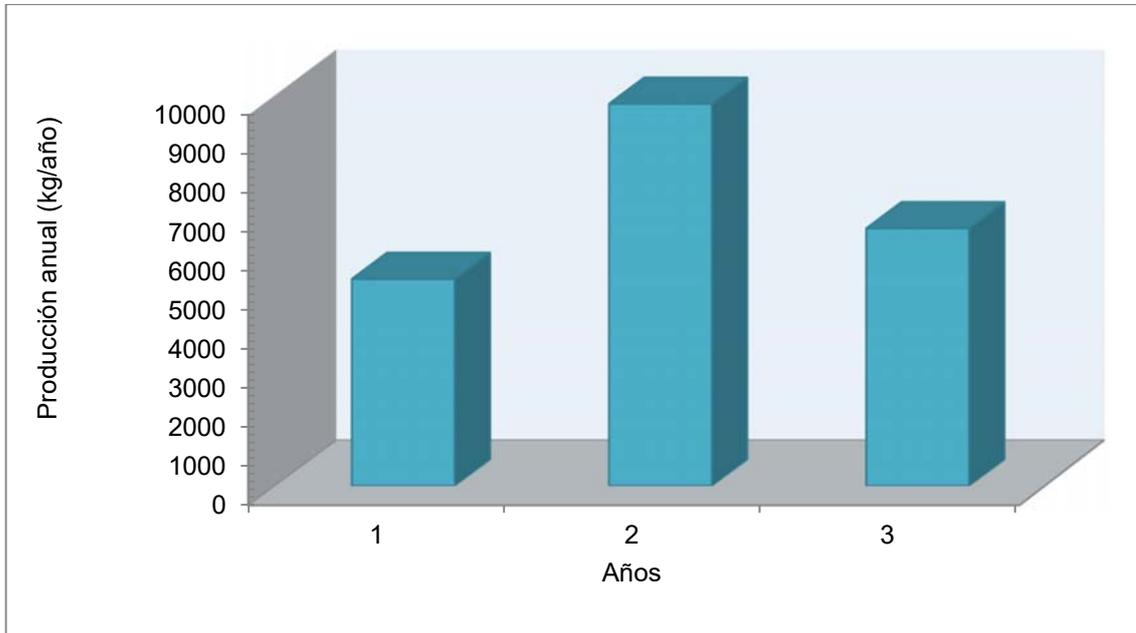


Figura 4.23. Comportamiento de la producción anual de aducto de amina cicloalifática base de Imerlux®.

Fuente: Immerc C.A., 2008.

En las figuras 4.22 y 4.23 se tiene como ha sido la producción a partir del año 2006 hasta el quinto mes del año 2008; la ausencia de más dato se debe a que antes del año 2006 la producción era muy baja por lo que no se llevaban datos exactos de la producción de los aductos. En la figura 4.22 se puede observar que en el año 2 es decir para el año 2007 se tuvo un incremento en la producción bastante marcado con respecto al año 1 (2006), ahora bien en el año 3 (2008) se tiene, que a pesar de que se consideran los datos solo hasta el mes cinco ya se observa que para este tiempo se tiene un poco más de la mitad de la producción del año 2007 por lo que se espera que este año se tenga un incremento considerable en dicha producción. Lo antes explicado se puede aplicar también para el caso del aducto de amina cicloalifática.

Debido a la insuficiencia de los datos no se puede obtener una tendencia adecuada en la producción futura de los aductos para lograr conocer la capacidad instalada sin embargo actualmente la empresa consta con equipos que se pueden emplear para la fabricación de estos aductos como lo son un tanque enchaquetado, agitadores, etc, los cuales no se utilizan en el proceso actual y los utilizados en el proceso actual se emplean a un tercio de su capacidad instalada para el cumplimiento de las exigencias de los clientes. Por otro lado se tiene que la empresa tiene una visión de producir 25000 kilogramos anuales de ambos aductos en los próximos años lo que representa un aumento de más del 100 % con respecto a la fabricación en el año 2007 y cubre las exigencias actuales y el crecimiento de la demanda, estos requerimientos exigidos por la empresa se deben a estudios realizados internamente por la misma.

Debido a los datos suministrados por la empresa se fijó como capacidad instalada 25000 kg/año.

Ahora bien luego de haber fijado la capacidad de diseño, se realizó una investigación con respecto a la competencia y los precios fijados en la misma para la comercialización de productos similares con la finalidad de determinar si los precios de

los productos calculados por Immerc C.A. a partir de los gastos de producción son competitivos en el mercado, esto se muestra en la tabla 4.18.

**Tabla 4.18. Comparación entre el consumo y costo de los productos fabricados por Immerc c.a. con respecto a la competencia**

Producto	Consumo (C) (kg/m <sup>2</sup> )	Rendimiento (R) (Bs.F./m <sup>2</sup> )
Imerkote®.	0,6	42,92
Imerlux®.	0,7	54,38
Producto de la competencia	0,9	70,56

Fuente: Immerc C.A., 2008.

Cabe destacar que lo que se considera para ésta investigación como competencia son los productos comercializados por otras empresas con la misma finalidad que los fabricados por Immerc C.A. De la tabla 4.17 se puede observar que los productos Imerkote® e Imerlux® tienen un menor costo por metro cuadrado que los productos de la competencia así como también el consumo es menor, lo que quiere decir que para aplicar estos productos fabricados por la empresa se necesita una menor inversión que en la competencia sin embargo la diferencia no es tan marcada por lo que el precio calculado por la empresa es adecuado para el mercado de estos productos.

Por otro lado la mayoría de los clientes que adquieren Imerkote® e Imerlux® están satisfechos con la aplicación por lo que se espera que con el paso de los años la demanda se vea favorecida sin poder predecir el comportamiento de la misma con el paso de los años (Immerc C.A., 2008).

#### **4.3.2. Alternativas de tecnologías para el diseño del proceso.**

##### **4.3.2.1. Calentamiento y enfriamiento de tanques.**

- *Tanques con serpentines*

Perry (2001) establece que los tanques con serpentines se pueden conseguir en una amplia variedad de configuraciones, dependiendo de las aplicaciones y de la geometría

del recipiente. Los serpentines helicoidales y en espiral son los más fabricados en talleres, mientras que los de tipo horquilla generalmente se fabrican en el lugar de utilización del mismo. Los serpentines helicoidales se emplean, principalmente, en tanques de proceso y recipientes a presión, en los que se precisa de grandes áreas para un rápido enfriamiento o calentamiento. En general, los serpentines de calentamiento se sitúan en la zona baja de del tanque, mientras que los serpentines de enfriamiento se sitúan en la parte alta del tanque o distribuidos a diferentes alturas del mismo.

La entrada del serpentín debería colocarse por encima del nivel de líquido, de modo que sea posible proporcionar un camino para la expansión del líquido o de salida de vapores. Los serpentines pueden estar dispuestos en pendientes para facilitar el drenaje.

La mayor parte de los serpentines están firmemente sujetos a soportes (pero no soldados). Los soportes deben permitir la expansión pero al mismo tiempo ser lo suficientemente rígidos para evitar movimientos incontrolables.

Por otro lado existen diversas opciones de serpentines, estos se presentan a continuación:

- Los **serpentines de tubos aleteados** se emplean para fluidos con características pobres para transmisión de calor, al objeto de proporcionar una mayor superficie para la misma configuración a un costo reducido, o cuando debe minimizarse el fenómeno de ensuciamiento.
- Los **serpentines de placa o panel** son fabricados con dos hojas metálicas, con una o ambas caras estampadas con relieves para originar caminos preferentes de flujo para el medio de calentamiento o enfriamiento, pueden emplearse en lugar de los serpentines de tuberías. Estos serpentines son ligeros de peso y fáciles de instalar y retirar para su limpieza. Están disponibles en todo un intervalo de tamaños estándar, tanto en forma de placa como en forma de hoja

curvada. Los tanques de proceso se construyen empleando serpentines tipo panel para los lados o el fondo del tanque.

- Los **serpentines de inmersión de teflón** se emplean principalmente en baños de pulidos de metales y son adaptables para su uso en recipientes de reacción, cristalización y tanques que empleen fluidos corrosivos.
- Los **calentadores de bayoneta** consisten en un tubo externo y otro interno. Estos elementos se insertan en tanques y recipientes de proceso con propósitos de calentamiento y enfriamiento. Normalmente el tubo externo está fabricado en aleación cara o en un material no metálico (por ejemplo, vidrio o grafito impermeable), mientras que el tubo interno es de acero al carbono.
- Los **serpentines externos y trazadores** pueden ser colocados en los tanques, recipientes y líneas de tuberías buscando dar lugar a una buena distribución sobre la superficie; suelen ser de cobre blando o aluminio, pudiendo doblarse manualmente para adaptarlos al contorno del tanque o de la tubería.
- *Recipientes encamisados.*

Perry (2001) expone que a menudo se emplea el encamisado en tanques que precisan una limpieza frecuente, así como para recipientes de vidrio que sean difíciles de equipar con serpentines internos. La camisa elimina la necesidad de serpentín y proporciona un mejor coeficiente global de transmisión de calor que los serpentines externos. No obstante solo se dispone de un área limitada para llevar a cabo la transmisión de calor. El encamisado convencional es de construcción sencilla y se emplea con frecuencia, y es más eficaz con un vapor condensable. Un fluido líquido, empleado como agente de transmisión de calor, no mantiene uniformes sus características en el interior de la camisa. Las entradas de horquilla conveniente, capaces de establecer un movimiento de giro en el interior de la camisa, resultan bastantes eficaces para mejorar la transmisión de calor. En estos sistemas, el espesor de pared suele ser bastante elevado, a menos que se instalen anillos de refuerzo.

A veces se instalan deflectores en espiral para mejorar la transmisión de calor en el seno de los líquidos y prevenir la formación de caminos preferentes de flujo, pudiendo diseñarse de modo que actúen como elementos de refuerzo.

Finalmente se escogió el recipiente encamisado como alternativa para el diseño del proceso debido a las ventajas ya nombradas y a la similitud de las condiciones llevadas a cabo en el laboratorio. Por otro lado también se disponía de un equipo similar en la empresa Immerc C.A. lo que influyó en la decisión final.

- *Calentamiento eléctrico por inmersión.*

Según Kern (1981), los calefactores eléctricos más comunes son de tres tipos: el calentador por inmersión, el calentador de tira y el calentador de tipo aleteado. De todos estos, el utilizado para el calentamiento de líquidos es el calentador por inmersión, mientras que, el calentador de tira es utilizado para el calentamiento de sólidos y el aleteado es destinado para los gases.

En general, los calentadores eléctricos consisten de alambres de resistencia embebidos en un material refractario que luego se protege por una cubierta metálica. Los calentadores por inmersión se fabrican con una cubierta metálica de cobre para el calentamiento de agua y con una cubierta de acero para líquidos orgánicos. La temperatura para las cubiertas de acero no debe exceder de los 350 °F, mientras que los calentadores con cubierta de acero no deben superar los 750 °F.

#### **4.3.2.2. Sistema de agitación.**

Con respecto al sistema de agitación a utilizar, la empresa donde se realiza la presente investigación dispone de ciertos agitadores, también conocidos como dispersores, conformados por un eje y un sistema de transmisión (motor). El extremo del agitador contiene un disco dentado el cual proporciona una excelente remoción durante el proceso de fabricación, conduciendo a excelentes resultados bajos condiciones de control de temperatura. El agitador se ubico en eje central del tanque sin ningún ángulo de inclinación.

#### **4.3.2.3. Sistema de dosificación de la resina.**

En caso del sistema de dosificación, se estableció un tanque contenedor de resina junto las tuberías necesarias y la instrumentación requerida para la medición de la velocidad de dosificación.

Dosificación por gravedad y mediante bombeo son las dos tipos posibles para la adición de la resina, consistiendo éste último en un recipiente contenedor de resina ubicado al mismo nivel del reactor, donde se bombea la resina y así lograr su adición. En cambio la dosificación por gravedad consiste un recipiente ubicado por encima del reactor, donde se aprovecha la transformación de la energía potencial a energía cinética para lograr así la adición de la resina.

El método de adición por gravedad fue la opción seleccionada ya que en las instalaciones de la empresa donde se realiza la presente investigación posee de mezzaninas las cuales pueden ser usadas para tal fin; evitando de esta manera la inversión para la adquisición de un sistema de bombeo apto para transportar líquidos altamente viscosos como lo son la resina. Ésta inversión también no es necesaria debido a que las velocidades de dosificación requeridas para el proceso son relativamente bajas comparadas con las velocidades suministradas por los sistemas de bombeo.

#### **4.3.3. Diagramas de bloque y flujo del proceso.**

En la figura 4.24 se puede observar el diagrama de bloques siendo igual para ambos aductos, aquí se puede observar una diferencia con respecto a la Figura 1.1 la cual corresponde al proceso actual, donde se nota una adición de la materia prima por cargas. Recordando que las condiciones establecidas para el proceso mejorado comprenden una dosificación gradual de la resina sobre la amina durante el tiempo de reacción.

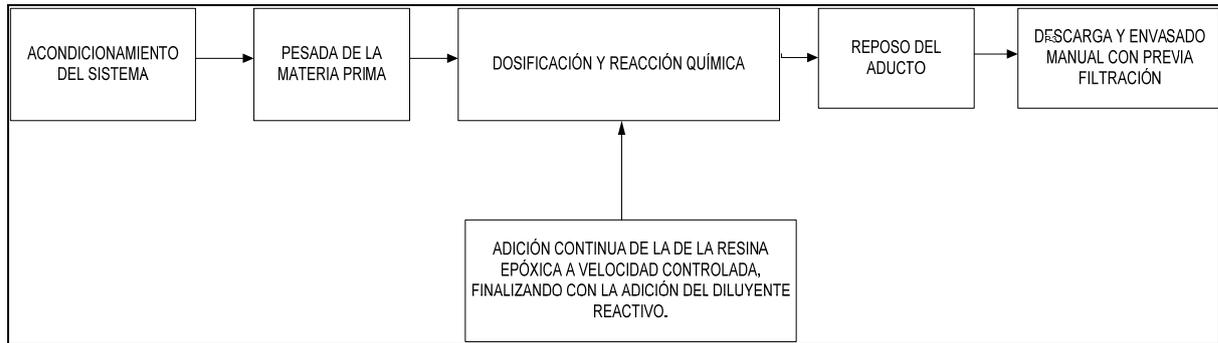


Figura 4.24. Diagrama de bloques del proceso para la formación de un aducto de aminas alifáticas o cicloalifáticas con resinas epóxicas.

Ahora bien por otro lado se tiene el diagrama de flujo del proceso (figura 4.26) donde se pueden observar los equipos principales seleccionados en la sección anterior, tuberías y accesorios y la dirección de los flujos en el proceso. La descripción de cada uno de los equipos se muestra a continuación.

El tanque contenedor de resina está representado por **T-1**, este tanque se debe colocar elevado a una altura de aproximadamente 2,5 m, con la finalidad de dosificar la resina hacia el reactor gracias a la gravedad y así no emplear ningún dispositivo para impulsar la resina a través de las tuberías. También de la figura 4.26 se puede observar el reactor enchaquetado **T-2**, el cual sirve, entre otras cosas como contenedor de los reactivos durante el proceso de reacción; inicialmente contiene la amina alifática o cicloalifática a la cual es incorporada la resina epóxica gradualmente desde **T-1** con la finalidad de dar inicio a la reacción, en este tanque se tiene incorporado el agitador el cual es impulsado por **M-1** y cuya función se especificó anteriormente. En **T-2** se tiene un calentador por inmersión el cual se emplea para aumentar la temperatura de la amina hasta alcanzar la establecida, y también el sistema de enfriamiento para disminuir y mantener la temperatura de reacción durante el proceso. Por otro lado **T-3** representa el tanque contenedor de agua para el proceso de enfriamiento; el agua aquí almacenada es impulsada por las tuberías hacia la chaqueta gracias a **B-1** una bomba centrífuga. Finalmente se tienen las válvulas **V** y los indicadores de flujo y de

temperatura **FI** e **I-1** respectivamente. Cabe destacar que **T-3** tiene un sistema de recirculación para el agua de enfriamiento.

#### 4.3.4. Tamaño y número de lotes.

El tamaño de lote está limitado a la capacidad del reactor adquirido por la empresa y que se pretende usar en la puesta en marcha de este diseño. Ahora bien la forma y dimensiones del reactor se encuentran presentadas en la figura 4.25 y la capacidad del mismo en la tabla 4.19 tomando en cuenta las consideraciones y modelos especificados en la sección 3.

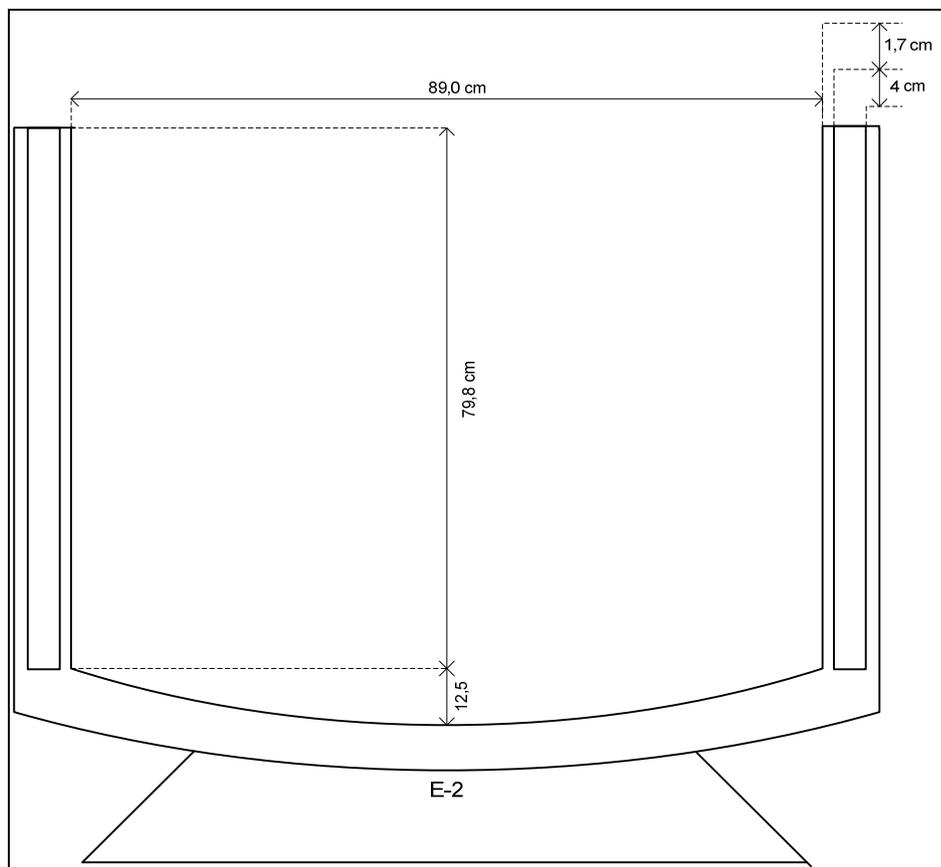


Figura 4.25. Dimensiones del reactor mezclador enchaquetado.

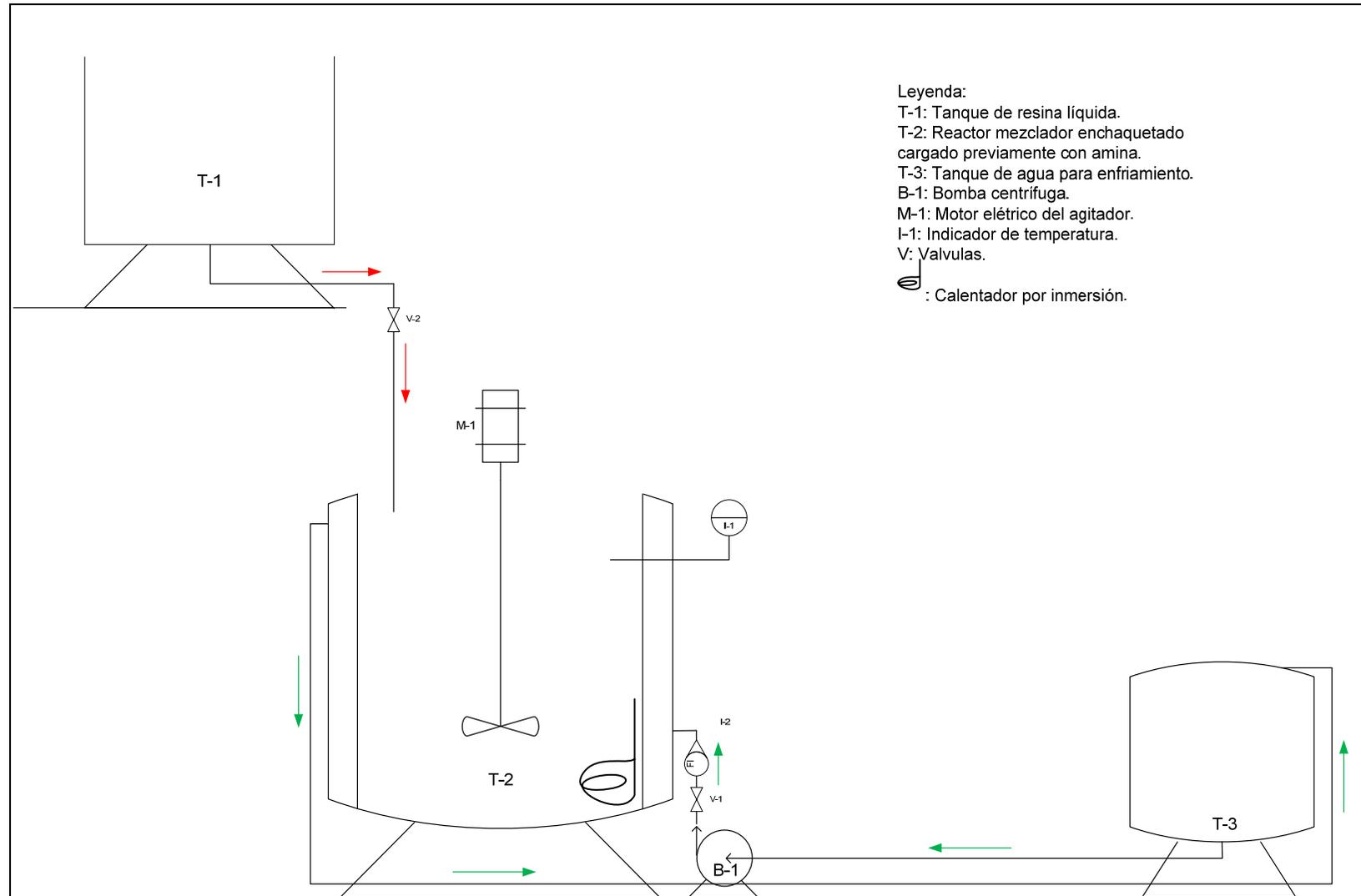


Figura 4.26. Diagrama de flujo del proceso para la fabricación de aductos de aminas.

**Tabla 4.19. Volumen del reactor mezclador enchaquetado.**

Volumen del reactor ( $V_r \pm 3$ ) L	Volumen útil del reactor ( $V_u \pm 2$ ) L	Volumen de la chaqueta ( $V \pm 1$ ) L
548	384	97

Ahora bien, según el volumen útil del reactor se tiene que el tamaño de los lotes para el caso del aducto de amina alifática es igual a 385 Kg y para el caso del aducto de amina cicloalifática es igual a 400 Kg, esto considerando la densidad de cada uno de los aductos. Por otro lado recordando que la capacidad instalada es igual a 25000 Kg en ambos casos, el número máximo de lotes es igual a 65 y 62 para el aducto de amina alifática y cicloalifática respectivamente.

#### 4.3.5. Tiempo de lote.

Para el cálculo del tiempo de lote se siguió el procedimiento establecido en la sección anterior, inicialmente se calculó el tiempo de calentamiento de la amina lo cual se realizó con la amina alifática por ser el calentamiento más crítico del proceso de fabricación, el cual va desde una temperatura igual a 25 °C hasta una temperatura de 35 °C, esto con la finalidad de obtener la máxima potencia que se necesitaba para el calentamiento ofrecida por el calentador por inmersión, lo cual representa un dato importante de su diseño. Ahora bien para calcular este valor se tomó en cuenta el coeficiente global de transferencia de calor, el cual se obtuvo gráficamente gracias a los datos de calentamiento de la amina alifática, estos datos se muestran a en la tabla 4.20 y su comportamiento gráfico en la figura 4.27; el coeficiente se obtiene debido a la linealización de esta curva como se muestra en la figura 4.28. Cabe destacar que experimentalmente la fuente de calentamiento fue una resistencia eléctrica externa. Los resultados obtenidos con respecto al coeficiente global de transferencia de calor y al tiempo de calentamiento se pueden observar en la tabla 4.21.

De igual manera se realizó un procedimiento para el cálculo del tiempo de enfriamiento con el sistema enchaquetado durante la reacción, calculando un coeficiente global de

transferencia de calor combinado en cada una de las etapas de enfriamiento a las condiciones de operación de los tratamientos seleccionados en cada una de las réplicas del mismo. Los resultados se muestran en las tablas 4.22 y 4.23.

**Tabla 4.20. Calentamiento con respecto al tiempo de la amina alifática.**

Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s	Temperatura de la amina ( $T_a \pm 0,5$ ) °C	$\ln(T_1 - T_{a0} / T_1 - T_a)$
0	25,0	0
5,00	26,0	0,021053409
8,00	27,0	0,042559614
13,00	28,0	0,064538521
20,00	29,0	0,087011377
25,00	30,0	0,110000895
32,00	31,0	0,133531393
39,00	32,0	0,157628944
45,00	33,0	0,182321557
53,00	34,0	0,207639365
55,00	35,0	0,233614851

Temperatura de la resistencia externa ( $T_1 \pm 0,5$ ) °C: 73,0

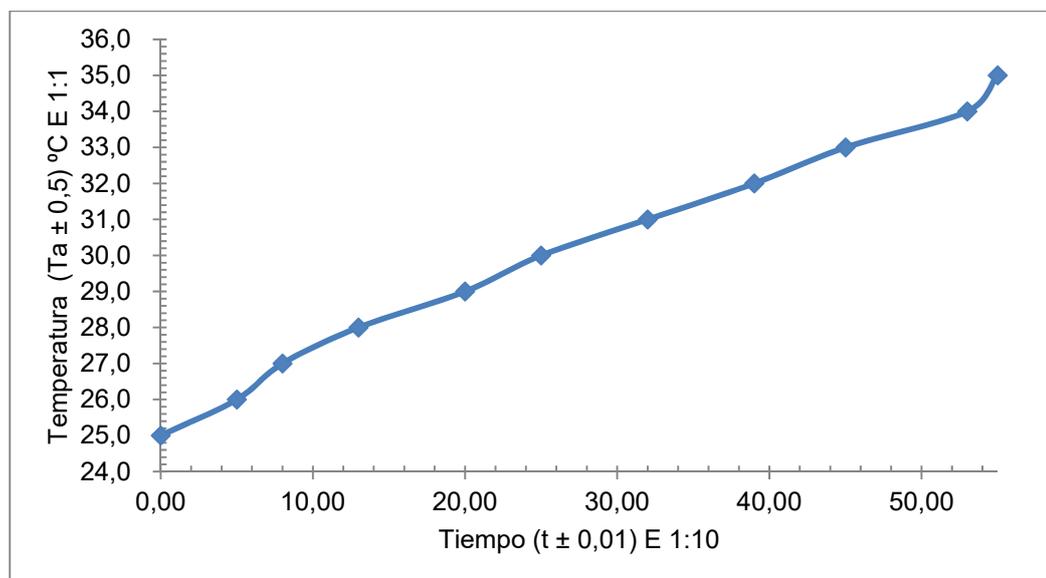


Figura 4.27. Curva de calentamiento de la amina alifática.

