VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 MANTENIMIENTO DE LA TORRE

Una vez establecidas las necesidades de mantenimiento de la torre, como primer paso se hizo el desmantelamiento completo de la columna, para poder revisar todas y cada una de las partes y secciones que la conforman.

La limpieza de los componentes se hizo con una solución de ácido clorhídrico (HCl) de concentración 1N a partir del reactivo al 37% (v/v), y con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) de concentración 9º Bé.

Posteriormente, se revisó el estado de los sellos en las juntas de la torre y se constató que el material estaba completamente desgastado, lo que originaba fugas durante la operación. Para sustituir los sellos se optó por unos O-Rings de Vitón, pues este material conserva sus propiedades mecánicas incluso por sobre los 200ºC y es resistente al ataque de ácidos y químicos volátiles.

Las bridas de la torre presentaban un serio estado de corrosión debido a que ya no contaban con la pintura de protección. Para remediar esto, se retiró la pintura vieja con removedor de pintura y, posteriormente, se llevó a cabo el lijado de las partes metálicas con el fin de limpiar el óxido de la superficie. El repintado de las bridas se hizo con pintura vinílica, que es resistente a la acción químicos moderados y resulta ideal para los efectos del trabajo en la torre.

En el caso de las válvulas de paso en los diversos puntos de la torre, se hizo la limpieza y ajuste de los sellos, puesto que no existía un problema mayor.

Las resistencias eléctricas en la alimentación y el rehervidor fueron limpiadas de la misma forma que las piezas de vidrio y también fueron dotadas de sellos nuevos en las uniones con la torre.

Para armar nuevamente, la torre se utilizó un juego nuevo de tornillos de acero inoxidable con el fin de ajustar de manera integral las piezas y, con la ayuda de los sellos, evitar un mal funcionamiento de la columna.

Las conexiones del circuito de enfriamiento se renovaron y ajustaron para evitar fugas, del mismo modo se hizo el acoplamiento de un sistema de refrigeración al tanque de agua, para poder trabajar a bajas temperaturas y poder asegurar la condensación del producto de destilado y el enfriamiento de los fondos. El sistema de refrigeración consta de un contenedor de agua con un de control de temperatura, y recirculación.

6.2 MEZCLAS BINARIAS PARA EL TRABAJO EXPERIMENTAL

6.2.1 Mezclas Candidatas

Para cumplir con el siguiente objetivo, se analizó un grupo de mezclas seleccionado en base a las características deseables propuestas. Las mezclas que cumplieron éstos requisitos son las siguientes:

- Etanol – Agua.
- Metanol – Isobutanol.
- Acetona – 2-Propanol.
- n-Hexano – 1-Pentanol.

- Etanol – 1-Pentanol.
- Dietilamina – Agua.
- Agua – Etilenglicol.

Los valores de IR para los pares de mezclas son los siguientes:

IR	
Etanol 1.3614	Agua 1.3330
Metanol 1.3286	Isobutanol 1.3959
Acetona 1.3590	2-Propanol 1.3772
n-Hexano 1.3749	1-Pentanol 1.4099
Etanol 1.3614	1-Pentanol 1.4099
Dietilamina 1.3823	Agua 1.3330
Agua 1.3330	Etilenglicol 1.4331

Tabla 2. Valores de IR para las mezclas candidatas.

Las temperaturas de ebullición a P = 1atm son:

Punto de ebullición T(ºC)	
1-Pentanol	138.00
2-Propanol	82.00
Acetona	56.20
Agua	100.00
Dietilamina	55.50
Etanol	78.30
Etilenglicol	195.00
Isobutanol	107.90
Metanol	64.60
n-Hexano	69.00

Tabla 3. Puntos de ebullición de las sustancias candidatas.

6.2.2 Elección de las Mezclas para la Experimentación

Una vez que se eligieron las mezclas candidatas y, habiendo determinado cuales de ellas resultaban ideales para el trabajo de laboratorio en función de sus características deseables, se determinó que las mezclas a emplear en el trabajo experimental son:

- Etanol – Agua.
- Agua – Etilenglicol.