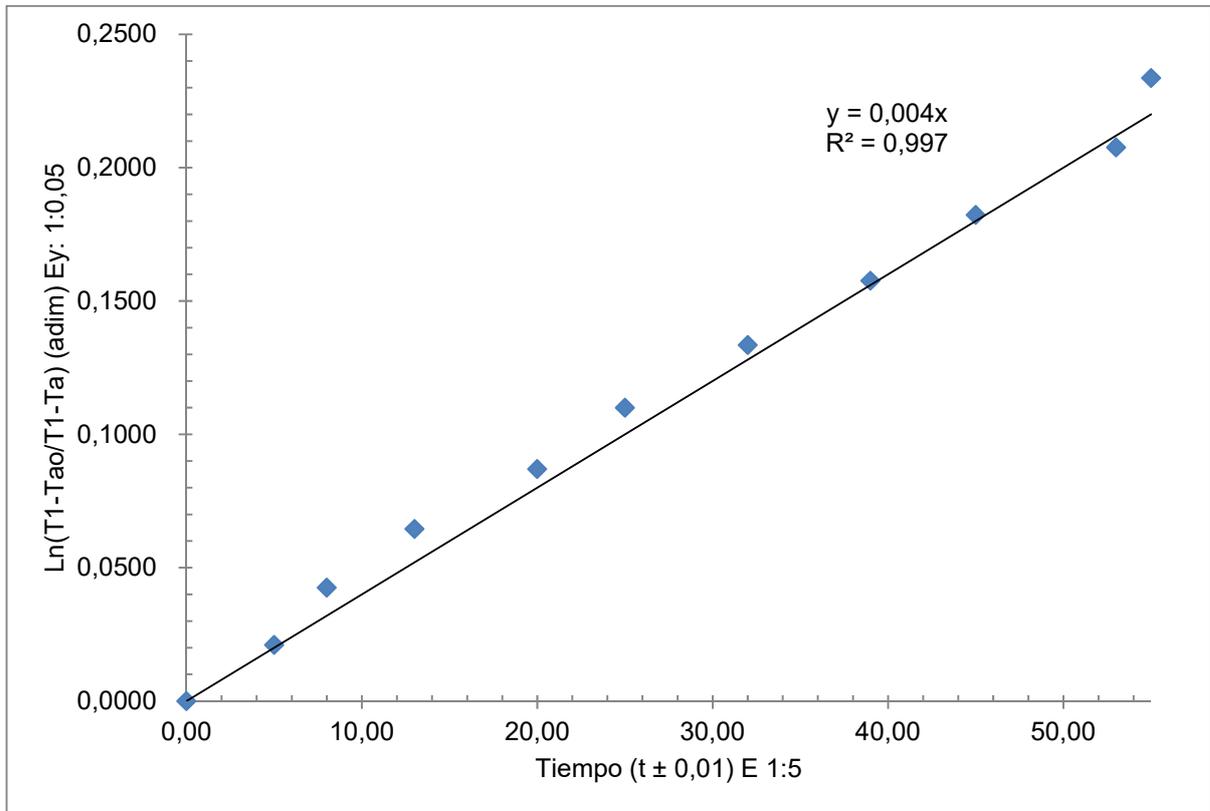


Figura 4.28. Linealización de la curva de calentamiento de la amina alifática.

**Tabla 4.21. Tiempo de calentamiento de la amina alifática y coeficiente global de transferencia de calor**

Tiempo de calentamiento de la amina ( $t_{ca}$ ) h	Coficiente global de transferencia de calor ( $U_G$ ) (kW/m <sup>2</sup> .K)
2,5	0,0390

Cada uno de los enfriamientos presentados en las tablas 4.22 y 4.23 representan el número de veces que por réplica, fue empleado el sistema de enfriamiento durante la reacción, para controlar la temperatura.

**Tabla 4.22. Coeficiente global de transferencia de calor combinado para el aducto de amina alifática durante el proceso de enfriamiento.**

Coeficiente global de transferencia de calor combinado para el tratamiento número ocho					
Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3	
Enfriamiento	$U_E$ (kW/m <sup>2</sup> .K)	Enfriamiento	$U_E$ (kW/m <sup>2</sup> .K)	Enfriamiento	$U_E$ (kW/m <sup>2</sup> .K)
1	0,0288	1	0,0292	1	0,0299
2	0,0605	2	0,0219	2	0,0299
3	0,0605	3	0,0292	3	0,0299
4	0,0230	4	0,0146	4	0,0605
5	0,0605	5	0,0292	5	0,0605
6	0,0149	6	0,0292	6	0,0299
7	0,0836	7	0,0292	7	0,0299
8	0,2193	8	0,0219	8	0,0299
		9	0,0590		
		10	0,0292		
		11	0,0292		
		12	0,0292		

Ahora bien se obtuvo un coeficiente global de transferencia de calor combinado para cada uno de los aductos y con éste el tiempo de enfriamiento en cada una de las etapas, estos resultados se muestran en la tabla 4.24. Cabe destacar que no se realizó de manera gráfica como en el caso anterior ya que el proceso de enfriamiento no es constante, sino que el sistema es utilizado cuando el proceso lo amerite de manera manual, es recomendable en estudios posteriores que se instale un sistema de control automatizado.

**Tabla 4.23. Coeficiente global de transferencia de calor combinado para el aducto de amina cicloalifática durante el proceso de enfriamiento.**

Coeficiente global de transferencia de calor combinado para el tratamiento número siete					
Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3	
Enfriamiento	$U_E$ (kW/m <sup>2</sup> .K)	Enfriamiento	$U_E$ (kW/m <sup>2</sup> .K)	Enfriamiento	$U_E$ (kW/m <sup>2</sup> .K)
1	0,0459	1	0,0302	1	0,0153
2	0,0153	2	0,0318	2	0,0310
3		3		3	0,0155

El tiempo de enfriamiento se obtuvo considerando el tamaño máximo de lote y las capacidades caloríficas de cada uno de los compuestos involucrados en el aducto, esto se muestra más detalladamente en el apéndice B.

Es importante resaltar que estos resultados son netamente experimentales, es recomendable realizar una observación detallada del proceso llevado a cabo escala piloto para observar su comportamiento durante la reacción y así determinar el número de períodos de enfriamientos requeridos por dicho proceso para totalizar el tiempo de enfriamiento del mismo. Este análisis se encuentra fuera del alcance de esta investigación. Por otro lado los períodos de enfriamiento y sus tiempos de duración se encuentran solapados en el tiempo de reacción el cual se estima según los estudios experimentales realizados igual a tres horas para ambos aductos. Este valor puede variar en la escala piloto esperando una disminución debido a que la reacción entre grandes cantidades de masa ocurre con mayor rapidez lo cual se observa en los lotes de producción de la empresa Immerc C.A.

**Tabla 4.24. Coeficiente global de transferencia de calor combinado promedio y tiempo de enfriamiento para el aducto de amina alifática y cicloalifática**

Aducto	Coeficiente global promedio $U_p$ (kW/m <sup>2</sup> .K)	Tiempo de enfriamiento (h)
De amina alifática	0,0429	0,16
De amina cicloalifática	0,0264	0,27

La última etapa de la fabricación de los aductos es el enfriamiento final, una vez terminada la reacción. En esta etapa no se emplea ningún dispositivo de enfriamiento y se debe esperar que la mezcla alcance la temperatura ambiente mientras se deja en reposo para su posterior descarga, experimentalmente se obtuvo que dicha etapa tiene una duración igual a tres horas. Finalmente el tiempo total del lote viene dado por la suma de los tiempos de todas las etapas, el resultado es igual a ocho horas y media el cual se aproxima a nueve horas por decisión de los autores y para poder contemplar cualquier variación en dichos tiempos.

#### **4.3.6. Balances de masa.**

Según los balances de masa se determinaron las cantidades requeridas de materia prima para los dos esquemas de producción estudiados. Los resultados no pueden ser mostrados debido a lo establecido en la sección 3. Sin embargo estos resultados fueron empleados en los cálculos posteriores.

#### **4.3.7. Balances de energía.**

Las potencias necesarias para el calentador por inmersión y para la bomba se determinaron aplicando balances de energía de manera integral, para el caso del calentador se tomó la etapa de calentamiento especificada en la sección anterior, recordando que el calentador por inmersión se emplea para calentar la amina en la etapa inicial antes de la reacción; por otro lado la bomba se emplea para impulsar el agua de enfriamiento a través de la chaqueta.

Según Kern (1981), el material de los calentadores por inmersión, encargados de proveer energía térmica a fluidos orgánicos, deben ser de acero y no deben superar los 950 °F. La temperatura máxima a la cual se quiere calentar la amina es 35 °C (95 °F) por lo tanto se verifica la aplicación de este método ya que no sobrepasa la temperatura máxima del calentador. Cabe destacar que esta temperatura también es aceptable para el material del reactor es cual es acero inoxidable. Esto es a nivel del diseño propuesto, sin embargo experimentalmente se utilizó una resistencia eléctrica externa hecha a partir de una aleación de hierro y níquel, con la cual se obtuvo la potencia necesaria para calentar la amina, éste calentamiento depende básicamente de la temperatura inicial de la materia prima. La temperatura de superficie máxima en la resistencia descrita era igual a 73 °C y el tiempo de calentamiento era menor al determinado para el calentador por inmersión. Con la implementación de un calentador por inmersión la temperatura máxima superficial será igual a la temperatura máxima de la amina a la cual se quiere llegar.

Todas estas temperaturas son adecuadas para las restricciones de los calentadores por inmersión sin embargo, es difícil mantener una temperatura constante a lo largo de toda la masa que se desea calentar, una solución sería agitar durante la etapa de calentamiento ya que esto garantiza una temperatura constante a lo largo de toda la mezcla.

Por otro lado la potencia de la bomba se determinó realizando un balance de energía a lo largo de todo el sistema, partiendo de la flor de líquido del tanque de agua (**E-3**) (figura 4.25) hasta la descarga en el mismo tanque, con esto se consideraron todos los accesorios y las pérdidas de energías producidas por los mismos. Los resultados obtenidos con respecto a la potencia del calentador por inmersión y a la potencia de la bomba se muestran en la tabla 4.25.

**Tabla 4.25. Potencias requeridas para el calentador por inmersión y la bomba centrífuga.**

Equipo	Potencia requerida	Potencia según especificaciones del fabricante
Calentador por inmersión (kW)	1,0774	1
Bomba (hP)	0,0031	0,5

Debido a que la bomba necesita una potencia menor a la que se establece según especificaciones del fabricante, esta debe operar estrangulada con una válvula y así proporcionar el flujo de agua requerido.

**4.3.8. Dimensionamiento de los equipos.**

Tomando en cuenta primeramente el agitador, los datos de diseño de éste se obtienen empleando las ecuaciones descritas en la sección 3 y considerando las dimensiones del agitador empleado experimentalmente, el cual adquiriría una velocidad igual a 632 rpm y tenía un diámetro igual a 5 cm. Los resultados asociados a las dimensiones relacionadas con el sistema de agitación se pueden observar en la tabla 4.26. También se obtuvo la distancia mínima del agitador al fondo del reactor.

**Tabla 4.26. Datos de diseño del sistema de agitación del reactor.**

Diámetro del agitador (cm)	Velocidad del agitador (rpm)	Distancia desde el agitador hasta el fondo del tanque (cm)
25	43,23	23,07

El diámetro del agitador se seleccionó tomando en cuenta los valores de los equipos destinados por la empresa para la fabricación de sus productos, la velocidad de agitación es baja debido a la alta viscosidad del aducto y el diámetro es pequeño comparado con el diámetro del tanque. Cabe destacar que la agitación de la mezcla reactante no afecta las propiedades físicas de los aductos como se estudio

anteriormente, simplemente garantiza el medio de contacto para la reacción por lo que las dimensiones del agitador no ejercen influencias considerables sobre el proceso. Ahora bien los agitadores en planta tienen una velocidad constante donde el agitador con menor velocidad alcanza los 1500 rpm, por lo que se encuentra sobredimensionado para las necesidades de este proceso sin embargo, desde el punto de vista de la función que ejerce el sistema de agitación es apto para el proceso. Cabe destacar que estos agitadores consumen una potencia constante la cual para este caso es igual a 187 kW.

Posteriormente se determinaron las dimensiones de los tanques de almacenamiento de agua y de resina partiendo del volumen de agua necesario para el proceso de enfriamiento y del volumen de resina necesario para cada lote respectivamente (tabla 4.27). El volumen de resina se obtiene conociendo la masa de resina en cada lote a partir de los balances de masa pertinentes.

**Tabla 4.27. Dimensiones de los tanques de agua y resina.**

Tanque	Diámetro, d (cm)	Altura, h (cm)
Resina (E-2)	91	91
Agua de enfriamiento (E-3)	70	70

En el caso del tanque de agua y de resina es recomendable que el material de construcción sea acero inoxidable, ya que no sufre cambios bruscos debido a la corrosión; por otro lado la temperatura no es un parámetro de interés ya que tanto el agua como la resina se encuentran a temperatura ambiente.

Finalmente se tiene que el espacio físico disponible para los equipos en la planta se encuentra representado en la figura 4.28.

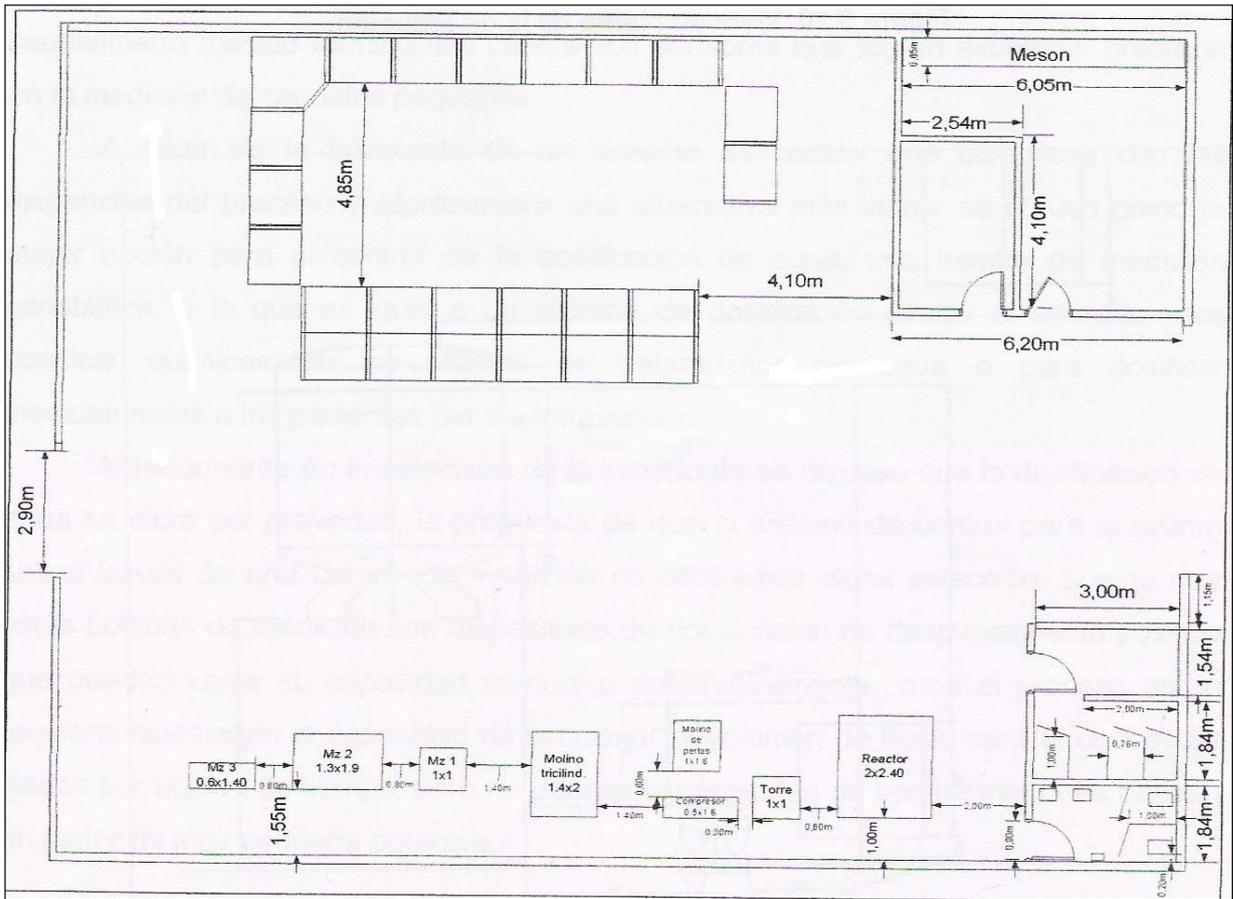


Figura 4.29. Layout del área de producción de Immerc C.A.

#### 4.4. Factibilidad de la investigación.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la determinación de los flujos monetarios para cada uno de los años asociados al proyecto. Los cálculos correspondientes a dichos resultados se presentan en el apéndice B.

En la tabla 4.28 se muestran los valores considerados para el cálculo de la inversión inicial la cual se detalla en la sección 3 de esta investigación.

**Tabla 4.28. Resultados relacionados con la determinación de la inversión inicial del proyecto.**

Elementos	Costo (\$)
Costo de los equipos (CE)	33911,48
Instalación de los equipos (IE)	10173,44
Sistema de tuberías y accesorios (ST)	155,83
Imprevistos (I)	2212,037688
Capital fijo (CF)	46452,79
Capital de trabajo (CT)	8197,551
Inversión inicial (II)	54650,34

El precio de venta para cada uno de los aductos fue establecido por la empresa una vez realizado el estudio con respecto a los precios de la competencia, estos se muestran en la tabla 4.29.

**Tabla 4.29. Costo de venta de los productos.**

Productos	Costo (\$/kg)
Imerkote®	33,27
Imerlux®	36,13

La producción e ingresos brutos de cada año para cada uno de los aductos fabricados, se determinaron a partir del precio de venta del producto y la producción anual de los mismos, éstos se muestran en la tabla 4.30.

**Tabla 4.30. Producción e ingresos brutos para cada uno de los aductos en el periodo de vida del proyecto.**

<b>Año</b>	<b>Producción de aducto de amina alifática (kg)</b>	<b>Producción de aducto de amina cicloalifática (kg)</b>	<b>Ingresos brutos de aducto de amina alifática (kg)</b>	<b>Ingresos brutos de aducto de amina cicloalifática (kg)</b>
<b>2008</b>	-	-	-	-
<b>2009</b>	14403,84	11833,80	479215,76	427555,19
<b>2010</b>	15844,22	13017,18	527137,33	470310,71
<b>2011</b>	17428,65	14318,90	579851,07	517341,78
<b>2012</b>	19171,51	15750,79	637836,17	569075,96
<b>2013</b>	21088,66	17325,87	701619,79	625983,56
<b>2014</b>	23197,53	19058,45	771781,77	688581,92
<b>2015</b>	25000,00	20964,30	831750,00	757440,11
<b>2016</b>	25000,00	23060,73	831750,00	833184,12
<b>2017</b>	25000,00	25000,00	831750,00	903250,00
<b>2018</b>	25000,00	25000,00	831750,00	903250,00

Los costos operativos durante los años de vida del proyecto para cada uno de los aductos se muestran en las tablas 4.31 para el aducto de amina alifática y 4.32 para el aducto de amina cicloalifática. Recordando que los costos operativos representan desembolsos de dinero que debe tener la empresa para mantener el proceso funcionando.

**Tabla 4.31. Resultados relacionados a la determinación de los costos operativos para el aducto de amina alifática en el periodo de vida del proyecto.**

Año	Costos por (\$)									Costos operativos (\$)
	Materia prima	Mano de obra	Mantenimiento	Materiales de consumo	Servicios	Seguros	Ventas	Administrativos	Investigación y desarrollo	
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	166052,21	1261,91	3019,43	452,91	428,56	464,53	38337,26	11980,39	7188,24	228756,89
2010	182657,44	1388,10	3019,43	452,91	471,42	464,53	42170,99	13178,43	7907,06	251238,90
2011	200923,18	1526,91	3019,43	452,91	518,56	464,53	46388,09	14496,28	8697,77	275969,10
2012	221015,50	1679,60	3019,43	452,91	570,41	464,53	51026,89	15945,90	9567,54	303172,32
2013	243117,05	1847,57	3019,43	452,91	627,46	464,53	56129,58	17540,49	10524,30	333095,87
2014	267428,76	2032,32	3019,43	452,91	690,20	464,53	61742,54	19294,54	11576,73	366011,77
2015	288208,25	2190,24	3019,43	452,91	743,83	464,53	66540,00	20793,75	12476,25	394145,35
2016	288208,25	2190,24	3019,43	452,91	743,83	464,53	66540,00	20793,75	12476,25	394145,35
2017	288208,25	2190,24	3019,43	452,91	743,83	464,53	66540,00	20793,75	12476,25	394145,35
2018	288208,25	2190,24	3019,43	452,91	743,83	464,53	66540,00	20793,75	12476,25	394145,35

**Tabla 4.32. Resultados relacionados a la determinación de los costos operativos para el aducto de amina cicloalifática en el periodo de vida del proyecto.**

Año	Costos por (\$)									Costos operativos (\$)
	Materia prima	Mano de obra	Mantenimiento	Materiales de consumo	Servicios	Seguros	Ventas	Administrativos	Investigación y desarrollo	
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	139940,37	997,75	3019,43	452,91	338,85	464,53	34204,42	10688,88	6413,33	196520,47
2010	153934,41	1097,52	3019,43	452,91	372,73	464,53	37624,86	11757,77	7054,66	215778,82
2011	169327,85	1207,28	3019,43	452,91	410,01	464,53	41387,34	12933,54	7760,13	236963,02
2012	186260,63	1328,00	3019,43	452,91	451,01	464,53	45526,08	14226,90	8536,14	260265,63
2013	204886,70	1460,81	3019,43	452,91	496,11	464,53	50078,68	15649,59	9389,75	285898,51
2014	225375,37	1606,89	3019,43	452,91	545,72	464,53	55086,55	17214,55	10328,73	314094,67
2015	247912,90	1767,57	3019,43	452,91	600,29	464,53	60595,21	18936,00	11361,60	345110,45
2016	272704,19	1944,33	3019,43	452,91	660,32	464,53	66654,73	20829,60	12497,76	379227,81
2017	295637,01	2107,84	3019,43	452,91	715,85	464,53	72260,00	22581,25	13548,75	410787,57
2018	295637,01	2107,84	3019,43	452,91	715,85	464,53	72260,00	22581,25	13548,75	410787,57

En la tabla 4.33 se presentan la depreciación y el valor en libro de los activos fijos tangibles en el periodo de vida del proyecto. Estos valores son importantes para el cálculo del impuesto sobre la renta lo que se presenta en la tabla 4.35 y 4.36.

**Tabla 4.33. Depreciación acumulada y valor en libro de los activos fijos tangibles presentes en el proceso de fabricación de los aductos en el periodo de vida del proyecto**

Activos fijos tangibles	Capital fijo (\$)	Vida útil (\$)	Valor residual (\$)	Depreciación (\$)	Valor en libro (\$)
Reac.-Mezc. (Con motor)	23251,81	12	2325,181	1743,88575	5812,9525
Calentador por inmersión	152,93	10	15,293	13,7637	15,293
Tanque de agua	2325,58	10	232,558	209,3022	232,558
Tanque de resina	8100	10	810	729	810
Bomba centrífuga	81,16	20	8,116	3,6522	44,638
Tuberías y accesorios	155,83	10	15,59	14,02	15,58
<b>Total</b>	<b>34067,31</b>	<b>-</b>	<b>3406,73</b>	<b>2713,63</b>	<b>6931,02</b>

**Tabla 4.34. Amortización de los activos fijos intangibles de los aductos en el periodo de vida del proyecto.**

Activos fijos intangibles (\$)	Tiempo de vida del proyecto (año)	Amortización de los activos fijos intangibles (\$)
12380,55	10	1238,55

Los flujos monetarios correspondientes a la fabricación de cada uno de los aductos durante los años de vida del proyecto se muestran en las tablas 4.37 para el aducto de amina alifática, y la tabla 4.38 para el aducto de amina cicloalifática.

**Tabla 4.35. Impuesto sobre la renta para el aducto de amina alifática en el periodo de vida del proyecto.**

Año	Ingreso neto grabable (\$)	Ingreso neto grabable (UT)	Impuesto sobre la renta (UT)	Impuesto sobre la renta (\$)
2008	-	-	-	-
2009	246506,69	11521,51	3417,31	73114,60
2010	271946,26	12710,53	3821,58	81764,05
2011	299929,79	14018,46	4266,28	91278,45
2012	330711,67	15457,18	4755,44	101744,29
2013	364571,75	17039,77	5293,52	113256,72
2014	401817,83	18780,62	5885,41	125920,39
2015	433652,47	20268,54	6391,30	136744,17
2016	433652,47	20268,54	6391,30	136744,17
2017	433652,47	20268,54	6391,30	136744,17
2018	433652,47	20268,54	6391,30	136744,17

**Tabla 4.36. Impuesto sobre la renta para el aducto de amina cicloalifática en el periodo de vida del proyecto.**

<b>Año</b>	<b>Ingreso neto grabable (\$)</b>	<b>Ingreso neto grabable (UT)</b>	<b>Impuesto sobre la renta (UT)</b>	<b>Impuesto sobre la renta (\$)</b>
<b>2008</b>	-	-	-	-
<b>2009</b>	229796,18	10740,47	3151,76	67433,03
<b>2010</b>	253293,34	11838,71	3525,16	75422,06
<b>2011</b>	279140,22	13046,77	3935,90	84210,00
<b>2012</b>	307571,78	14375,64	4387,72	93876,73
<b>2013</b>	338846,50	15837,39	4884,71	104510,14
<b>2014</b>	373248,69	17445,32	5431,41	116206,88
<b>2015</b>	411091,11	19214,04	6032,77	129073,30
<b>2016</b>	452717,76	21159,63	6694,28	143226,36
<b>2017</b>	491223,88	22959,38	7306,19	156318,45
<b>2018</b>	491223,88	22959,38	7306,19	156318,45

**Tabla 4.37. Flujos monetarios totales para el aducto de amina alifática en el periodo de vida del proyecto.**

<b>Año</b>	<b>Capital fijo (\$)</b>	<b>Capital de trabajo (\$)</b>	<b>Costos operativos (\$)</b>	<b>Ingresos brutos (\$)</b>	<b>Impuesto sobre la renta (\$)</b>	<b>Valor en libro (\$)</b>	<b>Flujo monetario (\$)</b>
<b>2008</b>	-46452,79	-8197,551					-54650,34
<b>2009</b>			-228756,89	479215,76	-73114,60	6931,02	177344,26
<b>2010</b>			-251238,90	527137,33	-81764,05	6931,02	194134,38
<b>2011</b>			-275969,10	579851,07	-91278,45	6931,02	212603,51
<b>2012</b>			-303172,32	637836,17	-101744,29	6931,02	232919,56
<b>2013</b>			-333095,87	701619,79	-113256,72	6931,02	255267,20
<b>2014</b>			-366011,77	771781,77	-125920,39	6931,02	279849,62
<b>2015</b>			-394145,35	831750,00	-136744,17	6931,02	315989,06
<b>2016</b>			-394145,35	831750,00	-136744,17	6931,02	315989,06
<b>2017</b>			-394145,35	831750,00	-136744,17	6931,02	315989,06
<b>2018</b>		8197,551	-394145,35	831750,00	-136744,17	6931,02	315989,06

**Tabla 4.38. Flujos monetarios totales para el aducto de amina cicloalifática en el periodo de vida del proyecto.**

<b>Año</b>	<b>Capital fijo (\$)</b>	<b>Capital de trabajo (\$)</b>	<b>Costos operativos (\$)</b>	<b>Ingresos brutos (\$)</b>	<b>Impuesto sobre la renta (\$)</b>	<b>Valor en libro (\$)</b>	<b>Flujo monetario (\$)</b>
<b>2008</b>	-46452,79	-8197,551					-54650,34
<b>2009</b>			-196520,47	427555,19	-67433,03	6931,02	163601,70
<b>2010</b>			-215778,82	470310,71	-75422,06	6931,02	179109,83
<b>2011</b>			-236963,02	517341,78	-84210,00	6931,02	196168,77
<b>2012</b>			-260265,63	569075,96	-93876,73	6931,02	214933,60
<b>2013</b>			-285898,51	625983,56	-104510,14	6931,02	235574,91
<b>2014</b>			-314094,67	688581,92	-116206,88	6931,02	258280,36
<b>2015</b>			-345110,45	757440,11	-129073,30	6931,02	283256,35
<b>2016</b>			-379227,81	833184,12	-143226,36	6931,02	310729,94
<b>2017</b>			-410787,57	903250,00	-156318,45	6931,02	351272,56
<b>2018</b>		8197,551	-410787,57	903250,00	-156318,45	6931,02	351272,56

**Tabla 4.39. Índices de rentabilidad con respecto al proyecto de inversión del aducto de amina alifática.**

Valor actual (\$)	Equivalente anual (\$)	Tasa interna de retorno (%)
1268943,34	247278,989	333,99

**Tabla 4.40. Índices de rentabilidad con respecto al proyecto de inversión del aducto de amina cicloalifática.**

Valor actual (\$)	Equivalente anual (\$)	Tasa interna de retorno (%)
1207793,63	212378,431	308,86

A partir de los valores de índices de rentabilidad obtenidos se puede señalar que los proyectos de inversión propuestos son rentables, ya que el valor actual y el equivalente anual para cada uno de los aductos resultaron mayores a cero. De igual manera se concluye lo mismo sobre la rentabilidad de los proyectos propuestos a partir de la tasa interna de retorno, esto es debido a que las obtenidas para cada uno de los aductos resultaron mayores a la tasa mínima de retorno la cual correspondía a 13%. Dicho valor resulta ser elevado debido a que la inversión inicial es baja con respecto a los ingresos brutos que proporciona el proceso de fabricación, además los costos operativos son relativamente bajos ya que el proceso entre otras cosas no amerita la presencia de un personal altamente capacitado. De esta manera obtuvieron elevadas ganancias para la empresa y por ende un alto nivel de rentabilidad.

Como complemento al estudio económico, en las figuras 4.30 y 4.31 se muestra los resultados del análisis de sensibilidad del proyecto de inversión con respecto al precio de venta de los productos fabricados, esto es porque dicho precio se considera susceptible a cambio durante el periodo de vida del proyecto. En las respectivas figuras se observa el incremento de la rentabilidad del proyecto con el aumento del precio de venta de productos. De esto se infiere que existe un rango de precios competitivos

delimitado por 12,4 \$ y 33,27\$, precio de venta actual, que conllevan a un proyecto factible económicamente correspondiente al aducto de amina alifática. Lo mismo sucede para el aducto de amina cicloalifática, donde se tiene un rango de precios competitivos delimitado por 13,8 \$ y 36,13\$, precio de venta actual. Dicho resultado muestra que existe la posibilidad de abaratar los precios de los aductos generando todavía ganancias significativas a la organización.

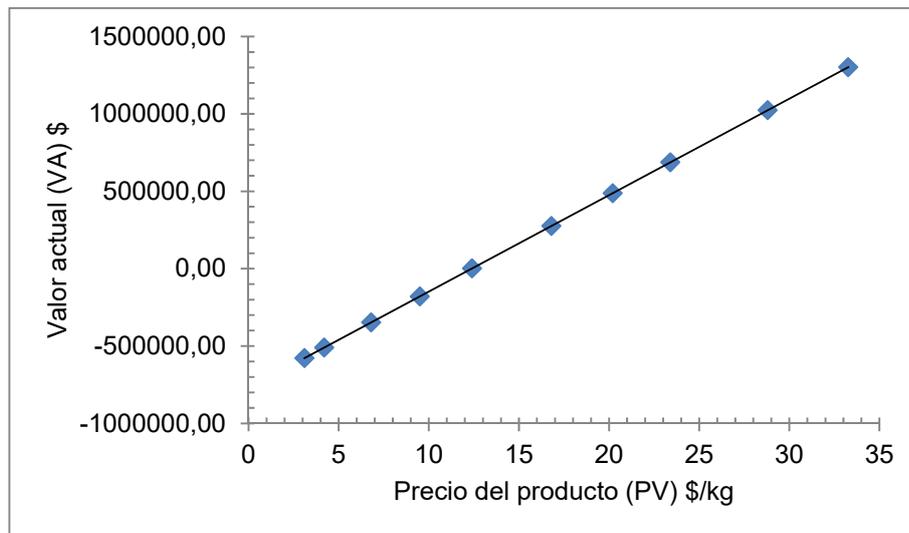


Figura 4.30. Representación gráfica de la rentabilidad de la propuesta con respecto al precio de venta del producto correspondiente al aducto de amina alifática.

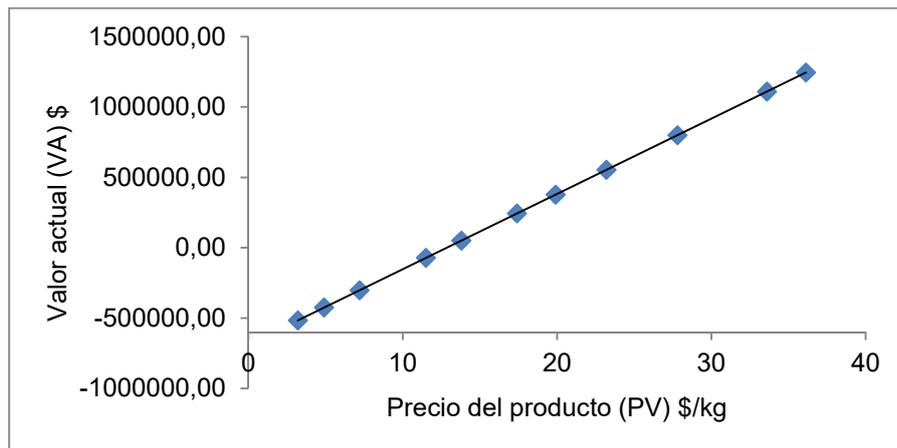


Figura 4.31. Representación gráfica de la rentabilidad de la propuesta con respecto al precio de venta del producto correspondiente al aducto de amina cicloalifática.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

En cuanto a la identificación del proceso de fabricación de los aductos de amina:

1. Las características observadas del proceso actual fueron: sistema abierto, dosificación por carga y un tiempo de fabricación de aproximadamente tres días.

Con respecto a la caracterización de los aductos obtenidos por el método actual:

2. Las propiedades físicas de los aductos que variaron durante el desarrollo de la investigación fueron: densidad, porcentaje de sólidos no volátiles y viscosidad.

En cuanto a la selección de las variables que influyen directamente en la fabricación de los aductos de amina:

3. Las variables más influyentes fueron: temperatura del medio ambiente, ausencia de un sistema de dosificación y ausencia de un sistema de control para la temperatura de reacción.

Con relación al estudio de las variables seleccionadas:

4. Las variables que afectaron las características físicas y la funcionalidad de los aductos de aminas alifáticas fueron: el sistema de enfriamiento y la interacción entre el sistema de enfriamiento y la velocidad de dosificación.
5. Las variables que afectan las características físicas y la funcionalidad de los aductos de aminas cicloalifáticas son: sistema de enfriamiento, temperatura inicial del reactor y la interacción entre el sistema de enfriamiento, temperatura inicial del reactor y la velocidad de dosificación

6. La regresión lineal que representa el modelo de la viscosidad con respecto a las variables influyentes para la fabricación del aducto de amina alifática fue:

$$Y = 7995,367719 + 368,4793853 \times S + 795,2475228 \times SV$$

7. La regresión lineal que representa el modelo de la viscosidad con respecto a las variables influyentes para la fabricación del aducto de amina cicloalifática fue:

$$Y = 5708,955866 + 1614,681083 \times S + 714,1980588 \times T - 796,0487459 \times STV$$

8. Las condiciones de operación seleccionadas para la fabricación de aductos de amina alifática fueron: presencia de un sistema de control de temperatura en reacción, dosificación gradual de la resina con velocidad alta, temperatura inicial del reactor de aproximadamente 35 °C.

9. Las condiciones de operación seleccionadas para la fabricación de aductos de amina cicloalifática fueron: presencia de un sistema de control de temperatura en reacción, dosificación gradual de la resina con velocidad baja, temperatura inicial del reactor de aproximadamente 30 °C

10. La viscosidad de los aductos de amina alifática a las condiciones seleccionadas fue igual a  $(6033 \pm 1)$  cp con aguja número 3, 10 rpm, a una temperatura igual a  $(29,2 \pm 0,1)$  °C

11. La viscosidad de los aductos de amina cicloalifática a las condiciones seleccionadas fue igual a  $(2638 \pm 1)$  cp con aguja número 3, 20 rpm, a una temperatura igual a  $(28,8 \pm 0,1)$  °C

12. La temperatura de reacción para la fabricación de los aductos de amina alifática o cicloalifáticas debe mantenerse entre 60° y 70 °C.

En cuanto al diseño del proceso de fabricación mejorado:

13. La capacidad instalada para la fabricación de aductos de amina alifática o cicloalifática es de 25000 kg/año.
  
14. En el diseño del sistema se establecieron las siguientes tecnologías para el proceso de fabricación: reactor mezclador enchaquetado, calentador por inmersión y sistema de dosificación por gravedad.

Con respecto a la estimación de los costos y beneficios:

15. El valor actual obtenido para la implementación del proyecto de inversión fue igual a 1268943,34 \$ correspondiente al aducto de amina alifática y de 1207793,63 \$ en el caso del aducto de amina cicloalifática.
  
16. El equivalente anual obtenido fue de 247278,989 \$ para el proyecto correspondiente al aducto de amina alifática e igual a 212378,431 \$ para el aducto de amina cicloalifática.
  
17. La tasa interna retorno obtenida en el proyecto correspondiente al aducto de amina alifática fue de 333,99 % y de 308,86 % para el aducto de amina cicloalifática.

## **RECOMENDACIONES**

1. Incorporar un controlador de temperatura para el sistema de enfriamiento de manera de automatizar el proceso.
2. Incorporar un controlador de flujo para el sistema de dosificación de la manera de automatizar la adición de la resina.
3. Realizar una evaluación exacta de la producción anual que se lleve a cabo, de manera de tener una visualización de ésta en años posteriores.
4. Agitar desde el inicio del calentamiento de la amina hasta finalizar la reacción del aducto.
5. Emplear el reactor-mezclador enchaquetado en otros procesos donde se amerite un control de temperatura para mejores resultados en los mismos.
6. Evaluar la posibilidad de comercializar los aductos como materia prima para otras empresas a nivel nacional e internacional.
7. Realizar una revisión rigurosa de la materia prima obtenida a partir de los proveedores de manera de evitar en su mayoría que ésta presente influencia en el proceso de fabricación.

---

**REFERENCIAS**

1. Air Products (2000). Air Products and chemical. [Documento en línea]. Disponible en la world wide web: <http://www.airproducts.com/index.asp>. Consultado el día 17 de abril del 2008.
2. Alagar, M., Denchev, Z. & Kumar, A. (2005). Development and characterization of silicone/phosphorus modified epoxy materials and their application as anticorrosion and antifouling coatings. [Documento en línea]. Department of Physical Chemistry, University of Madras, Chennai, India. Department of Chemical Engineering, Anna University, Chennai, India. Department of Polymer Engineering, University of Minho, Portugal. Disponible en la World wide web: [http://www.sciencedirect.com/science?ob=MIimg&\\_](http://www.sciencedirect.com/science?ob=MIimg&_). Consultado el día 29 de Noviembre de 2007.
3. Allstudies (2008). Resinas epóxicas. [Documento en línea]. Disponible en la world wide web: <http://www.allstudies.com/resinas-epoxi.html>. Consultado el día 23 de mayo del 2008.
4. Caléis, B., De Cock, C., Kincaid, D., Pascale, A., Van Poppel, K. et. al. (2002). Low viscosity curing agents compositions in epoxy resin systems for low temperature cure applications. [Documento en línea]. Resolution Research Nederland B.V. Belgica. Disponible en la world wide web: <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=2003%2F020789&IA=WO2003%2F020789&DISPLAY=STATUS>. Consultado el día 29 de Noviembre de 2007.
5. Dangayach, K., Smith, C., & Weinmann D. J. (2001). Amine-Functional Curatives for low Temperature Cure Epoxy Coatings. Tech Paper, 3,2.

6. Diaz, G. & Montesinos, R. (2005). Mejoramiento del proceso de fabricación de una emulsión de resina epóxica para la elaboración de productos especiales en el área de la construcción y mantenimiento industrial. Trabajo de grado de pregrado no publicado, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.
7. Fudibeq (2008). Fundación Iberoamericana para la Gestión de la Calidad. [Documento en línea]. Disponible en la world wide web: <http://www.fundibeq.org/>. Consultado el día 12 de junio del 2008.
8. Giropak (1961). Giropak internacional C.A: Conexiones, válvulas, bombas y equipos. Giropak, 20,22.
9. Gómez, E. & Nuñez, F. (2004). Plantas industriales: Aspectos técnicos para el diseño. Valencia: Universidad de Carabobo.
10. Evente, S., Fischer, U. Hungerbühler, K. & Introvigne, M. (2007). Batch reactor optimization under liquid swelling safety constraint. [Documento en línea]. Institute for Chemical and Bioengineering. Switzerland. Disponible en la world wide web: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_\\_ob=MIimg&\\_imagekey=B6TFK](http://www.sciencedirect.com/science?__ob=MIimg&_imagekey=B6TFK). Consultado el día 29 de Noviembre de 2007.
11. Hsi-chuan, T & Souichi, M. (1997). Curing agent masterbatch for epoxy resin and their preparation. [Documento en línea]. W.R Grace and Co.-Conn. Hamamatsu-shi, Japón. Disponible en la world wide web: E:\Curing agent masterbatch for epoxy resin and their preparation - US Patent 5591814.mht. Consultado el día 29 de Noviembre de 2007.
12. Kern, D. (1981). Transferencia de calor. 1era. Ed. Peru: Mc Graw Hill.

13. Kravanja, Z. & Novak, Z. (2006). Identification of critical points for the design and synthesis of flexible processes . [Documento en línea]. University of Maribor, Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Smetanova, Slovenia. Disponible en la world wide web: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6TFT-4PCGRYP-1](http://www.sciencedirect.com/science?__ob=MImg&_imagekey=B6TFT-4PCGRYP-1). Consultado el día 29 de Noviembre de 2007.
14. Lee, H. & Neville, K. (1967). Handbook of epoxy resins. 1era. Ed. Mc Graw Hill.
15. Ludwig, E. (1967). Applied process design for chemical and petrochemical plants/Volumen 1. 2da. Ed. Texas: Gulf publishing Company.
16. McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P (2002). Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 6ta. Ed. Mexico: Mc Graw Hill.
17. Milby, R. (1973). Plastics. Estados Unidos: Mc Graw Hill
18. Montgomery, D & Runger, G. (1996). Probabilidad estadística aplicada a la ingeniería. 1era. Ed. Mexico: Mc Graw Hill.
19. Moretto, H. H., Pohmer, K., Schlak, O., Schneider, W., Stachulla, K. & Weber, R. (1995). Process for the production of liquid amine adducts of fluorine-containing amides. Patent Storm. 35,87.
20. Matta , F. & Rufo, M. (2008). A evolução dos agentes de cura para resinas epóxi. Revista Pisos Industriais. Brasil. [Documento en línea]. Disponible en la world wide web: <http://www.pisos Industriais.mht>. Consultado el día 17 de abril de 2008.
21. Perry, R., Green, D & Maloney, J. (2001). Manual del Ingeniero Químico/Volumen 1 y 2. 7ma. Ed. Mexico: Mc Graw Hill.

22. Pilsniak, M. & Trochimczuk, A. (2007). Synthesis and characterization of polymeric resins with aliphatic and aromatic amino ligands and their sorption behavior towards gold from ammonium hydroxide solutions. [Documento en línea]. Faculty of Chemistry, Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland. Disponible en la world wide web: <http://www.sciencedirect.com/science> Consultado el día 29 de Noviembre de 2007.
23. Silaex (2007). Aminas. [Documento en línea]. Disponible en la world wide web: <http://www.silaex.com.br>. Consultado el día 25 de mayo del 2008
24. Silva, J. (2003). Transporte de momento para ingenieros de procesos. Valencia: Universidad de Carabobo.
25. Wade, L. G. (2006). Química Orgánica. 5<sup>ta</sup> edición. España: Pearson Prentice Hall.

**APÉNDICE A**  
**TABLAS DE DATOS**

**Tabla A.1. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas según el proceso actual.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C	Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s
<b>Primera carga</b>	
21,0	0,00
23,0	604,30
25,0	1200,49
27,0	1800,82
29,0	2400,25
31,0	3005,74
32,0	3661,50
35,0	4215,81
36,0	4801,00
39,0	5403,11
41,0	6000,73
45,0	6600,11
49,0	7024,06
50,0	7625,01
50,0	8265,08
48,0	8846,89
44,0	9468,25
<b>Segunda carga</b>	
32,0	0,00
33,0	599,94
34,0	1151,17
36,0	1729,92

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.1. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas según el proceso actual (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C	Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s
38,0	2370,71
40,0	2995,75
41,0	3560,52
43,0	4151,93
45,0	4828,08
45,0	5415,38
44,0	6073,83
42,0	6780,09
42,0	7234,29
40,0	7603,94
<b>Tercera carga</b>	<b>Tercera carga</b>
36,0	0,00
36,0	598,23
36,0	1247,75
37,0	1782,49
38,0	2368,28
39,0	2997,59
41,0	3611,89
42,0	4152,89
45,0	4745,32
42,0	5320,19
41,0	6003,00
40,0	6408,32

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.2 Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas según el proceso actual.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C	Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s
<b>Primera carga</b>	<b>Primera carga</b>
23,0	0,00
25,0	690,00
26,0	1185,00
27,0	1782,00
28,0	2410,00
29,0	3012,00
30,0	3610,00
31,0	4215,00
31,0	4801,00
31,0	5424,28
31,0	6002,00
31,0	6602,00
<b>Segunda carga</b>	<b>Segunda carga</b>
31,0	7200,00
32,0	7832,00
34,0	8399,99
36,0	9064,69
38,0	9600,09
41,0	10175,99
42,0	10750,15
44,0	11416,07
44,0	12034,75
43,0	12623,14
41,0	13200,30
40,0	13818,15
38,0	14575,65

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.2. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas según el proceso actual (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C	Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s
35,0	15060,00
<b>Tercera carga</b>	<b>Tercera carga</b>
36,0	15723,78
38,0	16304,46
40,0	16888,84
45,0	17579,00
42,0	18060,39
42,0	18687,06
40,0	19346,85
40,0	20117,57
39,0	20332,82

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.3. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
24,0	25,0	22,0	0,00	0,00	0,00
24,0	26,0	24,0	690,98	600,00	672,78
26,0	27,0	25,0	1200,97	1210,93	1182,59
26,0	28,0	26,0	1801,51	1778,90	1797,02

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.3. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
28,0	29,0	27,0	2408,51	2387,80	2380,28
28,0	30,0	28,0	2964,46	2990,07	2986,82
28,0	32,0	29,0	3566,67	3571,36	3600,21
30,0	33,0	30,0	4194,82	4195,82	4197,22
30,0	34,0	31,0	4823,68	4840,28	4814,52
32,0	35,0	33,0	5444,09	5396,32	5400,00
34,0	37,0	35,0	5952,05	6027,58	6004,00
34,0	40,0	37,0	6498,18	6600,00	6600,00
36,0	42,0	40,0	7140,93	7200,00	7200,00
38,0	45,0	44,0	7777,21	7800,00	7839,00
40,0	49,0	48,0	8246,12	8400,00	8129,00
42,0	51,0	51,0	8790,37	8675,00	8457,00
44,0	55,0	53,0	9171,56	8950,00	8520,00
46,0	58,0	55,0	9558,80	9092,00	8640,00
50,0	60,0	58,0	9781,87	9185,00	8761,00
52,0	64,0	60,0	10086,31	9297,00	8799,00
54,0	68,0	62,0	10268,93	9418,00	8881,00
55,0	72,0	65,0	10472,82	9482,00	8965,00
56,0	80,0	67,0	10530,28	9509,00	8997,00
57,0	85,0	70,0	10567,98	9635,00	9057,00
58,0	88,0	72,0	10627,89	9668,62	9084,00
61,0	94,0	75,0	10710,68	9730,08	9116,00
63,0	96,0	78,0	10759,88	9768,59	9150,00
64,0	98,0	81,0	10805,28	9791,21	9178,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**TABLA A.3. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
66,0	100,0	84,0	10854,28	9857,00	9191,42
68,0	100,0	87,0	10882,28	9929,28	9214,00
70,0	101,0	92,0	10927,58	10020,23	9256,02
74,0	99,0	94,0	10988,48	10145,00	9296,03
77,0	98,0	97,0	11033,28	10261,03	9336,00
80,0	95,0	99,0	11055,78	10382,95	9389,00
82,0	92,0	100,0	11079,18	10502,00	9430,00
85,0	90,0	101,0	11107,15	10624,01	9490,00
88,0	88,0	102,0	11118,26	10747,02	9536,03
92,0	85,0	101,0	11141,68	10870,03	9571,00
95,0	83,0	100,0	11163,28	10980,02	9617,00
100,0	81,0	99,0	11182,97	11100,00	9682,00
104,0	80,0	99,0	11223,78	11220,03	9733,00
106,0	78,0	97,0	11253,28	11342,00	9886,00
108,0	76,0	95,0	11311,78	11460,00	10020,00
110,0	74,0	93,0	11399,48	11640,00	10140,00
110,0	67,0	90,0	11636,98	12242,00	10320,00
108,0	44,0	88,0	11798,78	15284,58	10440,02
106,0		87,0	11822,38		10561,03
102,0		85,0	11994,67		10703,04
102,0		82,0	12108,08		10800,00
100,0		81,0	12298,98		10927,22
98,0		80,0	12409,58		11040,92
96,0		78,0	12490,25		11170,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**TABLA A.3. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina (continuación).**

Temperatura (T ± 0,5) °C			Tiempo (t ± 0,01) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
68,0		50,0	14776,88		13886,98
66,0			15015,65		
62,0			15384,18		
60,0			15615,79		
58,0			16030,38		

Temperatura ambiente (Ta ± 0,5) °C: 26,0

Presión ambiente (P ± 0,05) mmHg: 709,46

**Tabla A.4. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina.**

Temperatura (T ± 0,5) °C			Tiempo (t ± 0,01) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
22,0	25,0	25,0	0,00	0,00	0,00
24,0	28,0	26,0	600,00	600,00	600,00
25,0	30,0	27,0	1200,00	1200,00	1200,00
27,0	33,0	28,0	1880,00	1800,00	1800,00
29,0	35,0	29,0	2405,00	2520,00	2400,00
31,0	37,0	31,0	3050,00	3000,00	3000,00
34,0	40,0	32,0	3600,00	3600,00	3600,00
39,0	44,0	34,0	4470,00	4200,00	4200,00
42,0	46,0	36,0	4800,00	4500,00	4800,00
45,0	49,0	38,0	5100,00	4800,00	5400,00
50,0	51,0	40,0	5400,00	4920,00	6000,00

Temperatura ambiente (Ta ± 0,5) °C: 26,0

Presión ambiente (P ± 0,05) mmHg: 709,46

**Tabla A.4. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento toda la resina sobre la amina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
50,0	51,0	40,0	5400,00	4920,00	6000,00
55,0	53,0	42,0	5639,00	5100,00	6350,00
60,0	56,0	43,0	5764,00	5265,00	6600,00
62,0	59,0	45,0	5880,00	5400,00	6900,00
65,0	62,0	47,0	5952,00	5520,00	7200,00
67,0	68,0	49,0	6000,00	5700,00	7320,00
71,0	70,0	54,0	6060,00	5820,00	7740,00
73,0	72,0	56,0	6129,00	5880,00	7860,00
74,0	73,0	58,0	6180,00	5940,00	8000,00
75,0	74,0	60,0	6240,00	6000,00	8090,00
76,0	75,0	62,0	6300,00	6120,00	8167,00
76,0	76,0	64,0	6375,00	6195,00	8255,00
75,0	73,0	66,0	6600,00	6360,00	8351,00
71,0	70,0	68,0	6919,00	6600,00	8436,00
69,0	63,0	70,0	7249,00	7200,00	8520,00
65,0	58,0	71,0	7500,00	7800,00	8640,00
61,0	52,0	73,0	7800,00	8100,00	8730,00
56,0	51,0	75,0	8100,00	8400,00	8885,00
54,0	46,0	76,0	8539,00	9300,00	9179,00
49,0		74,0	9015,00		9340,00
45,0		72,0	9611,00		9520,00
45,0		69,0	10260,00		9708,00
42,0		67,0	10800,00		9886,00
37,0		65,0	11400,00		10225,00
		61,0			10464,00
		45,0			13080,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.5. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la amina sobre la resina.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
22,0	24,0	24,0	0,00	0,00	0,00
23,0	25,0	25,0	632,58	640,28	600,08
24,0	26,0	26,0	1168,68	1205,32	1200,03
25,0	27,0	27,0	1858,65	1806,38	1800,48
26,0	28,0	28,0	2426,50	2400,03	2400,12
27,0	29,0	29,0	2986,28	3000,23	3003,22
28,0	30,0	29,0	3584,55	3600,00	3600,03
29,0	31,0	30,0	4143,56	4231,00	4222,04
30,0	32,0	31,0	4749,32	4808,00	4819,02
31,0	33,0	32,0	5372,21	5400,02	5401,68
32,0	34,0	33,0	6002,35	6000,00	6000,03
34,0	35,0	35,0	6552,65	6602,03	6613,00
35,0	36,0	36,0	7163,75	7222,04	7204,22
37,0	38,0	38,0	7553,15	7800,00	7800,22
39,0	40,0	39,0	8101,89	8400,03	8406,32
41,0	41,0	42,0	8447,00	9011,02	9011,22
43,0	44,0	45,0	8675,68	9610,04	9632,43
45,0	47,0	47,0	8950,38	10200,02	10231,02
46,0	50,0	50,0	9085,28	10800,03	10532,02
47,0	54,0	53,0	9236,95	11100,02	10802,28
49,0	59,0	58,0	9311,29	11400,22	11104,25
51,0	60,0	60,0	9448,46	11460,32	11160,40
54,0	62,0	62,0	9658,25	11520,33	11220,52
56,0	64,0	64,0	9872,56	11580,08	11280,32