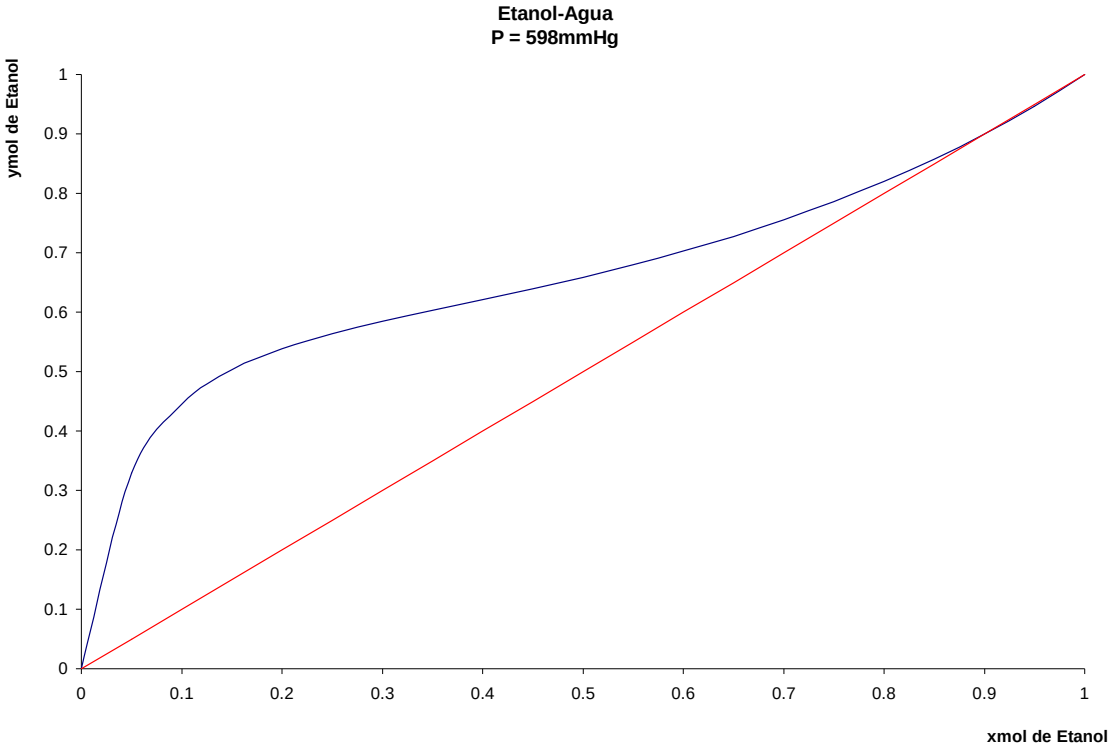

Figura 15. Curva de ELV para la mezcla Etanol – Agua a P = 598mmHg.

Los sistemas son, además, representativos de los procesos de separación, siendo mezclas azeotrópica e ideal respectivamente.

Para el caso de la mezcla Etanol – Agua, se puede de trabajar ajustando las condiciones de operación, para poder alcanzar una composición cercana al azeótropo.

La mezcla Agua – Etilenglicol tiene un rango de IR bastante amplio, lo que permite un análisis bastante preciso de las composiciones en el equilibrio a lo largo de la columna.

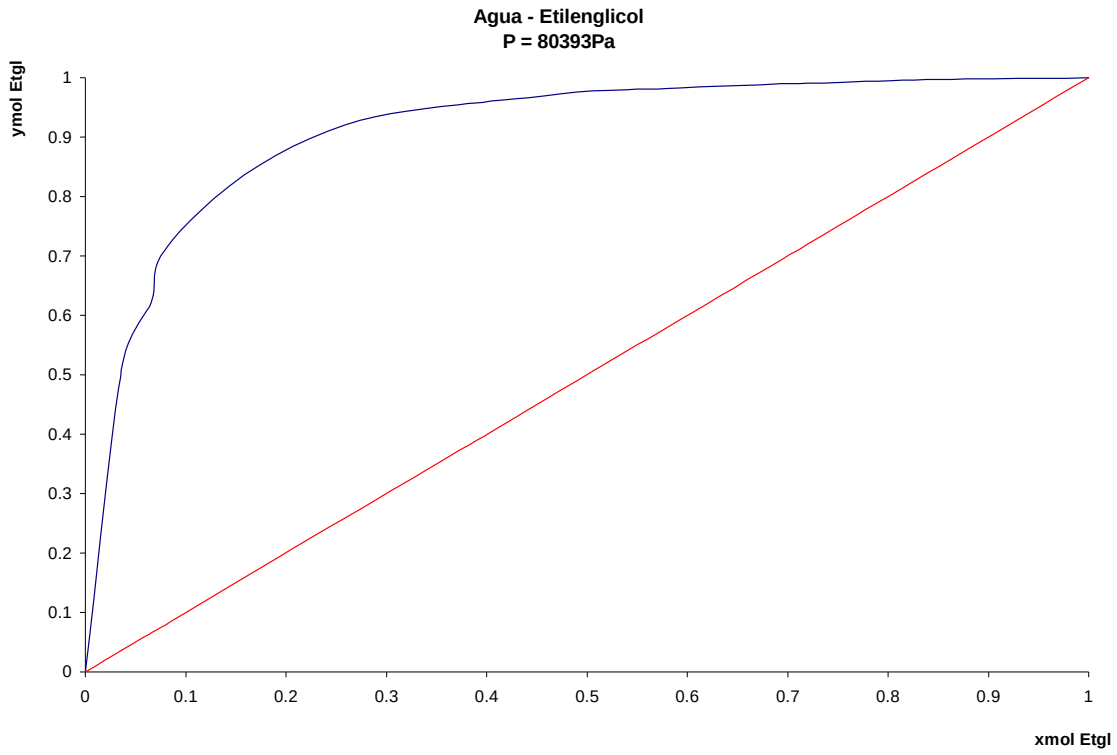

Figura 16. Curva de ELV para la mezcla Agua – Etilenglicol a P = 80393Pa.

En ambos casos, se tienen sustancias que no son químicamente reactivas a las condiciones de operación de la mezcla, con lo que se asegura un manejo sin problemas por parte de los estudiantes.