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.5. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la amina sobre la resina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
58,0	67,0	65,0	9996,82	11640,22	11340,42
62,0	68,0	67,0	10050,58	11700,22	11411,12
63,0	73,0	68,0	10081,30	11760,32	11460,18
64,0	77,0	70,0	10140,52	11820,68	11520,25
68,0	81,0	74,0	10200,35	11880,67	11580,05
70,0	89,0	77,0	10265,00	11940,22	11642,45
74,0	95,0	82,0	10294,00	12000,28	11702,28
77,0	100,0	89,0	10324,00	12060,32	11764,22
80,0	102,0	98,0	10359,00	12122,03	11823,25
82,0	103,0	102,0	10383,68	12180,04	11881,05
84,0	104,0	106,0	10411,22	12242,04	11940,05
88,0	104,0	110,0	10440,25	12303,12	12000,02
93,0	104,0	112,0	10464,18	12360,11	12032,42
98,0	103,0	113,0	10500,00	12420,42	12060,05
102,0	103,0	115,0	10530,18	12480,12	12088,15
104,0	101,0	114,0	10560,21	12540,15	12120,05
107,0	101,0	113,0	10589,52	12608,21	12180,06
108,0	91,0	111,0	10620,01	13202,52	12240,05
110,0	84,0	111,0	10649,05	13801,28	12300,02
112,0	77,0	109,0	10680,02	14405,08	12360,42
112,0	69,0	109,0	10711,02	15028,06	12420,05
112,0	63,0	108,0	10744,00	15602,02	12482,00
112,0	58,0	106,0	10768,52	16204,05	12545,00
112,0	55,0	105,0	10800,22	16807,07	12600,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.5. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento toda la amina sobre la resina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
112,0	51,0	94,0	10856,28	17482,31	13202,12
111,0		84,0	10920,25		13803,12
110,0		75,0	10984,26		14405,22
108,0		68,0	11040,22		15005,04
107,0		63,0	11100,00		15662,05
107,0		57,0	11160,02		16264,03
107,0			11222,02		
106,0			11282,00		
104,0			11340,00		
103,0			11400,00		
94,0			12000,65		
89,0			12604,52		
78,0			13224,68		
50,0			16200,02		
46,0			17100,03		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.6. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento toda la amina sobre la resina.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
25,0	24,0	23,0	0,00	0,00	0,00
26,0	26,0	24,0	600,00	600,00	600,00
28,0	27,0	25,0	1200,00	1200,00	1200,00
29,0	27,0	26,0	1800,00	1800,00	1800,00
31,0	28,0	26,0	2400,00	2400,00	2400,00
35,0	29,0	27,0	3240,00	3000,00	3000,00
38,0	30,0	28,0	3660,00	3600,00	3600,00
44,0	31,0	29,0	4380,00	4200,00	4200,00
46,0	32,0	30,0	4500,00	4800,00	4800,00
49,0	33,0	32,0	4800,00	5400,00	5400,00
55,0	34,0	33,0	5065,00	6000,00	6000,00
57,0	36,0	35,0	5160,00	6600,00	6600,00
60,0	38,0	36,0	5280,00	7200,00	7200,00
63,0	40,0	38,0	5400,00	7800,00	7800,00
70,0	42,0	40,0	5520,00	8400,00	8400,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.6. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento toda la amina sobre la resina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
73,0	45,0	42,0	5580,00	9000,00	9000,00
75,0	48,0	44,0	5640,00	9600,00	9120,00
79,0	50,0	46,0	5700,00	9840,00	9480,00
81,0	52,0	48,0	5760,00	10080,00	9735,00
82,0	54,0	50,0	5839,00	10200,00	9990,00
83,0	56,0	52,0	5886,00	10370,00	10200,00
84,0	58,0	54,0	5940,00	10550,00	10380,00
84,0	60,0	56,0	6030,00	10720,00	10440,00
83,0	62,0	58,0	6132,00	10800,00	10560,00
82,0	64,0	60,0	6240,00	11040,00	10620,00
80,0	66,0	62,0	6360,00	11219,00	10650,00
77,0	67,0	64,0	6480,00	11399,00	10695,00
75,0	70,0	66,0	6600,00	11605,00	10740,00
72,0	72,0	68,0	6839,00	11700,00	10755,00
62,0	65,0	70,0	7409,00	12120,00	10790,00
61,0	63,0	72,0	7800,00	12420,00	10850,00
57,0	61,0	65,0	8400,00	12600,00	10980,00
53,0	59,0	66,0	9000,00	12900,00	11580,00
50,0	58,0	66,0	9667,29	13080,00	11760,00
45,0	57,0	64,0	10322,33	13200,00	11880,00
43,0	53,0	63,0	10800,00	13800,00	12000,00
40,0	49,0	58,0	11880,00	14400,00	12600,00
37,0	48,0	54,0	12480,00	14880,00	13200,00
	45,0	48,0		15600,00	13800,00
	42,0	47,0		16080,00	14400,00
	41,0	43,0		16860,00	14880,00
		42,0			15600,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.7. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de resina sobre amina.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
27,0	30,0	27,0	0,00	0,00	0,00
28,0	31,0	30,0	300,00	300,00	600,00
30,0	33,0	31,0	600,00	600,00	900,00
32,0	35,0	33,0	900,00	900,00	1200,00
34,0	37,0	34,0	1200,00	1200,00	1500,00
35,0	39,0	36,0	1500,00	1500,00	1800,00
36,0	41,0	38,0	1800,00	1800,00	2100,00
38,0	43,0	38,0	2100,00	2100,00	2400,00
39,0	45,0	38,0	2400,00	2400,00	2700,00
40,0	46,0	40,0	2700,00	2700,00	3000,00
41,0	47,0	40,0	3000,00	3000,00	3300,00
42,0	49,0	41,0	3300,00	3300,00	3600,00
43,0	50,0	41,0	3600,00	3600,00	3900,00
44,0	52,0	44,0	3900,00	3900,00	4200,00
45,0	54,0	47,0	4200,00	4200,00	4500,00
49,0	58,0	48,0	4800,00	4500,00	4800,00
50,0	65,0	52,0	5100,00	4800,00	5100,00
54,0	69,0	56,0	5400,00	4920,00	5400,00
57,0	74,0	62,0	5700,00	5040,00	5700,00
63,0	81,0	74,0	6000,00	5160,00	6000,00
66,0	86,0	79,0	6120,00	5220,00	6120,00
71,0	93,0	89,0	6240,00	5280,00	6240,00
73,0	99,0	95,0	6300,00	5340,00	6300,00
77,0	106,0	103,0	6360,00	5400,00	6360,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.7. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de resina sobre amina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
82,0	112,0	107,0	6420,00	5460,00	6420,00
86,0	115,0	111,0	6480,00	5520,00	6480,00
90,0	116,0	113,0	6540,00	5580,00	6540,00
95,0	115,0	112,0	6600,00	5640,00	6600,00
101,0	113,0	108,0	6660,00	5700,00	6720,00
107,0	111,0	104,0	6720,00	5760,00	6840,00
110,0	110,0	99,0	6780,00	5820,00	6960,00
111,0	107,0	96,0	6840,00	5880,00	7080,00
111,0	105,0	94,0	6900,00	5940,00	7200,00
110,0	104,0	79,0	6960,00	6000,00	7800,00
108,0	87,0	71,0	7020,00	6600,00	8400,00
106,0	75,0		7080,00	7200,00	
104,0			7140,00		
102,0			7200,00		
93,0			7500,00		
86,0			7800,00		
79,0			8100,00		
65,0			8400,00		
60,0			9000,00		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.8. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de resina sobre amina.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
27,0	27,0	30,0	0,00	0,00	0,00
29,0	29,0	32,0	600,00	600,00	300,00
30,0	32,0	33,0	900,00	1200,00	600,00
31,0	34,0	34,0	1200,00	1500,00	900,00
31,0	36,0	35,0	1500,00	1800,00	1200,00
33,0	38,0	37,0	1800,00	2100,00	1500,00
35,0	40,0	38,0	2100,00	2400,00	1800,00
37,0	43,0	41,0	2400,00	2700,00	2100,00
38,0	45,0	42,0	2700,00	3000,00	2400,00
40,0	48,0	44,0	3000,00	3300,00	2700,00
42,0	53,0	48,0	3300,00	3600,00	3000,00
44,0	57,0	52,0	3600,00	3900,00	3300,00
46,0	61,0	55,0	3900,00	4080,00	3600,00
49,0	64,0	63,0	4200,00	4200,00	3900,00
52,0	68,0	68,0	4500,00	4320,00	4080,00
55,0	72,0	70,0	4800,00	4440,00	4200,00
60,0	76,0	75,0	5100,00	4560,00	4320,00
63,0	79,0	79,0	5400,00	4680,00	4440,00
64,0	80,0	81,0	5700,00	4800,00	4560,00
63,0	80,0	81,0	6000,00	4920,00	4680,00
60,0	78,0	79,0	6300,00	5040,00	4800,00
58,0	77,0	74,0	6600,00	5160,00	5100,00
54,0	75,0	69,0	7200,00	5280,00	5400,00
48,0	73,0	55,0	7800,00	5400,00	6000,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.8. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de resina sobre amina (continuación)**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
	64,0			6000,00	
	63,0			6300,00	
	55,0			6600,00	

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.9. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de amina sobre resina.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
26,0	29,0	26,0	0,00	0,00	0,00
26,0	29,0	26,0	300,00	360,00	300,00
27,0	30,0	27,0	600,00	600,00	600,00
28,0	30,0	27,0	900,00	900,00	900,00
29,0	30,0	28,0	1200,00	1200,00	1200,00
30,0	31,0	28,0	1500,00	1500,00	1500,00
30,0	31,0	28,0	1800,00	1800,00	1800,00
31,0	31,0	29,0	2100,00	2100,00	2100,00
32,0	32,0	29,0	2400,00	2400,00	2400,00
33,0	32,0	29,0	2700,00	2700,00	2700,00
33,0	33,0	30,0	3000,00	3000,00	3000,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.9. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de amina sobre resina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
34,0	33,0	30,0	3300,00	3300,00	3300,00
34,0	34,0	30,0	3600,00	3600,00	3600,00
35,0	34,0	31,0	3900,00	3900,00	3900,00
35,0	35,0	31,0	4200,00	4200,00	4200,00
36,0	36,0	32,0	4500,00	4500,00	4800,00
37,0	37,0	33,0	4800,00	4800,00	5100,00
38,0	38,0	34,0	5100,00	5100,00	5700,00
39,0	39,0	34,0	5400,00	5400,00	6000,00
40,0	41,0	35,0	5700,00	5700,00	6300,00
41,0	42,0	35,0	6000,00	6000,00	6600,00
42,0	44,0	36,0	6300,00	6300,00	6900,00
43,0	47,0	37,0	6600,00	6600,00	7200,00
45,0	49,0	38,0	6900,00	6900,00	7500,00
47,0	52,0	39,0	7200,00	7200,00	8100,00
49,0	56,0	40,0	7500,00	7500,00	8400,00
51,0	62,0	42,0	7800,00	7800,00	8700,00
56,0	66,0	43,0	8100,00	7920,00	9000,00
62,0	70,0	45,0	8400,00	8040,00	9300,00
65,0	75,0	50,0	8640,00	8160,00	9960,00
69,0	82,0	51,0	8760,00	8280,00	10200,00
75,0	92,0	53,0	8880,00	8400,00	10500,00
80,0	105,0	58,0	9000,00	8520,00	10800,00
87,0	111,0	64,0	9120,00	8580,00	11100,00
94,0	114,0	68,0	9240,00	8640,00	11220,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.9. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de amina sobre resina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
99,0	115,0	72,0	9360,00	8700,00	11340,00
100,0	114,0	77,0	9480,00	8760,00	11460,00
99,0	113,0	80,0	9600,00	8820,00	11520,00
96,0	111,0	82,0	9720,00	8880,00	11580,00
92,0	109,0	86,0	9840,00	8940,00	11640,00
89,0	107,0	89,0	9960,00	9000,00	11700,00
86,0	92,0	91,0	10080,00	9300,00	11760,00
83,0	89,0	93,0	10200,00	9600,00	11820,00
80,0	82,0	95,0	10500,00	9900,00	11880,00
75,0	79,0	95,0	10800,00	10200,00	11940,00
53,0	74,0	95,0	13200,00	10500,00	12000,00
	71,0	95,0		10800,00	12060,00
		93,0			12120,00
		92,0			12180,00
		89,0			12300,00
		83,0			12600,00
		76,0			12900,00
		73,0			13200,00
		68,0			13500,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.10. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de amina sobre resina.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
28,0	28,0	29,0	0,00	0,00	0,00
31,0	31,0	31,0	300,00	300,00	300,00
32,0	32,0	33,0	600,00	600,00	600,00
33,0	33,0	35,0	900,00	900,00	900,00
34,0	35,0	35,0	1200,00	1200,00	1200,00
36,0	37,0	37,0	1500,00	1500,00	1500,00
38,0	38,0	38,0	1800,00	1800,00	1800,00
39,0	40,0	40,0	2100,00	2100,00	2100,00
40,0	42,0	41,0	2400,00	2400,00	2400,00
42,0	44,0	43,0	2700,00	2700,00	2700,00
43,0	46,0	45,0	3000,00	3000,00	3000,00
46,0	49,0	49,0	3300,00	3300,00	3300,00
50,0	54,0	53,0	3600,00	3600,00	3600,00
52,0	56,0	59,0	3720,00	3720,00	3840,00
53,0	58,0	61,0	3840,00	3840,00	3960,00
55,0	61,0	64,0	3960,00	3960,00	4080,00
57,0	64,0	68,0	4080,00	4080,00	4200,00
60,0	69,0	74,0	4200,00	4200,00	4320,00
65,0	74,0	76,0	4320,00	4320,00	4440,00
67,0	78,0	80,0	4440,00	4440,00	4560,00
71,0	81,0	81,0	4560,00	4560,00	4680,00
75,0	82,0	81,0	4680,00	4680,00	4800,00
78,0	81,0	79,0	4800,00	4800,00	4920,00
79,0	79,0	76,0	4920,00	4920,00	5040,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.10. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas siguiendo el procedimiento de cargas parciales de amina sobre resina (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
79,0	77,0	75,0	5040,00	5040,00	5160,00
77,0	75,0	72,0	5160,00	5160,00	5280,00
75,0	72,0	70,0	5280,00	5280,00	5400,00
74,0	70,0	62,0	5400,00	5400,00	6000,00
65,0	62,0	57,0	6000,00	6000,00	6300,00
59,0	56,0		6600,00	6300,00	

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.11. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N°1.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
30	30	30	0,00	0,00	0,00
30	31	30	300,00	300,00	672,78
31	32	32	600,00	600,00	1182,59
32	35	34	900,00	900,00	1797,02
34	39	36	1200,00	1200,00	2380,28
35	41	39	1500,00	1500,00	2986,82
37	45	42	1800,00	1800,00	3600,21

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.11. variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° N° 1 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
39	46	47	2100,00	2100,00	4197,22
44	48	50	2700,00	2400,00	4814,52
46	52	56	3000,00	2700,00	5400,00
48	54	61	3360,00	3000,00	6004,00
51	58	71	3600,00	3300,00	6600,00
60	64	75*	4200,00	3600,00	7200,00
69	76*	74**	4500,00	3900,00	7839,00
75*	76**	71	4680,00	3960,00	8129,00
70**	77*	73*	4740,00	4080,00	8457,00
67	74**	71**	4920,00	4140,00	8520,00
68	75	65	5100,00	4500,00	8640,00
68	78	68*	5400,00	4680,00	8761,00
76	79*	67**	5700,00	4740,00	8799,00
79*	78**	64	5760,00	4770,00	8881,00
78**	75	65	5820,00	4860,00	8965,00
73	78*	68*	5880,00	5100,00	8997,00
72	76**	67**	6000,00	5160,00	9057,00
81**	74	63	6300,00	5400,00	9084,00
81**	75	64	6360,00	5700,00	9116,00
79	78*	64	6480,00	5880,00	9150,00
79	77**	65	6600,00	5940,00	9178,00
80	75	65	6780,00	6000,00	9191,42
79	78*	64	6900,00	6300,00	9214,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.11. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 1 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
77	76**	62	7200,00	6360,00	9256,02
72	74	63	7560,00	6480,00	9296,03
70	72	65	7800,00	6900,00	9336,00
50	70	67	9240,00	7200,00	9389,00
	68	68*		7500,00	9430,00
	60	67**		8100,00	9490,00
		64			9536,03
		65			9571,00
		66			9617,00
		66			9682,00
		65			9733,00
		65			9886,00
		63			10020,00
		60			10140,00
		54			10320,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.12. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 1.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
35	35	35	0,00	0,00	0,00
35	35	37	300,00	600,00	300,00
35	36	38	600,00	1200,00	600,00
36	38	40	900,00	1800,00	900,00
37	40	42	1200,00	2520,00	1200,00
38	42	43	1500,00	3000,00	1500,00
40	45	45	1800,00	3600,00	1800,00
42	47	48	2100,00	4200,00	2100,00
47	50	51	2700,00	4500,00	2400,00
51	54	55	3000,00	4800,00	2700,00
58	60	65	3300,00	4920,00	3000,00
72	73	70	3600,00	5100,00	3120,00
83	81	75	3720,00	5265,00	3240,00
95	90	85	3780,00	5400,00	3360,00
105	96	89	3840,00	5520,00	3420,00
108	97	92	3900,00	5700,00	3480,00
100	93	95	4200,00	5820,00	3540,00
90	88	95	4500,00	5880,00	3600,00
83	80	95	4800,00	5940,00	3660,00
77	65	94	5100,00	6000,00	3720,00
73		90	5400,00		3840,00
70		87	5700,00		3960,00
57		84	6600,00		4080,00
		80			4200,00
		59			5400,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.13. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 2.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
30	30	30	0,00	0,00	0,00
32	32	31	690,98	600,00	300,00
34	34	35	1200,97	1210,93	600,00
36	36	37	1801,51	1778,90	900,00
36	38	39	2408,51	2387,80	1200,00
37	40	41	2964,46	2990,07	1500,00
38	42	43	3566,67	3571,36	1800,00
40	44	46	4194,82	4195,82	2100,00
42	46	48	4823,68	4840,28	2400,00
45	46	51	5444,09	5396,32	2700,00
45	46	57	5952,05	6027,58	3000,00
45	46	64	6498,18	6600,00	3300,00
46	47	81	7140,93	7200,00	3600,00
49	48	87	7777,21	7800,00	3660,00
53	50	94	8246,12	8400,00	3720,00
60	54	105	8790,37	8675,00	3780,00
71	59	119	9171,56	8950,00	3840,00
74	68	128	9558,80	9092,00	3900,00
78	82	129	9781,87	9185,00	3960,00
83	90	127	10086,31	9297,00	4020,00
89	98	125	10268,93	9418,00	4080,00
97	107	122	10472,82	9482,00	4140,00
107	116	120	10530,28	9509,00	4200,00
118	120	108	10567,98	9635,00	4500,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.13. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 2 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
124	121	105	10627,89	9668,62	4800,00
125	120	94	10710,68	9730,08	5100,00
124	118	85	10759,88	9768,59	5400,00
122	114	76	10805,28	9791,21	6000,00
114	96	68	10854,28	9857,00	6600,00
92	81		10882,28	9929,28	
78	74		10927,58	10020,23	
66	67		10988,48	10145,00	

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.14. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 2.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
35,0	36,0	35,0	0,00	0,00	0,00
35,0	36,0	36,0	300,00	300,00	300,00
36,0	36,0	37,0	600,00	600,00	600,00
36,0	37,0	38,0	900,00	900,00	900,00
38,0	39,0	39,0	1200,00	1200,00	1200,00
40,0	40,0	42,0	1500,00	1500,00	1500,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.14. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 2 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
44,0	42,0	45,0	1800,00	1800,00	1800,00
48,0	45,0	50,0	2100,00	2100,00	2100,00
53,0	48,0	55,0	2400,00	2400,00	2400,00
64,0	53,0	65,0	2700,00	2700,00	2700,00
72,0	61,0	67,0	2820,00	3000,00	2760,00
77,0	65,0	70,0	2880,00	3120,00	2820,00
84,0	70,0	74,0	2940,00	3240,00	2880,00
90,0	76,0	76,0	3000,00	3360,00	2940,00
96,0	80,0	80,0	3060,00	3420,00	3000,00
98,0	83,0	84,0	3120,00	3480,00	3060,00
99,0	85,0	89,0	3180,00	3540,00	3120,00
99,0	87,0	91,0	3240,00	3600,00	3180,00
95,0	88,0	93,0	3360,00	3660,00	3240,00
91,0	87,0	92,0	3480,00	3720,00	3300,00
87,0	86,0	91,0	3600,00	3780,00	3360,00
80,0	84,0	90,0	3900,00	3840,00	3420,00
78,0	83,0	88,0	4200,00	3900,00	3480,00
62,0	74,0	86,0	4800,00	4200,00	3540,00
59,0	63,0	85,0	5400,00	8400,00	3600,00
		66,0			4200,00
		63,0			4500,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A15. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 3.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
35,0	35	35,0	0,00	0,00	0,00
37,0	37	34,0	300,00	300,00	300,00
40,0	39	35,0	600,00	600,00	600,00
42,0	42	37,0	900,00	900,00	900,00
45,0	45	40,0	1200,00	1200,00	1200,00
48,0	49	42,0	1500,00	1500,00	1500,00
50,0	51	44,0	1800,00	1800,00	1800,00
53,0	52	46,0	2100,00	2100,00	2100,00
57,0	54	49,0	2400,00	2400,00	2400,00
62,0	57	53,0	2700,00	2700,00	2700,00
69,0	61	58,0	3000,00	3000,00	3000,00
75,0	67	61,0	3180,00	3300,00	3120,00
78,0	73	65,0	3240,00	3600,00	3240,00
81,0	78	68,0	3300,00	3900,00	3360,00
84,0	82	71,0	3360,00	4200,00	3420,00
88,0	86	74,0	3420,00	4500,00	3480,00
93,0	86	78,0	3480,00	4800,00	3540,00
97,0	88	83,0	3540,00	5100,00	3600,00
101,0	89	87,0	3600,00	5160,00	3660,00
107,0	89	95,0	3660,00	5220,00	3720,00
108,0	88	101,0	3720,00	5280,00	3780,00
109,0	88	107,0	3780,00	5340,00	3840,00
109,0	87	110,0	3840,00	5400,00	3900,00
108,0	84	111,0	3900,00	5520,00	3960,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.15. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 3 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
107,0	82	111,0	3960,00	5640,00	4020,00
106,0	79	101,0	4020,00	5760,00	4080,00
106,0	80	109,0	4080,00	5880,00	4140,00
105,0	77	108,0	4140,00	6000,00	4200,00
104,0	69	107,0	4200,00	6600,00	4320,00
103,0	65	105,0	4260,00	7200,00	4440,00
102,0		104,0	4320,00		4560,00
101,0		103,0	4380,00		4680,00
100,0		104,0	4440,00		4800,00
97,0		107,0	4560,00		4920,00
95,0		107,0	4680,00		5040,00
92,0		105,0	4800,00		5160,00
89,0		102,0	4920,00		5280,00
87,0		100,0	5040,00		5400,00
84,0		85,0	5160,00		6000,00
82,0		68,0	5280,00		6600,00
80,0			5400,00		
73,0			5700,00		
68,0			6000,00		
62,0			6600,00		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.16. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 3.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
35,0	35,0	36	0,00	0,00	0,00
35,0	35,0	36	300,00	300,00	300,00
36,0	35,0	36	600,00	600,00	600,00
38,0	36,0	36	900,00	900,00	900,00
39,0	38,0	37	1200,00	1200,00	1200,00
42,0	40,0	38	1500,00	1500,00	1560,00
45,0	43,0	39	1800,00	1800,00	1800,00
49,0	47,0	41	2100,00	2100,00	2100,00
54,0	52,0	42	2400,00	2400,00	2400,00
57,0*	60,0	45	2520,00	2700,00	2700,00
55,0	71,0*	49	2640,00	2940,00	3000,00
44,0	61,0**	55	2760,00	3120,00	3300,00
40,0	60,0	65*	2880,00	3300,00	3600,00
38,0	66,0	64**	3000,00	3600,00	3720,00
37,0	68,0	67*	3120,00	3720,00	3840,00
35,0**	71,0*	65**	3240,00	3900,00	3960,00
36,0	65,0**	65	3600,00	4080,00	4140,00
41,0	62,0	67*	4200,00	4200,00	4260,00
45,0	61,0	66**	4500,00	4620,00	4380,00
49,0	60,0	63	4800,00	4860,00	4500,00
53,0	59,0	63	5100,00	5100,00	4680,00
58,0	58,0	63	5400,00	5400,00	4800,00
62,0	57,0	62	5700,00	5700,00	5100,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.16. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 3 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
65,0	56,0	60	6000,00	6000,00	5400,00
65,0	55,0	51	6300,00	6300,00	6000,00
63,0	55,0		6600,00	6600,00	
61,0	55,0		6900,00	6900,00	
59,0	51,0		7200,00	7200,00	
57,0			7800,00		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.17. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 4.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
35,0	35,0	35,0	0,00	0,00	0,00
35,0	37,0	35,0	300,00	300,00	300,00
37,0	39,0	37,0	600,00	600,00	600,00
39,0	41,0	39,0	900,00	900,00	900,00
41,0	43,0	41,0	1200,00	1200,00	1200,00
44,0	45,0	44,0	1500,00	1500,00	1500,00
48,0	48,0	48,0	1800,00	1800,00	1800,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.17. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 4 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
51,0	51,0	51,0	2100,00	2100,00	2100,00
56,0	52,0	56,0	2400,00	2400,00	2400,00
63,0	56,0	63,0	2700,00	2700,00	2700,00
67,0*	58,0	67,0*	2820,00	3000,00	2820,00
66,0**	64,0	66,0**	2880,00	3300,00	2880,00
62,0	68,0*	62,0	3000,00	3480,00	3000,00
65,0	67,0**	65,0	3240,00	3510,00	3240,00
68,0*	64,0	68,0*	3360,00	3600,00	3360,00
66,0**	65,0	66,0**	3390,00	3720,00	3390,00
64,0	67,0	64,0	3480,00	3870,00	3480,00
65,0	68,0*	65,0	3600,00	3900,00	3600,00
67,0	66,0**	67,0	3720,00	3960,00	3720,00
68,0*	63,0	68,0*	3780,00	4140,00	3780,00
67,0**	64,0	67,0**	3840,00	4500,00	3840,00
64,0	64,0	64,0	3900,00	4680,00	3900,00
64,0	64,0	64,0	4020,00	4860,00	4020,00
65,0	64,0	65,0	4140,00	5100,00	4140,00
67,0	64,0	67,0	4440,00	5400,00	4440,00
67,0	63,0	67,0	4620,00	5700,00	4620,00
68,0*	64,0	68,0*	4800,00	6000,00	4800,00
67,0**	66,0	67,0**	4860,00	6180,00	4860,00
64,0	67,0	64,0	4980,00	6240,00	4980,00
63,0	68,0*	63,0	5100,00	6270,00	5100,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.17. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 4 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
64,0	67,0**	64,0	5400,00	6330,00	5400,00
65,0	67,0	65,0	5580,00	6420,00	5580,00
67,0	68,0*	67,0	5760,00	6450,00	5760,00
67,0	66,0**	67,0	5880,00	6480,00	5880,00
68,0*	65,0	68,0*	6030,00	6540,00	6030,00
67,0**	67,0	67,0**	6060,00	6660,00	6060,00
66,0	68,0*	66,0	6180,00	6720,00	6180,00
67,0	66,0**	67,0	6240,00	6750,00	6240,00
68,0*	65,0	68,0	6330,00	6840,00	6330,00
66,0**	67,0	66,0	6300,00	7020,00	6300,00
65,0	68,0*	65,0	6480,00	7050,00	6480,00
67,0	66,0**	67,0	6600,00	7080,00	6600,00
68,0*	65,0	68,0*	6720,00	7200,00	6720,00
66,0**	67,0	66,0**	6780,00	7320,00	6780,00
64,0	68,0	64,0	6960,00	7440,00	6960,00
64,0	66,0	64,0	7080,00	7470,00	7080,00
64,0	64,0	64,0	7440,00	7560,00	7440,00
64,0	65,0	64,0	7620,00	7800,00	7620,00
63,0	65,0	63,0	7920,00	7980,00	7920,00
59,0	66,0	59,0	8160,00	8400,00	8160,00
55,0	65,0	55,0	8580,00	8640,00	8580,00
	60,0			9300,00	

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.18. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 4.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
30,0	30,0	30,0	0,00	0,00	0,00
31,0	32,0	32,0	300,00	300,00	300,00
33,0	34,0	34,0	600,00	600,00	600,00
35,0	36,0	37,0	900,00	900,00	900,00
38,0	38,0	40,0	1200,00	1200,00	1200,00
40,0	40,0	41,0	1500,00	1500,00	1500,00
41,0	42,0	43,0	1800,00	1800,00	1800,00
43,0	43,0	45,0	2100,00	2100,00	2100,00
45,0	45,0	47,0	2400,00	2400,00	2400,00
47,0	48,0	50,0	2700,00	2700,00	2700,00
50,0	51,0	55,0	3000,00	3000,00	3000,00
55,0	55,0	63,0	3300,00	3300,00	3300,00
58,0	61,0	65,0	3600,00	3600,00	3360,00
63,0	70,0	67,0	3900,00	3900,00	3420,00
65,0	72,0	69,0	3960,00	3960,00	3480,00
66,0	75,0	71,0	4020,00	4020,00	3540,00
67,0	76,0	75,0	4080,00	4080,00	3600,00
68,0	77,0	78,0	4140,00	4140,00	3660,00
69,0	78,0	82,0	4200,00	4200,00	3720,00
70,0	78,0	85,0	4260,00	4260,00	3780,00
70,0	78,0	88,0	4320,00	4320,00	3840,00
72,0	77,0	89,0	4380,00	4380,00	3900,00
72,0	76,0	90,0	4440,00	4440,00	3960,00
72,0	75,0	89,0	4500,00	4500,00	4020,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.18. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 4 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
72,0	70,0	88,0	4560,00	4800,00	4080,00
71,0	64,0	87,0	4620,00	5400,00	4140,00
70,0	55,0	86,0	4680,00	6000,00	4200,00
70,0		73,0	4740,00		4800,00
70,0		60,0	4800,00		5400,00
63,0		55,0	5400,00		6000,00
54,0			6000,00		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.19. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 5.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
30,0	30,0	32,0	0,00	0,00	0,00
32,0	32,0	35,0	300,00	300,00	300,00
36,0	35,0	37,0	600,00	600,00	600,00
68,0	38,0	40,0	900,00	900,00	900,00
41,0	40,0	44,0	1200,00	1200,00	1200,00
43,0	42,0	48,0	1500,00	1620,00	1500,00
46,0	43,0	50,0	1800,00	1800,00	1800,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.19. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 5 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
50,0	45,0	54,0	2100,00	2100,00	2100,00
53,0	46,0	59,0	2400,00	2400,00	2400,00
58,0	47,0	66,0	2700,00	2700,00	2700,00
63,0	49,0	81,0	3000,00	3000,00	3000,00
70,0	52,0	88,0	3300,00	3300,00	3060,00
78,0	56,0	96,0	3600,00	3600,00	3120,00
82,0	62,0	107,0	3900,00	3900,00	3180,00
80,0	72,0	113,0	4200,00	4200,00	3240,00
78,0	83,0	116,0	4500,00	4380,00	3300,00
75,0	88,0	116,0	4800,00	4440,00	3360,00
73,0	93,0	115,0	5100,00	4500,00	3420,00
73,0	98,0	114,0	5400,00	4560,00	3480,00
73,0	101,0	111,0	5700,00	4620,00	3540,00
73,0	103,0	111,0	6000,00	4680,00	3600,00
74,0	103,0	108,0	6300,00	4740,00	3720,00
76,0	102,0	106,0	6600,00	4800,00	3840,00
76,0	99,0	102,0	6900,00	4920,00	3960,00
75,0	97,0	98,0	7200,00	5040,00	4080,00
73,0	95,0	95,0	7500,00	5100,00	4200,00
70,0	89,0	87,0	7800,00	5400,00	4500,00
61,0	84,0	84,0	8400,00	5880,00	4800,00
	84,0	81,0		6000,00	5100,00
	84,0	78,0		6300,00	5400,00
	84,0	77,0		6600,00	5700,00
	82,0	77,0		6900,00	6000,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.19. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 5 (continuación).**

Temperatura (T ± 0,5) °C			Tiempo (t ± 0,01) s		
	77,0	78,0		7200,00	6300,00
	69,0	77,0		7500,00	6600,00
	66,0	74,0		7800,00	6900,00
		65,0			7320,00

Temperatura ambiente (Ta ± 0,5) °C: 26,0

Presión ambiente (P ± 0,05) mmHg: 709,46

**Tabla A.20. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 5.**

Temperatura (T ± 0,5) °C			Tiempo (t ± 0,01) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
31,0	32,0	30,0	0,00	0,00	0,00
32,0	32,0	30,0	300,00	300,00	300,00
32,0	33,0	31,0	600,00	600,00	600,00
33,0	33,0	31,0	900,00	900,00	900,00
34,0	34,0	32,0	1200,00	1200,00	1200,00
36,0	35,0	33,0	1500,00	1500,00	1500,00
37,0	36,0	34,0	1800,00	1800,00	1800,00
41,0	36,0	35,0	2220,00	2100,00	2100,00
43,0	38,0	37,0	2520,00	2400,00	2400,00
45,0	38,0	38,0	2700,00	2700,00	2700,00
50,0	39,0	41,0	3000,00	3000,00	3000,00

Temperatura ambiente (Ta ± 0,5) °C: 26,0

Presión ambiente (P ± 0,05) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.20. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 5 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
57,0	45,0	45,0	3300,00	3420,00	3300,00
66,0*	51,0	49,0	3600,00	3780,00	3600,00
64,0**	53,0	53,0	3720,00	3900,00	3780,00
67,0*	63,0	55,0	3840,00	4200,00	3900,00
66,0**	68,0*	60,0	3960,00	4320,00	4080,00
65,0	62,0**	64,0	4080,00	4500,00	4200,00
67,0*	61,0	68,0*	4200,00	4620,00	4320,00
65,0**	64,0*	65,0**	4320,00	4800,00	4380,00
61,0	60,0**	63,0	4440,00	4920,00	4560,00
61,0	58,0	65,0	4680,00	5100,00	4800,00
61,0	57,0	66,0	4800,00	5400,00	4980,00
57,0	57,0	66,0	5580,00	5700,00	5100,00
	41,0	66,0		7380,00	5220,00
		65,0			5400,00
		62,0			5700,00
		59,0			6000,00
		56,0			6300,00
		54,0			6600,00
		48,0			7080,00
		41,0			7680,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.21. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 6.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
30,0	30	30,0	0,00	0,00	0,00
31,0	31,0	31,0	300,00	300,00	600,00
33,0	32,0	28,0	600,00	600,00	900,00
35,0	36,0	30,0	900,00	1200,00	1200,00
38,0	40,0	33,0	1200,00	1500,00	1500,00
41,0	42,0	37,0	1500,00	1800,00	2100,00
44,0	46,0	39,0	1800,00	2100,00	2400,00
48,0	50,0	42,0	2100,00	2400,00	2700,00
53,0	55,0	45,0	2400,00	2700,00	3000,00
59,0	62,0	48,0	2700,00	3000,00	3300,00
64,0	64,0	53,0	2880,00	3120,00	3600,00
65,0	66,0	61,0	2910,00	3180,00	3900,00
68,0*	67,0	71,0*	2970,00	3210,00	4260,00
67,0**	68,0*	65,0**	3030,00	3240,00	4350,00
66,0	67,0**	57,0	3120,00	3270,00	4500,00
68,0*	63,0	67,0	3180,00	3390,00	5040,00
66,0**	64,0	68,0*	3210,00	3510,00	5100,00
64,0	65,0	66,0**	3300,00	3600,00	5130,00
69,0*	66,0	67,0	3540,00	3720,00	5160,00
67,0**	66,0	68,0*	3570,00	4200,00	5220,00
64,0	65,0	67,0**	3660,00	4260,00	5250,00
65,0	64,0	66,0	3840,00	4440,00	5310,00
67,0	65,0	67,0	3960,00	4740,00	5340,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.21. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 6 (continuación).**

Temperatura (T ± 0,5) °C			Tiempo (t ± 0,01) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
68,0*	61,0	68,0*	4020,00	4980,00	5370,00
66,0**	64,0	66,0**	4050,00	5220,00	5400,00
65,0	65,0	65,0	4140,00	5280,00	5520,00
67,0	67,0	66,0	4320,00	5295,00	5550,00
68,0*	68,0*	68,0*	4380,00	5330,00	5640,00
67,0**	67,0**	67,0**	4440,00	5370,00	5670,00
65,0	66,0	64,0	4500,00	5400,00	5760,00
67,0	70,0*	65,0	4560,00	5580,00	5940,00
68,0*	67,0**	66,0	4590,00	5640,00	6030,00
66,0**	69,0*	68,0*	4650,00	5760,00	6180,00
65,0	68,0**	67,0**	4740,00	5820,00	6210,00
66,0	67,0	65,0	4800,00	5970,00	6330,00
67,0	67,0	65,0	4830,00	6000,00	6540,00
68,0*	68,0*	66,0	4890,00	6060,00	6780,00
67,0**	66,0**	65,0	4920,00	6120,00	7260,00
64,0	65,0		4980,00	6210,00	
66,0	67,0		5160,00	6360,00	
67,0	68,0*		5220,00	6480,00	
68,0*	67,0**		5280,00	6540,00	
66,0**	65,0		5310,00	6600,00	
64,0	65,0		5400,00	6780,00	
64,0	65,0		5580,00	6990,00	
65,0	65,0		5700,00	7200,01	

Temperatura ambiente (Ta ± 0,5) °C: 26,0

Presión ambiente (P ± 0,05) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.21. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 6 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
66,0	64,0		5760,00	7500,02	
67,0	58,0		5940,00	8640,03	
68,0*			6270,00		
66,0**			6300,00		
64,0			6360,00		
63,0			6600,00		
62,0			6900,00		
48,0			8640,00		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.22. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 6.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
30,0	30,0	30,0	0,00	0,00	0,00
32,0	32,0	31,0	300,00	300,00	300,00
34,0	33,0	33,0	600,00	600,00	600,00
35,0	35,0	34,0	900,00	900,00	900,00
37,0	36,0	36,0	1200,00	1200,00	1200,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.22. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 6 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
39,0	37,0	38,0	1500,00	1500,00	1500,00
41,0	39,0	42,0	1800,00	1800,00	1800,00
45,0	42,0	45,0	2100,00	2100,00	2100,00
48,0	49,0	50,0	2400,00	2520,00	2520,00
54,0	51,0	58,0	2700,00	2700,00	2700,00
63,0	57,0	68,0	3000,00	3000,00	3000,00
66,0	62,0	72,0	3060,00	3180,00	3060,00
70,0	68,0	76,0	3120,00	3300,00	3120,00
74,0	74,0	81,0	3180,00	3420,00	3180,00
79,0	79,0	86,0	3240,00	3480,00	3240,00
85,0	85,0	90,0	3300,00	3600,00	3300,00
91,0	88,0	93,0	3360,00	3660,00	3360,00
98,0	90,0	94,0	3420,00	3780,00	3420,00
101,0	98,0	94,0	3480,00	3900,00	3480,00
101,0	78,0	93,0	3540,00	4320,00	3540,00
100,0	73,0	91,0	3600,00	4500,00	3600,00
98,0	53,0	75,0	3660,00	7320,00	4200,00
96,0		69,0	3720,00		4800,00
94,0		55,0	3780,00		5400,00
92,0			3840,00		
91,0			3900,00		
82,0			4200,00		
68,0			4800,00		
58,0			5400,00		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.23. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 7.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
35,0	35,0	35,0	0,00	0,00	0,00
37,0	37,0	38,0	300,00	300,00	300,00
38,0	39,0	40,0	600,00	600,00	600,00
40,0	41,0	44,0	900,00	900,00	900,00
43,0	42,0	47,0	1200,00	1200,00	1200,00
45,0	43,0	51,0	1500,00	1500,00	1500,00
50,0	45,0	55,0	1800,00	1800,00	1800,00
52,0	48,0	59,0	2400,00	2100,00	2100,00
55,0	50,0	64,0	2700,00	2700,00	2400,00
57,0	53,0	68,0	3000,00	3000,00	2520,00
58,0	58,0	75,0	3300,00	3300,00	2700,00
57,0	61,0	78,0	3600,00	3600,00	2760,00
55,0	67,0	83,0	3900,00	3900,00	2880,00
53,0	72,0	87,0	4200,00	4200,00	2970,00
51,0	74,0	89,0	4500,00	4500,00	3000,00
51,0	73,0	91,0	4800,00	4800,00	3060,00
50,0	76,0	92,0	5100,00	5100,00	3120,00
51,0	80,0	92,0	5400,00	5400,00	3240,00
50,0	82,0	91,0	5700,00	5520,00	3300,00
50,0	83,0	89,0	6000,00	5640,00	3420,00
51,0	85,0	87,0	6300,00	5760,00	3540,00
55,0	87,0	88,0	6600,00	5880,00	3660,00
62,0	89,0	82,0	6900,00	6000,00	3840,00
71,0	93,0	80,0	7200,00	6120,00	3960,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.23. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 7 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
74,0	98,0	77,0	7260,00	6240,00	4200,00
77,0	99,0	75,0	7320,00	6360,00	4380,00
80,0	98,0	73,0	7380,00	6480,00	4560,00
83,0	98,0	70,0	7440,00	6600,00	4800,00
88,0	92,0	67,0	7500,00	6900,00	5100,00
91,0	89,0	65,0	7560,00	7200,00	5400,00
95,0	75,0	65,0	7620,00	7800,00	5700,00
98,0	66,0	66,0	7680,00	8400,00	5880,00
100,0		66,0	7740,00		6420,00
100,0		65,0	7800,00		6840,00
100,0		62,0	7860,00		7380,00
99,0		55,0	7920,00		8400,00
98,0		77,0	7980,00		4200,00
97,0		75,0	8040,00		4380,00
95,0		73,0	8100,00		4560,00
89,0		70,0	8400,00		4800,00
72,0		67,0	9000,00		5100,00
66,0		65,0	9600,00		5400,00
		65,0			5700,00
		66,0			5880,00
		66,0			6420,00
		65,0			6840,00
		62,0			7380,00
		55,0			8400,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

**Tabla A.24. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 7.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
30,0	30,0	30,0	0,00	0,00	0,00
31,0	30,0	32,0	300,00	300,00	300,00
32,0	31,0	32,0	660,00	600,00	600,00
33,0	33,0	34,0	900,00	1080,00	900,00
33,0	34,0	35,0	1200,00	1200,00	1200,00
34,0	35,0	36,0	1500,00	1500,00	1500,00
35,0	37,0	37,0	1800,00	1800,00	1800,00
36,0	42,0	38,0	2100,00	2400,00	2100,00
38,0	45,0	39,0	2400,00	2700,00	2400,00
39,0	50,0	40,0	2700,00	3000,00	2700,00
41,0	55,0	41,0	3000,00	3300,00	3000,00
44,0	68,0*	44,0	3300,00	3720,00	3300,00
48,0	66,0**	46,0	3600,00	3780,00	3600,00
52,0	63,0	51,0	3900,00	3840,00	3900,00
59,0	64,0	56,0	4200,00	3900,00	4200,00
63,0	67,0*	65,0	4320,00	4020,00	4500,00
68,0*	63,0**	67,0*	4440,00	4140,00	4560,00
65,0**	58,0	66,0**	4500,00	4320,00	4620,00
63,0	58,0	63,0	4560,00	4500,00	4680,00
65,0	58,0	65,0	4680,00	4800,00	4800,00
67,0*	58,0	67,0*	4740,00	5100,00	4860,00
66,0**	56,0	65,0**	4800,00	5400,00	4920,00
63,0	49,0	63,0	4920,00	6240,00	5040,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.24. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 7 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
64,0		65,0	5100,00		5160,00
66,0		67,0*	5400,00		5340,00
65,0		67,0	5700,00		5400,00
63,0		65,0**	6000,00		5460,00
60,0		63,0	6300,00		5520,00
57,0		62,0	6900,00		5820,00
56,0		62,0	7200,00		6000,00
51,0		58,0	7800,00		6300,00
49,0		55,0	8280,00		6900,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.25. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8.**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
35,0	35,0	35,0	0,00	0,00	0,00
36,0	35,0	35,0	300,00	300,00	300,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.25. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
38,0	36,0	36,0	600,00	600,00	600,00
41,0	37,0	38,0	900,00	900,00	900,00
43,0	38,0	40,0	1200,00	1200,00	1200,00
45,0	39,0	41,0	1500,00	1500,00	1500,00
48,0	43,0	43,0	1800,00	1800,00	1800,00
55,0	45,0	46,0	2100,00	1980,00	2100,00
61,0	49,0	49,0	2700,00	2400,00	2400,00
65,0	53,0	51,0	3000,00	2700,00	2700,00
68,0	57,0	55,0	3180,00	3000,00	3000,00
70,0*	65,0	57,0	3330,00	3300,00	3300,00
68,0**	67,0	62,0	3360,00	3390,00	3600,00
67,0	68,0*	64,0	3420,00	3420,00	3660,00
68,0*	67,0**	65,0	3450,00	3450,00	3720,00
66,0**	64,0	67,0	3540,00	3480,00	3760,00
63,0	65,0	68,0*	3570,00	3540,00	3780,00
66,0	66,0	67,0**	3720,00	3600,00	3810,00
67,0	68,0*	66,0	3840,00	3650,00	3930,00
68,0*	67,0**	68,0*	3870,00	3690,00	3990,00
66,0**	64,0	67,0*8	3900,00	3720,00	4020,00
67,0	65,0	65,0	3930,00	3780,00	4050,00
68,0*	67,0	67,0	3990,00	3840,00	4140,00
65,0**	68,0*	68,0*	4020,00	3900,00	4170,00
67,0	67,0**	67,0*8	4170,00	3930,00	4200,00

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.25. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8 (continuación).**

Temperatura (T ± 0,5) °C			Tiempo (t ± 0,01) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
68,0*	65,0	65,0	4200,00	3990,00	4260,00
66,0**	65,0	67,0	4230,00	4080,00	4350,00
65,0	66,0	68,0*	4260,00	4110,00	4380,00
68,0*	68,0*	66,0**	4320,00	4260,00	4410,00
67,0**	67,0**	65,0	4380,00	4320,00	4440,00
72,0*	66,0	66,0	4680,00	4350,00	4500,00
69,0**	67,0	68,0*	4710,00	4380,00	4560,00
63,0	68,0*	66,0**	4770,00	4410,00	4590,00
57,0	67,0**	64,0	4800,00	4440,00	4650,00
58,0	66,0	65,0	5280,00	4470,00	4800,00
60,0	67,0	67,0	5700,00	4530,00	4920,00
60,0	68,0*	68,0*	6000,00	4560,00	4950,00
60,0	67,0**	67,0**	6300,00	4590,00	4980,00
54,0	64,0	66,0	6840,00	4620,00	5040,00
	65,0	67,0		4680,00	5130,00
	66,0	68,0*		4740,00	5160,00
	68,0*	67,0**		4800,00	5190,00
	67,0**	64,0		4830,00	5250,00
	65,0	64,0		4860,00	5340,00
	66,0	65,0		4920,00	5460,00
	67,0	67,0		4950,00	5610,00
	68,0*	68,0*		4980,00	5730,00
	67,0**	67,0**		5020,00	5760,00

Temperatura ambiente (Ta ± 0,5) °C: 26,0

Presión ambiente (P ± 0,05) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.25. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas alifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
	66,0	65,0		5070,00	5820,00
	67,0	66,0		5160,00	6090,00
	68,0*	65,0		5190,00	6600,00
	66,0**	58,0		5220,00	7320,00
	67,0			5280,00	
	68,0*			5340,00	
	67,0**			5370,00	
	68,0*			5520,00	
	67,0**			5550,00	
	64,0			5580,00	
	65,0			5640,00	
	66,0			5880,00	
	67,0			6000,00	
	68,0*			6240,00	
	67,0**			6270,00	
	65,0			6300,00	
	64,0			6780,00	
	51,0			8220,00	

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.26. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8.**

Temperatura (T ± 0,5) °C			Tiempo (t ± 0,01) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
34,0	33,0	35,0	0,00	0,00	0,00
34,0	33,0	35,0	300,00	300,00	300,00
35,0	33,0	35,0	600,00	600,00	600,00
36,0	33,0	35,0	900,00	900,00	900,00
37,0	35,0	36,0	1200,00	1500,00	1200,00
38,0	36,0	37,0	1500,00	1800,00	1500,00
40,0	37,0	40,0	1800,00	2100,00	2100,00
42,0	39,0	42,0	2100,00	2400,00	2400,00
44,0	41,0	46,0	2400,00	2700,00	2700,00
46,0	43,0	49,0	2700,00	3000,00	3000,00
50,0	46,0	58,0	3000,00	3300,00	3360,00
57,0	51,0	63,0	3300,00	3600,00	3480,00
65,0	54,0	68,0*	3600,00	3780,00	3600,00
67,0*	58,0	67,0**	3660,00	3900,00	3660,00
66,0**	66,0	64,0	3720,00	4200,00	3780,00
65,0	65,0	70,0*	3840,00	4320,00	3960,00
67,0*	65,0	68,0**	3900,00	4440,00	4080,00
66,0**	68,0*	65,0	3960,00	4560,00	4140,00
63,0	67,0**	63,0	4200,00	4620,00	4200,00
65,0	65,0	64,0	4320,00	4680,00	4440,00
66,0	64,0	64,0	4500,00	4740,00	4680,00
67,0*	64,0	62,0	4620,00	4980,00	4920,00
66,0**	64,0	49,0	4680,00	5100,00	6180,00

Temperatura ambiente (Ta ± 0,5) °C: 26,0

Presión ambiente (P ± 0,05) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

**Tabla A.26. Variación de la temperatura de reacción con respecto al tiempo en la fabricación de un aducto con aminas cicloalifáticas a las condiciones del tratamiento N° 8 (continuación).**

Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C			Tiempo ( $t \pm 0,01$ ) s		
Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
61,0	64,0	41,0	4800,00	5400,00	7620,00
59,0	62,0		4920,00	5700,00	
59,0	50,0		5100,00	6600,00	
46,0			6420,00		

Temperatura ambiente ( $T_a \pm 0,5$ ) °C: 26,0

Presión ambiente ( $P \pm 0,05$ ) mmHg: 709,46

\*: Encendido del sistema de enfriamiento.

\*\* : Apagado del sistema de enfriamiento.

## APÉNDICE B

### CÁLCULOS TÍPICOS

A continuación se presentan los diversos modelos matemáticos empleados a lo largo del desarrollo de esta investigación, tanto en la fase experimental como en la fase de diseño. Específicamente, se mostrarán las ecuaciones utilizadas sustituidas y el cálculo de la incertidumbre de la medida en los casos que sea necesario.

#### B.1. Determinación de la densidad del aducto.

La densidad de los aductos se determina a partir de la ecuación 3.4, presentada en la sección 3.2.1, según la NORMA ASTM D-1475-98:

$$\rho = \frac{M - m}{Vol}$$

El error asociado al cálculo, obtenido por derivadas parciales es:

$$\Delta\rho = \left| \frac{\partial\rho}{\partial M} \right| \Delta M + \left| \frac{\partial\rho}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial\rho}{\partial Vol} \right| \Delta Vol$$

$$\Delta\rho = \frac{\Delta M}{Vol} + \frac{\Delta m}{Vol} \tag{B.1}$$

La densidad del aducto asociado a las mediciones tomadas para la primera réplica del ensayo N°8 correspondiente a la amina alifática se presenta a continuación:

$$\rho = \frac{220,0g - 136,2g}{83,3mL} = 1,00720288 \text{ g/mL}$$

Y el error es:

$$\Delta\rho = \left| \frac{0,01g}{83,3mL} \right| + \left| -\frac{0,01g}{83,3mL} \right| = 0,00240096 \text{ g/mL}$$

Finalmente el resultado es:

$$\rho = (1,007 \pm 0,002) \text{ g/mL}$$

### B.2. Determinación del porcentaje de sólidos no volátiles.

El porcentaje de sólidos no volátiles, por el método de la estufa, de los aductos se determina a partir de la ecuación 3.5, presentadas en el Capítulo III según la NORMA ASTM D-2369-07, esto es:

$$V_A = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} * 100$$

El error asociado al cálculo, obtenido por derivadas parciales es:

$$\Delta V_A = \left| \frac{\partial V_A}{\partial W_3} \right| \Delta W_3 + \left| \frac{\partial V_A}{\partial W_1} \right| \Delta W_1 + \left| \frac{\partial V_A}{\partial W_2} \right| \Delta W_2$$

$$\Delta V_A = \left| \frac{100}{W_2 - W_1} \right| \Delta W_3 + \left| \frac{-100}{W_2 - W_1} \right| \Delta W_1 + \left| \frac{-100 * (W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1)^2} \right| \Delta W_2 \quad (B.2)$$

El porcentaje de sólidos no volátiles con respecto a las mediciones tomadas para la primera réplica del ensayo N°8 del aducto de amina alifática es:

$$V_A = \frac{0,8g - 0,2g}{1,0g - 0,2g} * 100 = 75,00\%$$

$$\Delta V_A = \left| \frac{100}{1,0g - 0,2g} \right| \Delta 0,1g + \left| \frac{-100}{1,0g - 0,2g} \right| \Delta 0,1g + \left| \frac{-100 * (0,8g - 0,2g)}{(1,0g - 0,2g)^2} \right| \Delta 0,1g = 34,4\%$$

Siendo el resultado final:

$$V_A = (75 \pm 34)\%$$

### B.3. Determinación de la Viscosidad del aducto por el método de copa Zahn.

La viscosidad de los aductos se determina a partir de la ecuación 3.3, presentada en el Capítulo III según la NORMA ASTM D-4212-99, esto es:

$$\mu = Vc * \rho$$

Donde:

$$V_c = 23,56 * t - (744 / t)$$

El error asociado al cálculo, obtenido por derivadas parciales es:

$$\Delta V_c = \left| \frac{\partial V_c}{\partial t} \right| \Delta t$$

$$\Delta V_c = \left| 23,56 - (744 / t^2) \right| \Delta t \quad (B.3)$$

$$\Delta \mu = \left| \frac{\partial \mu}{\partial V_c} \right| \Delta V_c + \left| \frac{\partial \mu}{\partial \rho} \right| \Delta \rho$$

$$\Delta \mu = |\rho| \Delta V_c + |V_c| \Delta \rho \quad (B.4)$$

La viscosidad cinemática del aducto de amina alifática, con respecto a las mediciones tomadas para la primera réplica del ensayo N°8 es:

$$V_c = 23,56 * 318,63 - (744 / 318,63) = 7511,579442 \text{cS}$$

$$\Delta V_c = \left| 23,56 - (744 / (318,63 \text{s})^2) \right| * 0,01 \text{s} = 0,235673 \text{cS}$$

$$V_c = (7511,6 \pm 0,2) \text{cS}$$

Finalmente la viscosidad dinámica es igual a:

$$\mu = 7511,6 \text{cS} * 1,007 \text{g/mL} = 7565,684456 \text{cp}$$

$$\Delta \mu = |1,007 \text{g/mL}| * 0,2 + |7511,6 \text{cS}| * 0,002 = 18,27238 \text{cp}$$

$$\mu = (7566 \pm 18) \text{cP}$$

#### B.4. Funcionabilidad del aducto.

La funcionabilidad de los aductos se determina a partir de la ecuación 3.6, presentada en el Capítulo III según el procedimiento establecido por Air Products (2000), esto es:

$$\text{pHr} = \frac{P_{\text{eq}_{\text{Aducto}}}}{P_{\text{eq}_{\text{Resina}}}} * 100$$

Donde:

$$Peq_{Aducto} = \frac{m_{aducto}}{\frac{m_{amina}}{Peq_{amina}} + \frac{m_{resina}}{Peq_{resina}}}$$

El peso equivalente correspondiente al aducto de amina alifática es igual a:

$$Peq_{Aducto} = \frac{500,00g}{\frac{130,00g}{27,00g/eq} + \frac{345,00g}{245,00g/eq}} = 146,77g$$

La funcionabilidad correspondiente al aducto de amina alifática es:

$$pHr = \frac{146,77g/eq}{188,00g/eq} * 100 = 78,07\%$$

### B.5. Determinación de la viscosidad promedio para cada tratamiento.

La viscosidad promedio en cada uno de los tratamientos se emplea para el estudio estadístico, inicialmente en la representación de los factores y sus niveles respectivos. La viscosidad promedio está representada por la siguiente ecuación:

$$v_p = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (B.5)$$

Tomando en cuenta los valores para el tratamiento número ocho del aducto de amina alifática reportados en la Tabla 4.8 y sustituyendo en la ecuación anterior se tiene que:

$$u_p = \frac{7512cps + 7183cps + 7181cps}{3} = 7292cP$$

El error asociado a este cálculo será:

$$\Delta v_p = \left| \frac{\partial v_p}{\partial v_1} \right| \Delta v_1 + \left| \frac{\partial v_p}{\partial v_2} \right| \Delta v_2 + \left| \frac{\partial v_p}{\partial v_3} \right| \Delta v_3$$

Derivando parcialmente se obtiene el siguiente modelo matemático:

$$\Delta v_p = \left| \frac{1}{n} \right| \Delta v_1 + \left| \frac{1}{n} \right| \Delta v_2 + \left| \frac{1}{n} \right| \Delta v_3 \quad (\text{B.6})$$

Sustituyendo los valores antes calculados se tiene:

$$\Delta v_p = \left| \frac{1}{3} \right| * 18 + \left| \frac{1}{3} \right| * 17 + \left| \frac{1}{3} \right| * 17 = 17,333333 \cong 17$$

Ahora bien el valor de la viscosidad promedio es:

$$u_p = (7292 \pm 17) \text{cP}$$

Para el resto de los tratamientos se hizo de manera similar obteniendo los resultados reportados en las Figuras 4.8 y 4.9 para el caso del aducto de amina alifática y de amina cicloalifática respectivamente.

### **B.6. Determinación de la suma de las variables de respuesta en cada tratamiento.**

La suma de las variables en cada uno de los tratamientos se calcula para la posterior determinación de los contrastes en el análisis estadístico y los efectos asociados:

$$tv = \sum_{i=1}^n v_i \quad (\text{B.7})$$

Tomando en cuenta los valores para el tratamiento número ocho del aducto de amina alifática reportados en la Tabla 4.8 y la nomenclatura expresada en el Capítulo III, se sustituye en la ecuación anterior y se obtiene que:

$$tv = 7512\text{cps} + 7183\text{cps} + 7181\text{cps} = 21876\text{cps}$$

El error asociado a este cálculo será:

$$\Delta tv = \left| \frac{\partial tv}{\partial v_1} \right| \Delta v_1 + \left| \frac{\partial tv}{\partial v_2} \right| \Delta v_2 + \left| \frac{\partial tv}{\partial v_3} \right| \Delta v_3$$

Derivando parcialmente se obtiene el siguiente modelo matemático:

$$\Delta tv = |1|\Delta v_1 + |1|\Delta v_2 + |1|\Delta v_3 \quad (\text{B.8})$$

Sustituyendo los valores antes calculados se tiene:

$$\Delta tv = |1| * 18 + |1| * 17 + |1| * 17 = 52$$

Finalmente el resultado es:

$$tv = (21876 \pm 52) \text{ cP}$$

De igual manera se hizo para los otros tratamientos, obteniendo los siguientes resultados:

Para el aducto de aminas alifáticas:

- **(1)**: 25645 cP
- **(s)**: 22170 cP
- **(t)**: 23529 cP
- **(v)**: 20472 cP
- **(st)**: 21883 cP
- **(sv)**: 29964 cP
- **(stv)**: 26348 cP

Para el aducto de aminas cicloalifáticas:

- **(1)**: 12314 cP
- **(s)**: 16569 cP
- **(t)**: 13138 cP
- **(v)**: 9335 cP
- **(st)**: 29683 cP
- **(st)**: 21719 cP
- **(tv)**: 14344 cP
- **(stv)**: 19913 cP

## B.7. Análisis de varianza.

**B.7.1.** *Determinación de los contrastes asociados a cada uno de los factores e interacciones.*

Los contrastes se determinaron como se indicó en el Capítulo III y considerando los resultados reportados en la sección anterior. Sustituyendo en las ecuaciones

presentadas en la Tabla 3.1 se tiene que, para el caso del factor **S** del aducto de amina alifática:

$$S = (22170 + 29964 + 26348 + 21883) \text{ cps} - (25645 + 20472 + 21876 + 23529) \text{ cps} = 8844 \text{ cps}$$

El resto de los resultados fueron obtenidos siguiendo los procedimientos antes descritos y se presentan a continuación:

Para el aducto de aminas alifáticas:

- **S:** 8844 cP
- **T:** -4614 cP
- **V:** 5434 cP
- **ST:** -3191 cP
- **SV:** 19086 cP
- **TV:** 191 cP
- **STV:** -6849 cP

Para el aducto de aminas cicloalifáticas:

- **S:** 38752 cP
- **T:** 17141 cP
- **V:** -6393 cP
- **ST:** 5476 cP
- **SV:** -2846 cP
- **TV:** -10737 cP
- **STV:** -19105 cP

### **B.7.2.** *Determinación de los efectos asociados a cada uno de los factores e interacciones.*

Los efectos se calcularon tomando en cuenta la ecuación 3.10 y los contrastes antes mostrados. Para el caso del factor **S** del aducto de amina alifática se tiene:

$$\text{Efecto} = \frac{(8844\text{cps})}{2^{3-1} * 3} = 737\text{cP}$$

Con respecto a los otros efectos se procedió de la misma manera y los resultados se muestran a continuación:

Para el aducto de aminas alifáticas se tienen los efectos asociados a:

- **S:** 737 cP
- **T:** -385 cP
- **V:** 453 cP
- **ST:** -266 cP
- **SV:** 1590 cP
- **TV:** 16 cP
- **STV:** -571 cP

Para el aducto de aminas cicloalifáticas se tienen los efectos asociados a::

- **S:** 3229 cP
- **T:** 1428 cP
- **V:** -533 Cp
- **ST:** 456 cP
- **SV:** -237 cP
- **TV:** -895 cP
- **STV:** -1592 cP

**B.7.3** *Determinación de la suma de cuadrado para cada uno de los factores e interacciones, total y del error.*

Según la ecuación 3.11 se determina la suma de cuadrados para cada uno de los factores e interacciones, ahora bien la suma de cuadrados para el factor **S** es:

$$SS_S = \frac{(8844)^2}{2^3 * 3} = 3258649,38$$

Los resultados asociados a los otros factores e interacciones para ambos aductos se pueden observar en las Tablas 4.10 y 4.11.

Por otro lado empleando la ecuación 3.12 se calcula la suma de los cuadrados total para cada aducto, en el caso del aducto de amina alifática se tiene:

$$SS_T = (8653^2 + \dots + 7181^2) - \frac{(8653 + \dots + 7181)^2}{2 * 2 * 2 * 3} = 31727301,59$$

Es importante señalar que para este cálculo se consideran todos los valores obtenidos según el diseño experimental para todos los tratamientos y sus respectivas réplicas de cada uno de los aductos estudiados. En la ecuación antes mostrada se ve reflejado el primer resultado de la primera réplica del tratamiento número uno y el último valor de la

última réplica del tratamiento número ocho siendo los extremos de todos los valores obtenidos y considerados también para el cálculo.

Con estos valores se puede calcular la suma de cuadrados asociado al error, parámetro importante para el análisis de varianza, tomando en cuenta la ecuación 3.13 y sustituyendo los valores respectivos para el aducto de amina alifática se tiene:

$$SS_E = 3172730159 - 325864938 - 88706917 - 123014213 - 42438249 - 1517804694... \\ \dots - 152225 - 195433446 = 879315477$$

Los resultados asociados al aducto de amina cicloalifática se encuentran en la Tabla 4.11.

Siguiendo con los cálculos asociados al análisis estadístico se obtiene la media de cuadrados empleando la ecuación 3.14, esto considerando los grados de libertad los cuales se obtienen de la siguiente manera para todos los factores principales y sus interacciones:

$$GLS = a - 1 \quad (B.9) \quad GLTV = (b - 1)(c - 1) \quad (B.14)$$

$$GLT = b - 1 \quad (B.10) \quad GLSTV = (a - 1)(b - 1)(c - 1) \quad (B.15)$$

$$GLV = c - 1 \quad (B.11) \quad GLError = a*b*c*(n - 1) \quad (B.16)$$

$$GLST = (a - 1)(b - 1) \quad (B.12) \quad GLTotal = a*b*c*n - 1 \quad (B.17)$$

$$GLSV = (a - 1)(c - 1) \quad (B.13)$$

Siendo a, b y c las variables establecidas en el Capítulo III.

Ahora bien considerando el ejemplo anterior se tiene que:

$$MS_s = \frac{3258649,38}{(2 - 1)} = 3258649,38$$

Los resultados asociados a los otros factores e interacciones para ambos aductos tanto de los grados de libertad como de la media de cuadrados, se pueden observar en las Tablas 4.10 y 4.11.

Finalmente se calcula el valor  $f_0$ , el cual se emplea para determinar la influencia o no de un factor o interacción, esto empleando la ecuación 3.15 es:

$$f_0 = \frac{3258649,38}{549572,17} = 5,93$$

### B.8. Diseño del proceso.

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor combinado del aducto se hizo uso de la ecuación 3.19 reportada en la sección 3.5, esto es:

$$\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right) = \frac{U * A * \theta}{M * C}$$

El error asociado al cálculo, obtenido por derivadas parciales es:

$$\Delta U = \left|\frac{\partial U}{\partial M}\right| \Delta M + \left|\frac{\partial U}{\partial C}\right| \Delta C + \left|\frac{\partial U}{\partial m}\right| \Delta m + \left|\frac{\partial U}{\partial A}\right| \Delta A + \left|\frac{\partial U}{\partial \theta}\right| \Delta \theta$$

$$\Delta U = |C * m| \Delta M + |M * C| \Delta m \quad (B.18)$$

El coeficiente global de transferencia de calor combinado para aducto de amina alifática del ensayo N° 8 de la primera réplica es:

$$U = 0,04292642 * 0,5g * 1,89088kJ/kg.K * 1000 = 40,584354W/m^2.K$$

$$\Delta U = |1,89088kJ/kg.K * 0,04292642| * 0,1g + |0,5g * 1,89088kJ/kg.k| * 0,0001 = 8,2114149W / m^2.K$$

$$U = (41 \pm 8)W/m^2.K$$

Dicho valor se determinó haciendo tomando en cuenta cada uno de los periodos de enfriamiento realizados en dicho ensayo. A partir de este valor se determinó el tiempo de enfriamiento requerido para el sistema a las condiciones seleccionadas. Este cálculo se realizó según los balances de masa necesarios para el diseño.

#### B.8.1. Determinación del volumen total del reactor.

El volumen total del reactor se determinó mediante la ecuación 3.22 presentada en el Capítulo III, esto es:

$$V_R = V_c + V_f$$

Donde:

$$V_c = \frac{\pi}{4} * D^2 * H$$

$$V_f = \frac{\pi}{6} * D^2 * H_f$$

El error asociado al cálculo, obtenido por derivadas parciales es:

$$\Delta V_f = \left| \frac{\partial V_f}{\partial D} \right| \Delta D + \left| \frac{\partial V_f}{\partial H} \right| \Delta H$$

$$\Delta V_f = \left| \frac{\pi}{3} * D * H \right| \Delta D + \left| \frac{\pi}{6} * D^2 \right| \Delta H \quad (B.19)$$

$$\Delta V_c = \left| \frac{\partial V_c}{\partial D} \right| \Delta D + \left| \frac{\partial V_c}{\partial H} \right| \Delta H$$

$$\Delta V_c = \left| \frac{\pi}{2} * D * H \right| \Delta D + \left| \frac{\pi}{4} * D^2 \right| \Delta H \quad (B.20)$$

$$\Delta V_R = \left| \frac{\partial V_R}{\partial V_c} \right| \Delta V_c + \left| \frac{\partial V_R}{\partial V_f} \right| \Delta V_f$$

$$\Delta V_R = \Delta V_c + \Delta V_f \quad (B.21)$$

Sustituyendo los datos correspondientes, se tiene que:

El volumen del fondo es:

$$V_f = \frac{\pi}{6} * (89\text{cm})^2 * 12,5\text{cm} * \frac{1}{1000} = 51,84282377\text{L}$$

$$\Delta V_f = \left| \frac{\pi}{3} * 89\text{cm} * 12,5\text{cm} \right| * 0,1\text{cm} + \left| \frac{\pi}{6} * (89\text{cm})^2 \right| * 0,1\text{cm} = 0,5312\text{L}$$

$$V_f = (51,8 \pm 0,5)\text{L}$$

El volumen de la parte cilíndrica es:

$$V_c = \frac{\pi}{4} * (89\text{cm})^2 * 79,8\text{cm} * \frac{1}{1000} = 496,4468804\text{L}$$

$$\Delta V_C = \left| \frac{\pi}{2} * 89\text{cm} * 79,8\text{cm} \right| * 0,1\text{cm} + \left| \frac{\pi}{4} * (89\text{cm})^2 \right| * 0,1\text{cm} = 1,7377\text{L}$$

$$V_C = (496 \pm 2)\text{L}$$

Finalmente el volumen total del reactor es:

$$V_R = 496\text{L} + 51,8\text{L} = 547,8\text{L}$$

$$\Delta V_R = 2\text{L} + 0,5\text{L} = 2,5\text{L}$$

$$V_R = (548 \pm 3)\text{L}$$

Para la determinación del volumen útil del reactor, se hizo uso de la siguiente expresión:

$$V_{\text{Útil}} = 0,7 * V_R \quad (\text{B.22})$$

El error asociado al cálculo, obtenido por derivadas parciales es:

$$\Delta V_{\text{Útil}} = \left| \frac{\partial V_{\text{Útil}}}{\partial V_R} \right| \Delta V_R$$

$$\Delta V_{\text{Útil}} = 0,7 * \Delta V_R \quad (\text{B.23})$$

Sustituyendo los datos correspondientes, se tiene que:

$$V_{\text{Útil}} = 0,7 * 548 = 383,6\text{L}$$

$$\Delta V_{\text{Útil}} = 0,7 * 3\text{L} = 2,1\text{L}$$

$$V_{\text{Útil}} = (383 \pm 2)\text{L}$$

### B.8.2. Determinación del tamaño de los lotes.

El tamaño de lotes se determinó mediante la ecuación 3.23 presentada en el Capítulo III, esto es:

$$M_{\text{lote}} = \rho_{\text{aducto}} * V_{\text{útil}}$$

El error asociado al cálculo, obtenido por derivadas parciales es:

$$\Delta M_{\text{lote}} = \left| \frac{\partial M_{\text{lote}}}{\partial \rho_{\text{aducto}}} \right| \Delta \rho_{\text{aducto}} + \left| \frac{\partial M_{\text{lote}}}{\partial V_{\text{útil}}} \right| \Delta V_{\text{útil}}$$

$$\Delta M_{\text{lote}} = |V_{\text{útil}}| \Delta \rho_{\text{aducto}} + |\rho_{\text{aducto}}| \Delta V_{\text{útil}} \quad (\text{B.24})$$

Sustituyendo los datos correspondientes, se tiene:

$$M_{\text{lote}} = 1,007 \text{g/mL} * 383 \text{L} = 385,681 \text{kg}$$

$$\Delta M_{\text{lote}} = |383 \text{L}| 0,002 \text{g/mL} + |1,007 \text{g/mL}| 2 \text{L} = 2,78 \text{kg}$$

$$M_{\text{lote}} = (386 \pm 3) \text{kg}$$

### B.8.3. Determinación del tiempo de enfriamiento durante la reacción.

Para el sistema de enfriamiento se utilizó el coeficiente global de transferencia de calor combinado, así como también el área de flujo en la chaqueta de enfriamiento, el tiempo de enfriamiento se determinó haciendo uso de la ecuación B.25 considerando mantener para el diseño del sistema el flujo másico de agua por la chaqueta obtenido experimentalmente, esto es:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_1}\right) * MC}{U * A} \quad (\text{B.25})$$

Para un enfriamiento desde 68°C hasta 65°C, considerando un flujo de agua isotérmico a 25°C debido al pequeño descenso de temperatura que se realiza, el tiempo de enfriamiento resulta:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{68^\circ \text{C} - 25^\circ \text{C}}{65^\circ \text{C} - 25^\circ \text{C}}\right) * 386 \text{kg} * 1890,88 \text{J/kg.K}}{41 \text{w/m}^2.\text{K} * 2,23 \text{m}^2} * \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} = 9,69 \text{min} \approx 10 \text{min}$$

Dicho cálculo se realizó para el aducto de amina alifática, lo mismo aplica para el aducto de amina cicloalifática.

**B.8.4. Determinación de la potencia eléctrica para el calentador por inmersión.**

La potencia eléctrica del calentador se determinó mediante la aplicación de un balance de energía. Se seleccionó el calentamiento de la amina alifática por ser el más crítico, éste se calienta desde la temperatura ambiente (25°C) hasta 35°C. Para ello se calculó el coeficiente global de transferencia de calor de la amina de la misma manera como se hizo para el aducto en el proceso de enfriamiento. Para ello se determinó previamente el tiempo de calentamiento de la amina con dicho calentador, esto es haciendo uso de la ecuación B.25.

El tiempo de calentamiento se determinó mediante los experimentos realizados a nivel de laboratorio a partir de una resistencia eléctrica externa con una temperatura en su superficie de 73 °C.

Sustituyendo todos los valores correspondientes considerando la confidencialidad en la formulación del aducto, el tiempo resulta:

$$t_c = 10381,5243s * \frac{1h}{3600s} = 2,8837h \approx 2,5h$$

Por diferencias entre el calentador por inmersión y la resistencia externa se fijó un tiempo de calentamiento de 2,5 h. Al aplicar la ecuación 3.25 para determinar la potencia del calentador con sus datos correspondientes, se tiene:

$$q = 1,0774kW$$

Dicho valor por recomendaciones del fabricante fue subdimensionado hasta 1,0 kW.

**B.8.5. Determinación del tiempo del ciclo.**

El tiempo de ciclo para el proceso de fabricación de aductos está determinado por los tiempos de duración en las siguientes etapas:

- Calentamiento de la amina dentro del reactor: 2,5 h.
- Síntesis del aducto de amina una vez comenzada la adición de la resina epóxica: 3 h.
- Reposo del producto final en el reactor para su posterior descarga: 3 h.

En dichas etapas se encuentran solapados los tiempos de enfriamiento realizados con la chaqueta ya que están incluidos en la etapa de síntesis del aductos. De esta manera se obtiene un tiempo total de ciclo igual a ocho horas y media para ambos aductos aproximadamente, se fijó por conveniencia nueve horas.

**B.8.6. Determinación de la velocidad y altura del agitador.**

A partir de los experimentos realizados a nivel de laboratorio, se procedió al escalamiento del agitador de manera de determinar la velocidad adecuada de agitación a partir de la utilizada experimentalmente. Se utilizó un agitador con un diámetro de 5 cm y una velocidad de 632 rpm.

Por otro lado a nivel de planta se seleccionó un diámetro de agitador de 25 cm ya que éste era el disponible en la empresa. Para determinar la velocidad adecuada de agitación en planta, se utilizó la ecuación 3.26 presentada en la sección 3.5 reportada por (Ludwing, 1967), esto es:

$$N_2 = 632\text{rpm} \left( \frac{25\text{cm}}{5\text{cm}} \right)^{-5/3} = 43,228\text{rpm}$$

Con respecto a la altura del agitador, está se determino a partir de las recomendaciones de la empresa, lo cual establecieron:

$$h_a = 0,25 * D_i \tag{B.26}$$

Donde  $D_i$  representa el diámetro interno del reactor. Sustituyendo los valores correspondientes, se tiene:

$$h_a = 0,25 * 89\text{cm} = 15,96\text{cm}$$

**B.8.7. Dimensionamiento de los tanques para el almacenamiento de agua y para la dosificación de resina.**

Para la determinación del diámetro y altura de los tanques primero se determinó el volumen de agua destinada para el enfriamiento del proceso, el cual se determina como la suma del volumen de la chaqueta y el del sistema de tuberías con 20% de sobrediseño para el cebado de la bomba centrífuga de manera de evitar que la misma cavite.

$$V_a = 1,2 * (V_{ch} + V_t) \tag{B.27}$$

Donde  $V_a$  es el volumen del tanque,  $V_{ch}$  es el volumen de la chaqueta y  $V_t$  es el volumen del sistema de tuberías. El volumen de la chaqueta se determina por medio de las dimensiones mostradas en la Figura 4.26, esto resulta un volumen igual a 96,67 L. Por otro lado, para determinar el volumen por las tuberías, fue necesario fijar un diámetro estandarizado para las mismas, dicha operación se determinó como fue explicado en el Capítulo III para el diámetro económico. Para ello primero se calculó el caudal de agua en las tuberías, esto es:

$$Q = \frac{m_{\text{p agua}}}{t_{p f}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} * \frac{1}{\rho} \tag{B.28}$$

Donde  $Q$  es el caudal de agua en  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $m_{\text{p agua}}$  es el flujo de agua promedio,  $t_{p f}$  es el tiempo de flujo promedio y  $\rho$  es la densidad del agua a  $25^\circ\text{C}$ . La densidad del agua a tal temperatura es igual a  $997,07 \text{ kg}/\text{m}^3$ , de tal manera que sustituyendo los datos correspondientes se tiene:

$$Q = \frac{793,53\text{kg}}{5,25\text{s}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}} * \frac{1}{997,07\text{kg}/\text{m}^3} = 1,5117 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,3215 \frac{\text{pie}^3}{\text{min}}$$

Al hacer uso del nomograma presentado en el Apéndice C, se obtuvo un diámetro económico de 1 pulg, por lo que se estableció un diámetro nominal igual a 1 pulg catálogo 40 para el diseño. Según este diámetro nominal, se tiene un diámetro interno y externo iguales a:

$$D_i = 0,02664\text{m}$$

$$D_o = 0,0334\text{m}$$

Se tomó una longitud de tubería igual a 12 metros por lo que el volumen ocupado por la tubería es:

$$V_T = \frac{\pi}{4} * (0,02664\text{m})^2 * 12\text{m} * \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} = 6,688\text{L}$$

Luego, el volumen total de agua destinada para el sistema de enfriamiento resulta:

$$V_a = 1,2 * (96,67\text{L} + 6,688\text{L}) = 124,02\text{L}$$

Una vez determinado el volumen de agua, se calcularon sus dimensiones, estos es, haciendo uso de la ecuación 3.28 presentada en el Capítulo III para el volumen de agua determinado previamente:

$$D = H = \sqrt[3]{\frac{4 * 124,02\text{L} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}}}{\pi}} = 54,052\text{cm}$$

Se dimensionó el tanque con el 30% de sobredimensionamiento resultando un diámetro y una altura de 70 cm.

Con respecto al tanque de dosificación de la resina, se calcularon los volúmenes correspondientes para la resina presente en cada aducto, a partir de los balances de masa respectivos, resultando como volumen crítico el asociado a la resina para la preparación del aducto de amina alifática, esto es, un volumen igual a 70,24 L.

A partir de este resultado, tomando de igual forma un 30% de sobredimensionamiento, la altura y diámetro del tanque resulta de 91cm.

#### B.8.8. Caudal de dosificación de la resina.

El caudal de dosificación de la resina se determinó a partir del volumen total a adicionar para la reacción. El volumen de resina correspondiente a la preparación del aducto de amina alifática es el mostrado anteriormente y el asociado al aducto de amina cicloalifática es igual a 47,80 L.

Por otro lado gracias a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y a partir de las condiciones más adecuadas fijadas en esta investigación, se fijó como tiempo de dosificación de la resina correspondiente al aducto de amina alifática igual a 79 min y el asociado al aducto de amina cicloalifática un tiempo igual a 48 min. A partir de estos datos el caudal de dosificación se determina haciendo uso de la ecuación (B.29):

$$Q_R = \frac{V_R}{t_D} * \frac{1\text{min}}{60\text{s}} \quad (\text{B.29})$$

Donde  $Q_{RA}$  es el caudal de la resina,  $V_R$  el volumen de la resina y  $t_D$  el tiempo de dosificación de la resina. De esta manera se obtiene los siguientes resultados para ambas resinas:

$$Q_{RA} = \frac{70,24\text{L}}{79\text{min}} * \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 3,45 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$Q_{RC} = \frac{47,80\text{L}}{48\text{min}} * \frac{1\text{min}}{60\text{s}} = 1,76 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

#### B.8.9. Determinación de la potencia de la bomba centrífuga.

Para el cálculo de la potencia de la bomba inicialmente se hizo uso de la ecuación 3.30 presentada en el Capítulo III correspondiente al cabezal de la bomba. Para ello se calculó la velocidad en la descarga a través de la siguiente ecuación de continuidad (Silva, 2001), esto es:

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \rho * v_2 * A_f \quad (\text{B.30})$$

Donde:  $v_2$  es la velocidad a en la descarga y  $A_f$  el área de flujo. Sustituyendo los datos correspondientes, se tiene que la velocidad en la descarga es igual a:

$$v_2 = \frac{4 * 0,1513\text{kg/s}}{997,07\text{kg/m}^3 * \pi * (0,02664\text{m})^2} = 0,2722\text{m/s}$$

Luego, las pérdidas por tuberías y accesorios totales se determinaron como la suma de las pérdidas por las tuberías más las pérdidas por la chaqueta. Cada una de las pérdidas se obtuvo a partir de la ecuación 3.31 presentada en el Capítulo III. Para ello primero se determinó en número de Reynolds de manera de poder obtener el factor de Darcy y por medio del diagrama de Moody, como se explicó en el Capítulo III, obtener la rugosidad relativa, luego haciendo uso de la ecuación 3.32 reportada en la sección 3.5 se tiene:

$$\text{Re} = \frac{997,07\text{kg/m}^3 * 0,2722\text{m/s} * 0,02664\text{m}}{0,894\text{cp} * \frac{1\text{kg/m.s}}{1000\text{cp}}} = 8090,06934$$

Por lo tanto la rugosidad relativa es igual a 0,0015, y el factor de Darcy es igual a 0,0344. Posteriormente, una vez realizada la distribución final de los equipos para el diseño, se obtuvo una longitud de tubería en el circuito de enfriamiento igual a 12,8 metros, donde se involucraron la longitud de todas las tuberías tomando en cuenta cada una de los accesorios utilizados. La tabla B.1 muestra cada uno de los accesorios necesarios para el diseño del equipo correspondiente al circuito de enfriamiento, con sus respectivas longitudes equivalentes y coeficientes de pérdidas.

**Tabla B.1. Coeficiente de pérdidas y longitud equivalente de diferentes accesorios utilizados en el circuito de enfriamiento.**

Accesorios	Cantidad	Coeficiente de pérdida (K) adim	Longitud equivalente (L <sub>e</sub> /D) adim
Válvula de compuerta	1	-	160
Codo	6	-	30
Entrada	1	0,5	-
Sumatoria	-	0,5	340

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 3.31, se tiene:

$$h_{L,acc} = \left[ 0,5 + \left( \frac{12,8m}{0,02664m} + 340 \right) * 0,0344 \right] * \frac{(0,2722m/s)^2}{2 * \left( 9,8 \frac{m}{s^2} \right)} = 1,1713m$$

Para las pérdidas por la chaqueta, se tiene que el área de flujo es igual a:

$$A_{fCH} = \frac{\pi}{4} * (D_2^2 - D_1^2) \quad (B.31)$$

Donde: **D<sub>2</sub>** diámetro externo de la chaqueta, **D<sub>1</sub>** diámetro interno de la chaqueta, por lo que el área de flujo resulta:

$$A_{fCH} = \frac{\pi}{4} * ((100,4cm)^2 - (92,4cm)^2) * \frac{1m^2}{(100cm)^2} = 0,1211m^2$$

Luego, la velocidad de flujo por la chaqueta viene dada por:

$$v_{CH} = \frac{0,1513kg/s}{997,07kg/m^3 * 0,1211m^2} = 0,0012m/s$$

El diámetro de flujo por la chaqueta viene dado por siguiente ecuación:

$$D_{CH} = D_2 - D_1 \quad (B.32)$$

Donde:  $D_{CH}$  es el diámetro de la chaqueta, por lo que sustituyendo los datos correspondientes, se tiene:

$$D_{CH} = (100,4\text{cm} - 92,4\text{cm}) \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} = 0,08\text{m}$$

Una vez determinado el diámetro de la chaqueta se calculó el número de Reynolds, esto es:

$$Re = \frac{997,07\text{kg/m}^3 * 0,0012\text{m/s} * 0,08\text{m}}{0,894\text{cp} * \frac{1\text{kg/m.s}}{1000\text{cp}}} = 111,784$$

Con dichos valores, se obtiene de manera gráfica que la rugosidad relativa es igual a 0,00056 y el factor de Darcy 0,1. Con respecto a la longitud de tubería para el cálculo de pérdidas, se tiene que es igual a la longitud de la chaqueta, esto es 0,798 m. Los accesorios utilizados para la sección de la chaqueta de enfriamiento fue una entrada y una salida, esto se muestran con sus respectivas características en la Tabla B.2 a continuación.

**Tabla B.2. Coeficiente de pérdidas y de los diferentes accesorios utilizados en la chaqueta de enfriamiento.**

Accesorios	Cantidad	Coeficiente de pérdida (K) adim
Salida	1	1
Entrada	1	0,78
Sumatoria	-	1,78

Por lo tanto las pérdidas por la chaqueta son:

$$h_{L,acc} = \left[ 1,78 + \left( \frac{0,798\text{m}}{0,08\text{m}} \right) * 0,1 \right] * \frac{(0,0012\text{m/s})^2}{2 * \left( 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} = 2,0001\text{E} - 07\text{m} \approx 0\text{m}$$

Esto indica que las pérdidas totales para el diseño corresponden únicamente a las pérdidas por el circuito de enfriamiento.

De esta manera, el cabezal requerido por la bomba es igual:

$$H_{\text{req}} = \frac{(0,2722\text{m/s})^2}{2 * \left(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} - 1,1713\text{m} = 1,1750\text{m}$$

Finalmente la potencia de la bomba viene dada por la ecuación 3.33 presentada en el Capítulo III, asumiendo una eficiencia para la bomba de 0,75; esto es:

$$P = \frac{1,1750\text{m} * 1,5117 * 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 997,07 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}}{76 * 0,76} = 0,00312\text{hp} \equiv \frac{1}{2}\text{hp}$$

## B.9. Cálculos relacionados con la evaluación económica.

### B.9.1. Flujos monetarios.

Según lo reportado en la metodología los activos fijos intangibles están comprendidos por el costo de los equipos principales, la mayoría de los mismos ya están adquiridos por la empresa y se pretenden destinar para la aplicación de este proyecto, sin embargo se investigó el costo de un tanque de acero inoxidable para fluidos orgánicos que se podría utilizar para el almacenamiento de la resina epóxica y es necesario su adquisición ya que dicha empresa no posee este equipo así como también las tuberías y accesorios.

Por otro lado se investigó el precio de todos los equipos actuales a pesar que no fueran ser adquiridos, para determinar el costo de la instalación de los mismos, el cual es una función del total de los costos. Todos estos costos se presentan en las Tablas B.3 y B.4:

**Tabla B.3. Costos de los equipos principales.**

Equipo	Costo (\$)
Reac.-Mezc. (Con motor)	23251,81
Calentador por inmersión	152,93
Tanque de agua	2325,58
Tanque de resina	8100
Bomba centrífuga	81,16

**Tabla B.4. Cantidad y costo por unidad de los accesorios y tuberías.**

Accesorio	Cantidad	Costo (\$/unidad)
Válvulas de compuerta	2	26,95
Codo	8	2,32
Entrada	1	6,89
Metro de tubería	12	4,65
Salida	3	6,89

Ahora bien los activos fijos tangibles se obtienen empleando la ecuación 3.39 y considerando lo anteriormente dicho el resultado es:

$$AFT = 8100\$ + 23251,82\$ + 152,93 + 2325,58 + 81,16 + 2 * 26,95\$ + 8 * 2,32\$ + 6,89\$ + \dots \\ \dots + 12 * 4,65\$ + 3 * 6,89\$ = 34067,31\$$$

Siguiendo con la evaluación económica se tiene la instalación de los equipos, la cual está contemplada dentro de los activos fijos intangibles, cabe destacar que para este cálculo se consideró el total de los precios de todos los equipos principales, esto es:

$$I_{Eq} = \frac{30}{100} * (23251,81 + 152,93 + 2325,58 + 8100 + 81,16)\$ = 10173,44\$$$

Los imprevistos, los cuales se consideran activos intangibles, se obtienen según 3.42:

$$I = \frac{5}{100} * (34067,3098\$ + 10713,44\$) = 2212,04\$$$

Ahora bien los activos fijos intangibles, según 3.40 son:

$$AFI = (10173,44\$ + 2212,038\$) = 12385,48\$$$

Considerando los activos fijos intangibles y los tangibles se puede obtener el capital fijo según 3.38, esto es:

$$CF = 34067,31\$ + 12385,48\$ = 46452,79\$$$

Por otro lado para obtener la inversión inicial se resuelve un sistema de ecuaciones entre la ecuación número 3.37 y 3.43, luego los resultados son:

$$II = 54650,34\$$$

$$CT = 8197,551\$$$

Una vez obtenido esto, se sabe que el flujo monetario en el año cero según la ecuación 3.34 es:

$$F_0 = 54650,34\$$$

Con respecto a los flujos monetarios para los años posteriores a la instalación del proyecto es necesario considerar los ingresos brutos los cuales se obtienen según la ecuación 3.44, y el resultado es anual considerando los valores reportados en la Tabla 4.29 y los precios por kilogramo de producto final reportado en la Tabla B.5. Para el aducto de amina alifática se tiene:

$$IB_i = 33,27 \frac{\$}{Kg} * 14403,84Kg = 479215,76\$$$

Los demás resultados se presentan en la Tabla 4.29 para ambos aductos.

**Tabla B.5. Costo del producto final por kilogramo del mismo.**

Producto	Costo por kilogramo (\$/Kg)
Immerkote®	33,27
Immerlux®	36,13

Otro aspecto importante son los costos operacionales, los cuales están clasificados de diferentes maneras, a continuación se muestra un ejemplo de cálculo para cada uno de estos:

- **Costos por materia prima:** el ejemplo del cálculo para el costo de la materia prima no se puede colocar por lo mencionado anteriormente con respecto a la confidencialidad de la empresa, sin embargo para este cálculo se considera la producción anual presentada en la Tabla 4.29 y los precios de materia prima presentados en la Tabla B.6, a continuación se presenta el resultado para el aducto de amina alifática en el primer año de vida del proyecto:

$$C_{mp} = 153789,79\$$$

- **Costos por envasado y etiquetado:** según la ecuación 3.46, los datos presentados en la Tabla B.7. y la producción anual presentada en la Tabla 4.29 se obtiene el costo por envasado y etiquetado para el primer año de venta del aducto de amina alifática, esto es:

$$C_{en-et} = \frac{14403,84\text{Kg}}{3,71184\text{Kg}} * (2 * 1,02\$ + 2 * 0,56\$) = 12262,42\$$$

Ahora bien en las Tablas 4.30 y 4.31 se presentan los costos de materia prima total de la fabricación de ambos aductos por año, para todos los años del proyecto asociado a la suma de estos dos valores como se muestra a continuación:

$$C_{MP_{total}} = C_{mp} + C_{en-et} \quad (B.33)$$

Sustituyendo los valores obtenidos se consigue finalmente éste valor:

$$C_{MP_{total}} = 153789,79\$ + 12262,42\$ = 166052,22\$$$

**Tabla B.6. Costos de toda la materia prima empleada en esta investigación.**

Producto	Costo por kilogramo (\$/Kg)
Resina	11,4
Amina alifática	9
Amina cicloalifática	12,3
Diluyente reactivo	9,42

**Tabla B.7. Características en el envasado y etiquetado de los aductos.**

Número de envases y etiquetas empleados para Immerkote®	2
Número de envases y etiquetas empleados para Immerlux®	3
Cantidad aproximada de aducto de amina presente en Immerkote® (Kg)	3,71
Cantidad aproximada de aducto de amina presente en Immerlux® (Kg)	7,71

- **Costos por mano de obra:** los costos por mano de obra se obtienen con la ecuación 3.47 considerando que el sueldo básico mensual para este año 2008 es igual a 800 Bsf ó \$ 372,09, el tiempo de lote establecido en el Capítulo IV y el número de lote se puede obtener con la ecuación 3.24 para cada año, finalmente para el año 2009 y el aducto de amina alifática, el resultado es el siguiente:

$$C_{mo} = \frac{372,09 * 12meses}{1872h/año} * 1,77 * 8,5 * 37 = 1261,91\$$$

El resto de los resultados correspondientes a todos los años de vida del proyecto se presentan en la Tabla 4.30 y 4.31 para los diferentes aductos.

- **Costos por mantenimiento:** según la ecuación 3.48 y el valor para el capital fijo antes obtenido se tiene el siguiente resultado:

$$C_{\text{man}} = \frac{6,5}{100} * 46452,79\$ = 3019,43\$$$

- **Costos por materiales de consumo:** empleando la ecuación 3.49 y tomando en cuenta el resultado anterior se tiene:

$$C_{\text{mat}} = \frac{15}{100} * 3019,43\$ = 452,91\$$$

Estos últimos dos valores se mantienen fijos a lo largo de todos los años del proyecto y se pueden observar en las Tablas 4.30 y 4.31.

- **Costos por servicios:** el costo por servicios viene dada por el costo del agua empleada más el costo de la energía gastada, para lo cuál se mantuvo constante el costo de agua y de energía actuales; según la ecuación 3.51 se obtiene los costos por agua para el aducto de amina alifática, esto es:

$$C_{\text{Agua}} = 122\text{Kg} * 37 * 0,000339 \$ / \text{Kg} = 1,55\$$$

Donde la masa de agua en cada lote se determinó según los balances de masa. Los costos asociados al agua y a la electricidad se pueden observar en la Tabla B.8.

El costo por energía se obtiene empleando la ecuación 3.52 y tomando en cuenta los valores reportados en las Tablas B.8 y B.9. El resultado es el siguiente:

$$C_{\text{Energía}} = 188,67\text{Kw} - \text{h} * 37 * 0,0605 \$ / \text{Kw} - \text{h} = 427,01\$$$

**Tabla B.8. Costos de los servicios.**

Agua (\$/Kg)	0,000339
Energía (\$/Kw-h)	0,0605

**Tabla B.9. Energía consumida por los equipos eléctricos.**

Fuente de consumo	Energía
Calentador del reactor	0,43
Bomba centrífuga	0,37
Sistema de agitación	187,87
<b>Total</b>	<b>188,67</b>

Los valores presentados en la Tabla B.9 se determinan según el balance de energía. Finalmente se puede obtener el costo total de los servicios asociados con la fabricación del aducto de amina alifática para el primer año de vida del proyecto, esto según la ecuación 3.50:

$$C_{\text{Ser}} = 1,55\$ + 427,01\$ = 428,56\$$$

De la misma manera se realiza para el resto de los años y los resultados se encuentran en la Tabla 4.30 y 4.31.

- **Costos por seguros:** según la ecuación 3.53 y el valor del capital fijo se tiene que:

$$C_{\text{seg}} = \frac{1}{100} * 46452,79\$ = 464,53\$$$

- **Costos de ventas:** según la ecuación 3.54 y el valor del ingreso bruto antes calculado para el caso del aducto de amina alifática y el primer año, se tiene que:

$$C_{\text{ven}} = \frac{8}{100} * 479215,76\$ = 38337,26\$$$

Todos estos resultados se pueden observar en las Tablas 4.30 y 4.31 para ambos aductos.

- **Costos administrativos:** según la ecuación 3.55 y el valor del ingreso bruto antes calculado se tiene para el primer año del aducto amina alifática:

$$C_{\text{adm}} = \frac{2,5}{100} * 479215,76\$ = 11980,39\$$$

- **Costos por investigación y desarrollo:** se calcula considerando lo mismo que en el cálculo anterior y según la ecuación 3.56.

$$C_{\text{inv}} = \frac{1,5}{100} * 479215,76\$ = 7188,24\$$$

Finalmente los costos operativos se obtienen a partir de la ecuación 3.57 y considerando todos estos resultados lo que se muestra a continuación:

$$C_{\text{op}} = 16605222\$ + 126191\$ + 3019,4\$ + 452,91\$ + 428,56\$ + 464,53\$ + 38337,26\$ + 11980,39\$ + 7188,24\$$$

$$C_{\text{op}_1} = 228756,89\$$$

Una vez calculados estos valores se tiene otro punto importante para el cálculo de los flujos monetarios esto es el impuesto sobre la renta respectivo a cada año, para lo cual se debe obtener el ingreso neto grabable el cual depende entre otras variables de la depreciación de los activos fijos, esto según la ecuación 3.60 es lo siguiente:

$$D = \left( \frac{23251,81 - 2325,181}{12} \right) \$ + \left( \frac{152,93 - 15293}{10} \right) \$ + \left( \frac{2325,58 - 232,558}{10} \right) \$ + \dots$$

$$\dots + \left( \frac{8100 - 810}{10} \right) \$ + \left( \frac{81,16 - 8,116}{10} \right) \$ + \left( \frac{155,83 - 15,583}{10} \right) \$ = 2713,63\$$$

Los valores residuales para cada uno de los equipos se estiman como el 10 % del costo inicial de los equipos según la ecuación 3.61 y se pueden observar en la Tabla 4.32, así como también la vida útil de cada uno de ellos. Para el cálculo anterior también se consideraron los costos de los equipos principales expuestos en la Tabla B.3.

También es necesario conocer la amortización de los activos fijos intangibles para lo cual se hace uso de la ecuación 3.62 considerando los valores presentes en la Tabla 4.33, esto es:

$$AAFI = \frac{12385,4817\$}{10} = 1238,55\$$$

El último término desconocido para el cálculo del ingreso neto grabable es el valor en libro, el cual se obtiene según la ecuación 3.63 considerando el costo de los equipos, la depreciación individual de cada uno de estos y el número de años de vida del proyecto finalmente se tiene:

$$V_{Lt} = (23251,81 - 1743,89 * 10)\$ + (152,93 - 13,76 * 10)\$ + (2325,58 - 209,30 * 10)\$ + \dots \\ \dots + (8100 - 729 * 10)\$ + (81,16 - 3,65 * 10)\$ + (155,83 - 14,02 * 10)\$ = 693102\$$$

Todos los valores considerados en este cálculo se encuentran reportados en la Tabla 4.32. Finalmente se obtiene el ingreso neto grabable lo cual según la ecuación 3.59 para el primer año del proyecto y el aducto de amina alifática es:

$$ING_1 = 479215,76\$ - 228756,89\$ - 2713,63\$ - 1238,55\$ = 246506,69\$$$

Lo cual en unidades tributarias resulta:

$$ING_1 = 11521,5UT$$

Con este valor se puede obtener el impuesto sobre la renta según la ecuación 3.58 como sigue:

$$ISR_1 = 34 * 11521,5UT - 500 = 3417,31UT$$

Lo cual es igual a:

$$ISR_1 = 73114,60\$$$

Todos estos valores se obtienen considerando el valor de la unidad tributaria igual a 46 BsF. y 1 \$ igual a 2,15 BsF. Los resultados asociados a los otros años para ambos aductos se encuentran en las Tablas 4.34 y 4.35.

Con estos resultados se pueden obtener los flujos monetarios para los años intermedios según la ecuación 3.35 y para el último año según la ecuación 3.36, esto es:

$$F_1 = 479215,76\$ - 228756,89\$ - 73114,60\$ = 177344,26\$$$

Y para el último año es:

$$F_{10} = 315989,06\$$$

El resto de los resultados se pueden observar en las Tablas 4.36 y 4.37.

### **B.9.2 Factibilidad económica.**

Sustituyendo los valores antes calculados en las ecuaciones 3.64, 3.65 y 3.66 se obtienen los siguientes resultados para el caso del aducto de amina alifática, estos resultados se pueden ver en la Tablas 4.38 y 4.39.

$$V_{\text{Actual}} = 1268943,34\$$$

$$E_{\text{Anual}} = 247278,989\$$$

$$ii_n = 333,99\%$$

## APÉNDICE C

### CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE TUBERÍA

A continuación se presentan los distintos modelos utilizados para la determinación de los factores empleados para el diseño del sistema de tubería, así como también sus dimensiones y capacidades.

Tamaño nominal de tubería pulg	Diámetro exterior cm	Núm. de catálogo	Espesor de pared cm	Diámetro interior cm	Área de la sección transversal de metal cm <sup>2</sup>	Área de la sección interior dm <sup>2</sup>	Circunferencia m, o superficie m <sup>2</sup> /m de longitud		Capacidad para la velocidad de 1 m/seg litros/min	Peso de tubería kg/m
							Exterior	Interior		
1/8	1,029	40	0,173	0,683	0,465	0,00372	0,0323	0,0215	2,198	0,36
		80	0,241	0,546	0,600	0,00232	0,0323	0,0172	1,403	0,46
1/4	1,372	40	0,224	0,925	0,806	0,00669	0,0430	0,0290	4,032	0,63
		80	0,302	0,767	1,013	0,00465	0,0430	0,0241	2,772	0,80
3/8	1,715	40	0,231	1,252	1,077	0,01236	0,0540	0,0393	7,387	0,85
		80	0,320	1,074	1,400	0,00910	0,0540	0,0338	5,436	1,10
1/2	2,134	40	0,277	1,580	1,613	0,01960	0,0671	0,0497	11,76	1,27
		80	0,373	1,387	2,065	0,01514	0,0671	0,0436	9,066	1,62
3/4	2,667	40	0,287	2,093	2,148	0,03447	0,0838	0,0658	20,64	1,68
		80	0,391	1,885	2,794	0,02787	0,0838	0,0391	16,74	2,19
1	3,340	40	0,338	2,664	3,187	0,05574	0,1049	0,0838	33,44	2,50
		80	0,455	2,431	4,123	0,04636	0,1049	0,0762	27,83	3,23
1 1/4	4,216	40	0,356	3,505	4,310	0,09662	0,1326	0,1100	57,89	3,38
		80	0,485	3,246	5,684	0,08277	0,1326	0,1021	49,65	4,47
1 1/2	4,826	40	0,368	4,089	5,161	0,13136	0,1515	0,1283	78,79	4,05
		80	0,508	3,810	6,897	0,11380	0,1515	0,1198	68,41	5,40
2	6,033	40	0,391	5,250	6,935	0,21646	0,1896	0,1649	129,9	5,43
		80	0,554	4,925	9,529	0,19045	0,1896	0,1548	114,3	7,47
2 1/2	7,303	40	0,516	6,271	10,99	0,30861	0,2295	0,2054	185,3	8,62
		80	0,701	5,900	14,54	0,27331	0,2295	0,1853	164,0	11,40
3	8,890	40	0,549	7,793	14,37	0,47658	0,2792	0,2448	286,2	11,28
		80	0,762	7,366	19,46	0,42613	0,2792	0,2313	255,7	15,25
3 1/2	10,16	40	0,574	9,012	17,29	0,63822	0,3191	0,2832	382,7	13,56
		80	0,808	8,545	23,73	0,57319	0,3191	0,2685	344,1	18,62
4	11,43	40	0,602	10,226	20,45	0,82124	0,3591	0,3213	492,8	16,06
		80	0,856	9,718	28,45	0,74190	0,3591	0,3054	445,0	22,29
5	14,13	40	0,655	12,819	27,74	1,29131	0,4438	0,4026	774,4	21,76
		80	0,953	12,225	39,42	1,1733	0,4438	0,3841	704,3	30,92
6	16,83	40	0,711	15,405	36,00	1,8636	0,5285	0,4840	1118	28,23
		80	1,097	14,633	54,19	1,6815	0,5285	0,4596	1009	42,52
8	21,91	40	0,818	20,272	54,17	3,2274	0,6882	0,6367	1937	42,49
		80	1,270	19,368	82,32	2,9459	0,6882	0,6084	1768	64,57
10	27,31	40	0,927	25,451	76,84	5,0863	0,8577	0,7986	3053	60,24
		80	1,509	24,287	122,3	4,5688	0,8577	0,7629	2780	95,84
12	32,39	40	1,031	30,323	101,6	7,2211	1,0174	0,9540	4333	79,71
		80	1,748	28,890	168,2	6,5550	1,0174	0,9083	3933	131,8

† Basadas en ANSI B36.10-1959, con autorización de ASME.

Figura C.1. Dimensiones, capacidades y pesos de tuberías normalizadas de acero.

Fuente: McCabe, Smith & Harriot (1991).

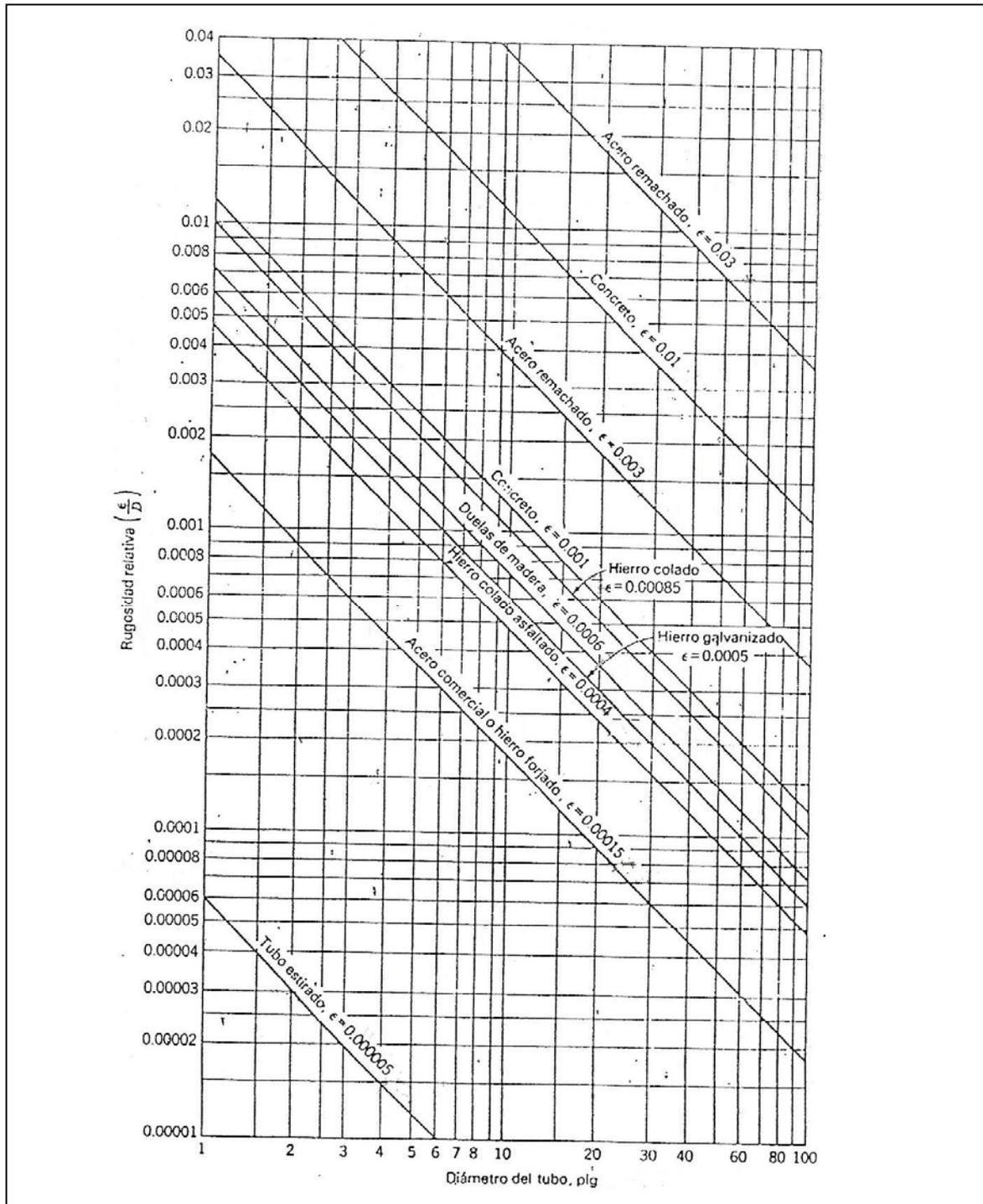


Figura C.2. Rugosidad relativa en función del diámetro para tubos de varios materiales.

Fuente: Moody (1944).

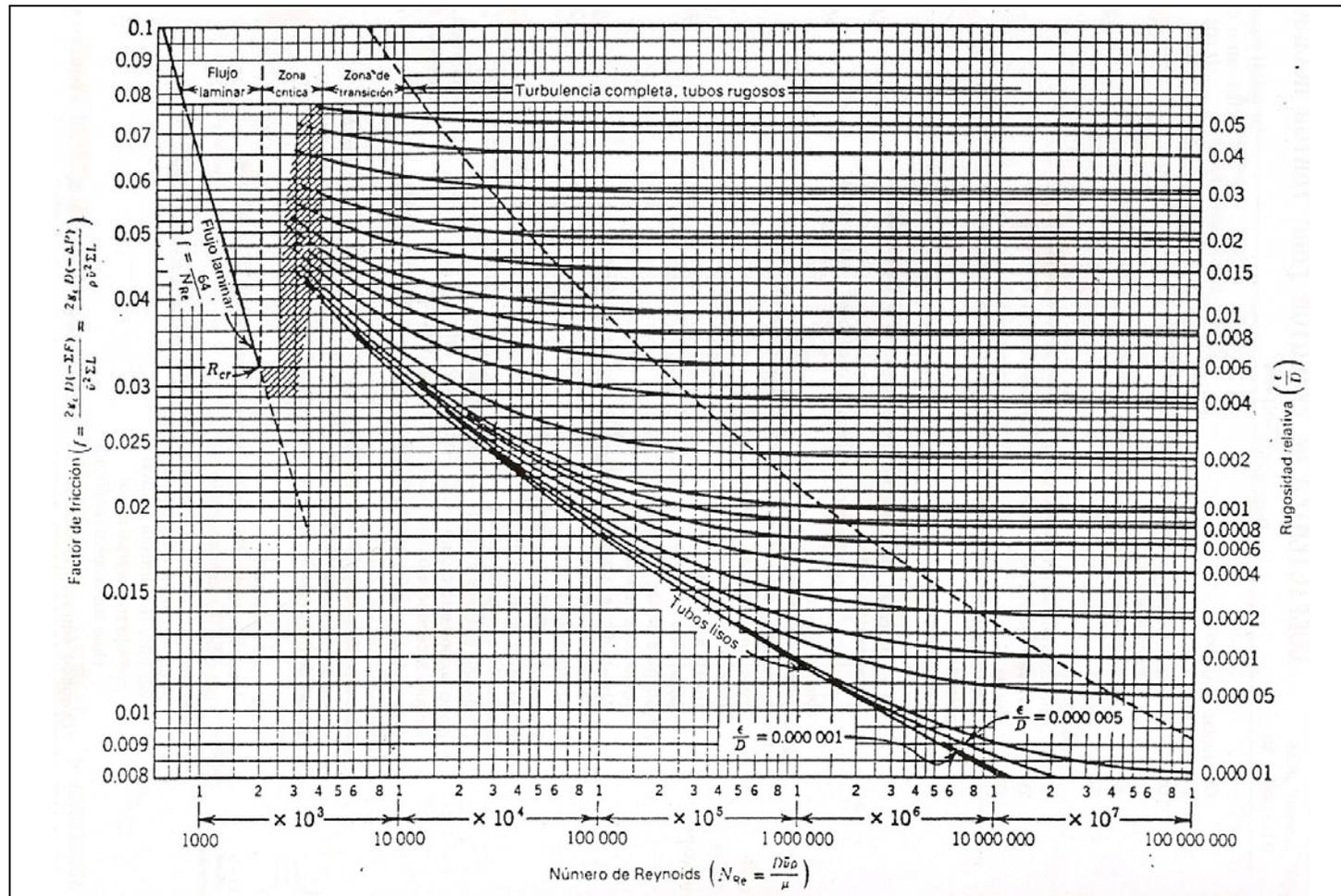


Figura C.3. Comportamiento del factor de fricción como una función del número de Reynolds y la rugosidad relativa.

Fuente: Foust, Wenzel, Clump, Maus & Andersen (1989)

Descripción	Longitud equivalente en diámetros de tubo (L/D)
Válvulas de globo	
Convencional	
Sin obstrucción con asiento plano, biselado o de obturador – totalmente abierta	340
Con disco accionado con vástagos o mariposa – totalmente abierta	450
Modelo en Y (Sin obstrucción en asiento plano, biselado o de obturador)	
Con vástago de 60° desde la corrida de tubería – totalmente abierta	175
Con vástago de 45° desde la corrida de tubería – totalmente abierta	145
Válvulas de ángulo	
Convencional	
Sin obstrucción en el asiento plano, biselado o de obturador – totalmente abierta	145
Con disco accionado con vástagos o mariposa – totalmente abierta	200
Válvulas de compuerta	
Convencional de disco de cuña, disco doble o disco obturador	
Totalmente abierta	13
Abierta a tres cuartos	35
Abierta a la mitad	160
Abierta a un cuarto	900
Válvula para pastas o pulpas	
Totalmente abierta	17
Abierta a tres cuartos	50
Abierta a la mitad	260
Abierta a un cuarto	1200
Tubería de cañería – totalmente abierta	3 <sup>a</sup>
Válvulas de retención	
Oscilación convencional 0.5° – totalmente abierta	135
Oscilación de paso libre 0.5° – totalmente abierta	50
globo ascendente o paro – 2.0° – totalmente abierta	Igual que de globo
Angulo ascendente o paro – 2.0° – totalmente abierta	Igual que de ángulo
Bola en línea – 2.5 vertical y 0.25 horizontal <sup>b</sup> – totalmente abierta	150
Válvulas de pie con filtro	
Con válvula de disco de tipo ascendente – 0.3° – totalmente abierta	420
Con disco con articulación de piel – 0.4° – totalmente abierta	75
Válvulas de mariposa (6 plg y mayores) – totalmente abierta	20
Grifos	
Flujo transversal recto	
Area rectangular del puerto del obturador igual al 100% del área del tubo – totalmente abierta	18
Tres vías	
Area rectangular del puerto del obturador igual al 80% del área del tubo (totalmente abierta)	44
Flujo transversal recto	
Flujo transversal ramificado	140
<sup>a</sup> Longitud equivalente exactamente igual a la longitud entre las caras de las bridas o extremos soldados.	
<sup>b</sup> Caída de presión mínima calculada (lb/plg <sup>2</sup> ) a través de la válvula para suministrar el flujo suficiente para elevar por completo al disco.	

Figura C.4. Valores de longitudes equivalentes y de coeficientes de fricción para diversos accesorios.

Fuente: Foust, Wenzel, Clump, Maus & Andersen (1989)

Descripción	Longitud equivalente en diámetros de tubo ( $L/D$ )
<b>Accesorios</b>	
Codo convencional de 90°	30
Codo convencional de 45°	16
Codo de radio largo de 90°	20
Codo recto de 90°	50
Codo recto de 45°	26
Codo de esquina cuadrada	57
<b>T Convencional</b>	
Para el flujo transversal recto	20
Para el flujo transversal ramificado	60
Curva de retorno de patrón cerrado	50

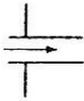
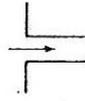
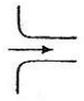
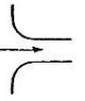
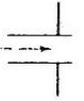
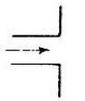
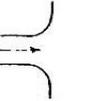
						
$K = 0.78$ Entrada con proyección hacia adentro	$K = 0.50$ Entrada con esquina aguda	$K = 0.23$ Entrada ligeramente redondeada	$K = 0.04$ Entrada bien redondeada	$K = 1.0$ Salida con proyección del tubo	$K = 1.0$ Salida con esquina aguda	$K = 1.0$ Salida redondeada

Figura C.4. Valores de longitudes equivalentes y de coeficientes de fricción para diversos accesorios (continuación).

Fuente: Foust, Wenzel, Clump, Maus & Andersen (1989)

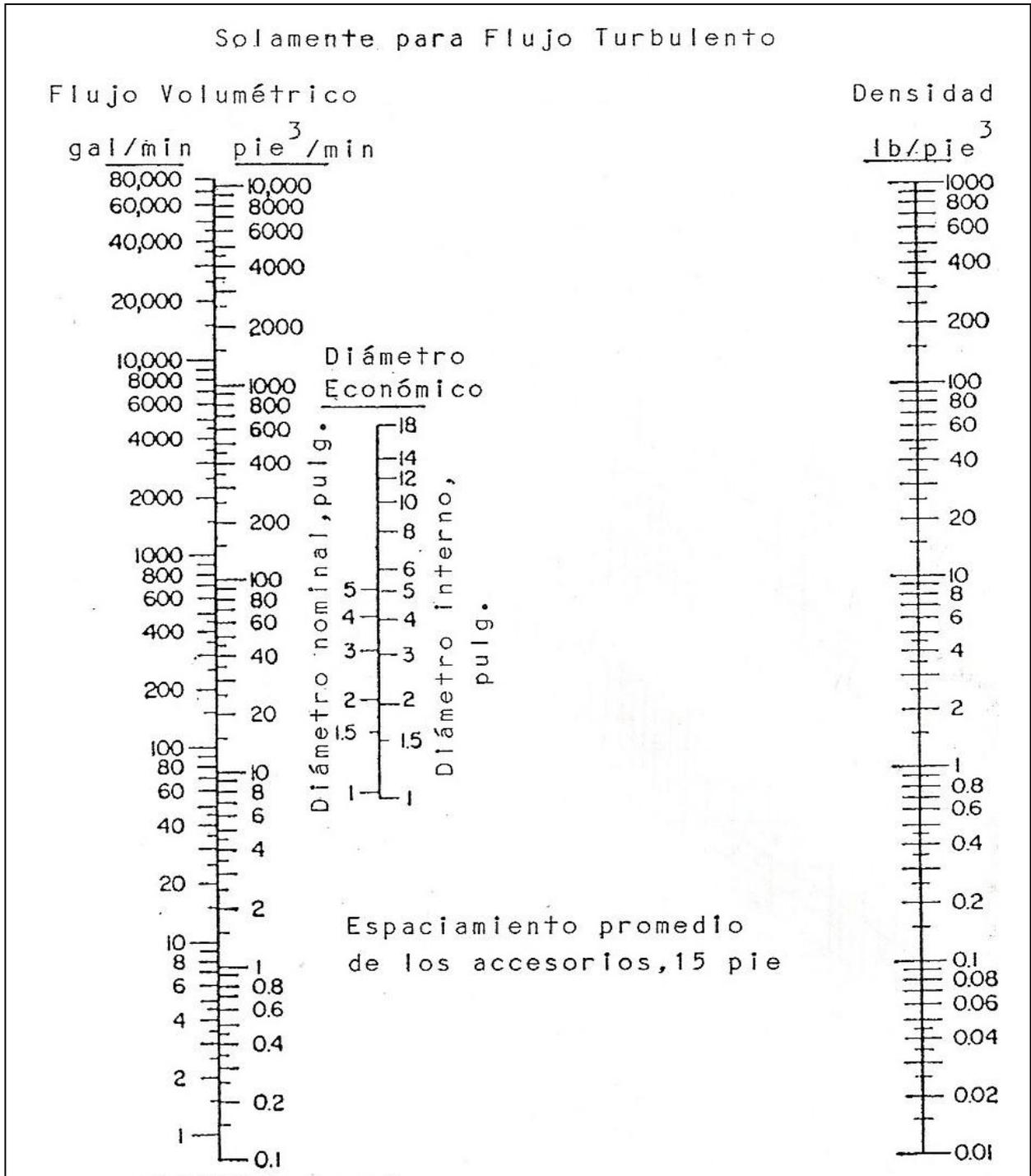


Figura C.5. Diámetro económico para tuberías de acero comercial catálogo 40.

Fuente: Perry (1963)

Temperatura $T$ °C	Viscosidad $\mu'$ , centipoises	Conductividad calorífica $k$ , kcal/m-h-°C	Densidad $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\psi_f = \left( \frac{k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right)^{1/2}$
0	1,794	0,476	999,87	6 900
5	1,519	0,485	999,99	7 860
10	1,310	0,496	999,73	8 870
15	1,140	0,505	999,13	9 900
20	1,005	0,513	998,23	10 930
25	0,894	0,522	997,07	12 150
30	0,801	0,529	995,67	13 090
35	0,723	0,535	994,06	14 160
40	0,656	0,541	992,24	15 260
45	0,599	0,547	990,25	16 370
50	0,549	0,553	988,07	17 510
60	0,470	0,562	983,24	19 680
70	0,406	0,570	977,81	21 920
80	0,357	0,577	971,83	24 080
90	0,317	0,582	965,34	26 170
100	0,284	0,586	958,38	28 220
110	0,256	0,588	951,0	30 190
120	0,232	0,589	943,4	32 120
130	0,212	0,589	935,2	33 910
140	0,196	0,589	926,4	36 340
150	0,184	0,589	917,3	36 090

Figura C.6. Propiedades del agua líquida.

Fuente: McCabe et al. (1991)

## APÉNDICE D

### DISTRIBUCIÓN F Y DISTRIBUCIÓN NORMAL

A continuación se presentan los distintos modelos utilizados para la determinación de la distribución F y la distribución normal utilizados en el análisis estadístico.

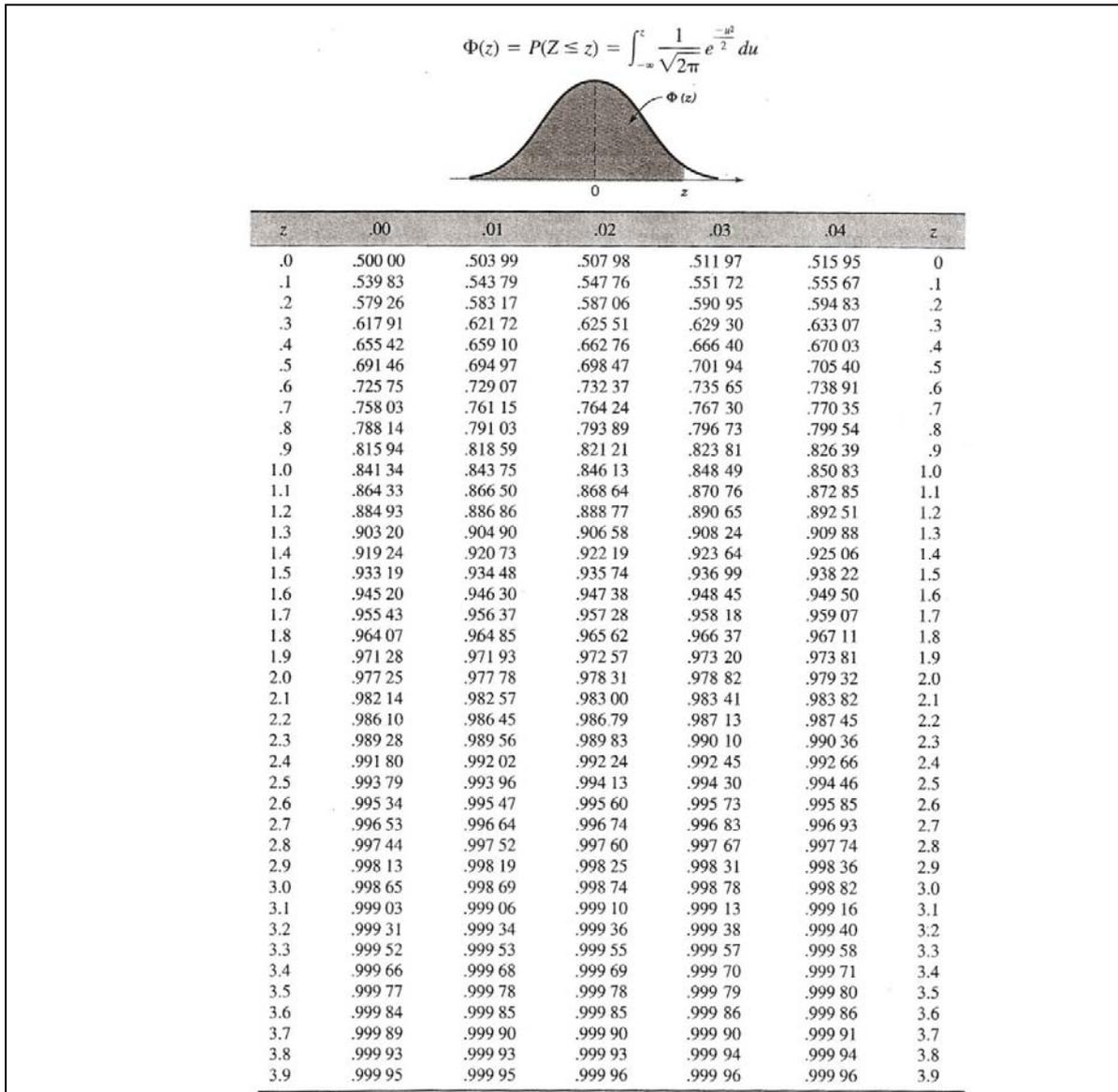


Figura D.1. Distribución normal estándar acumulada.

Fuente: Montgomery (1996)

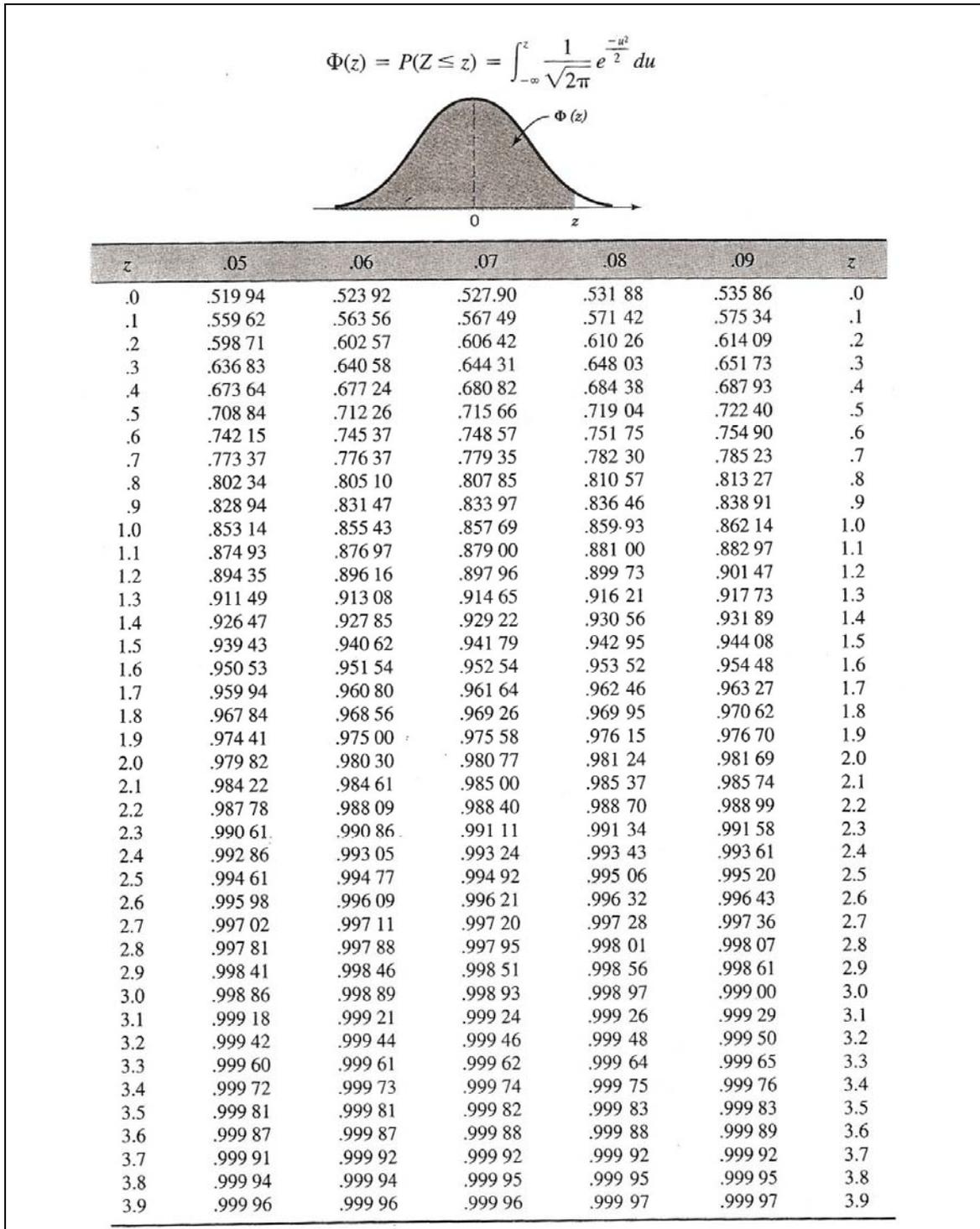


Figura D.1. Distribución normal estándar acumulada (continuación).

Fuente: Montgomery (1996)

		$f_{0.10, v_1, v_2}$																			
		Grados de libertad del numerador ( $v_1$ )																			
$v_2 \backslash v_1$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$	
Grados de libertad del denominador ( $v_2$ )	1	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	60.71	61.22	61.74	62.00	62.26	62.53	62.79	63.06	63.33	
	2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.44	9.45	9.46	9.47	9.47	9.48	9.49
	3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.22	5.20	5.18	5.18	5.17	5.16	5.15	5.14	5.14	5.13
	4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.87	3.84	3.83	3.82	3.80	3.79	3.78	3.78	3.76
	5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.24	3.21	3.19	3.17	3.16	3.14	3.14	3.12	3.10
	6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.87	2.84	2.82	2.80	2.78	2.76	2.74	2.74	2.72
	7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.63	2.59	2.58	2.56	2.54	2.51	2.49	2.49	2.47
	8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.50	2.46	2.42	2.40	2.38	2.36	2.34	2.32	2.32	2.29
	9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.34	2.30	2.28	2.25	2.23	2.21	2.18	2.18	2.16
	10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.20	2.18	2.16	2.13	2.11	2.08	2.08	2.06
	11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.12	2.10	2.08	2.05	2.03	2.00	2.00	1.97
	12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.06	2.04	2.01	1.99	1.96	1.93	1.90	1.88
	13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.90	1.88	1.85	1.85
	14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.91	1.89	1.86	1.83	1.80	1.80
	15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.92	1.90	1.87	1.85	1.82	1.79	1.76	1.76
	16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.89	1.87	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.72
	17	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.86	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.69
	18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.89	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.66
	19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.91	1.86	1.81	1.79	1.76	1.73	1.70	1.67	1.63	1.63
	20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.89	1.84	1.79	1.77	1.74	1.71	1.68	1.64	1.61	1.61
	21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.87	1.83	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59	1.59
	22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.86	1.81	1.76	1.73	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57	1.57
	23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92	1.89	1.84	1.80	1.74	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59	1.55	1.55
	24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.83	1.78	1.73	1.70	1.67	1.64	1.61	1.57	1.53	1.53
	25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.72	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	1.52
	26	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.81	1.76	1.71	1.68	1.65	1.61	1.58	1.54	1.50	1.50
	27	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.80	1.75	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57	1.53	1.49	1.49
	28	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.79	1.74	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	1.48	1.48
	29	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.78	1.73	1.68	1.65	1.62	1.58	1.55	1.51	1.47	1.47
	30	2.88	2.49	2.28	2.14	2.03	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.77	1.72	1.67	1.64	1.61	1.57	1.54	1.50	1.46	1.46
40	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.71	1.66	1.61	1.57	1.54	1.51	1.47	1.42	1.38	1.38	
60	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.66	1.60	1.54	1.51	1.48	1.44	1.40	1.35	1.29	1.29	
120	2.75	2.35	2.13	1.99	1.90	1.82	1.77	1.72	1.68	1.65	1.60	1.55	1.48	1.45	1.41	1.37	1.32	1.26	1.19	1.19	
$\infty$	2.71	2.30	2.08	1.94	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.55	1.49	1.42	1.38	1.34	1.30	1.24	1.17	1.10	1.10	

Figura D.2. Puntos porcentuales de la distribución F.

Fuente: Montgomery (1996)

		$f_{0.05, v_1, v_2}$																		
		Grados de libertad del numerador ( $v_1$ )																		
$v_2 \backslash v_1$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	$\infty$
Grados de libertad del denominador ( $v_2$ )	1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
	28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25	
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00	

Figura D.2. Puntos porcentuales de la distribución F (continuación).

Fuente: Montgomery (1996)