Además, son sustancias relativamente baratas y pueden ser conseguidas en grandes cantidades, para poder realizar experimentos en la torre de destilación a diversas condiciones de operación y con diferentes variables de estudio.

6.2.3 Análisis de Propiedades de las Mezclas Elegidas

Para realizar el Property Analysis, se generaron en Aspen los puntos a lo largo de una curva flash a partir de un flujo equimolar de los componentes de cada mezcla. El set de propiedades establecido fue para calcular la temperatura de equilibrio en ºC y la fracción mol del componente más volátil en ambas fases. Las variables fijas fueron la presión a 598mmHg y la fracción de vapor de 0, la variable a ajustar fue la fracción mol de componente ligero.

La interfase de Aspen para el análisis es:

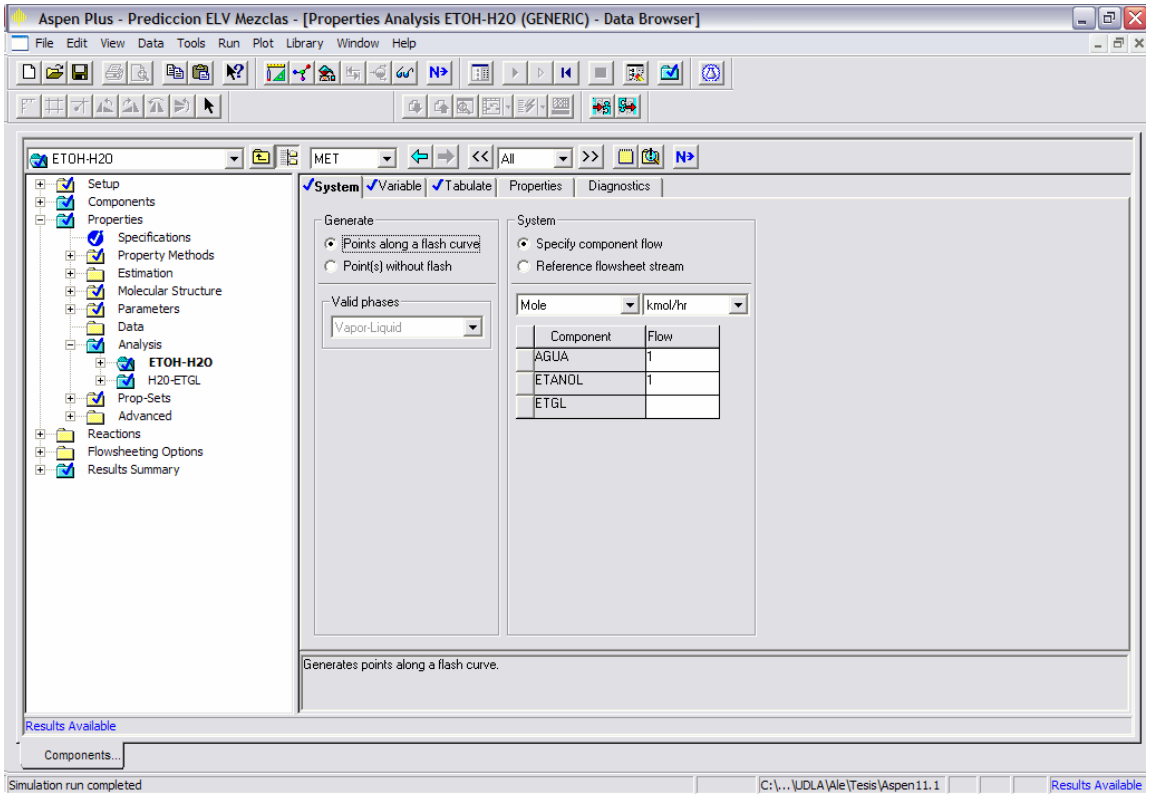

Figura 17. Property Analysis para las mezclas elegidas.

Los resultados de cada análisis son:

Sistema Etanol - Agua			Sistema Agua - Etilenglicol		
Datos Predichos 598mmHg			Datos Predichos 598mmHg		
T (ºC)	Fracc. Mol Líquido	Fracc. Mol Vapor	T (ºC)	Fracc. Mol Líquido	Fracc. Mol Vapor
93.43	0.0000	0.0000	189.23	0.0000	0.0000
84.07	0.0500	0.3298	170.51	0.0500	0.4834
80.18	0.1000	0.4451	157.16	0.1000	0.6963
78.16	0.1500	0.5030	147.19	0.1500	0.8042
76.94	0.2000	0.5386	139.40	0.2000	0.8655
76.11	0.2500	0.5640	133.09	0.2500	0.9034
75.49	0.3000	0.5847	127.82	0.3000	0.9284
74.99	0.3500	0.6032	123.34	0.3500	0.9457
74.55	0.4000	0.6212	119.44	0.4000	0.9582
74.15	0.4500	0.6396	116.00	0.4500	0.9675
73.78	0.5000	0.6591	112.94	0.5000	0.9745
73.45	0.5500	0.6800	110.19	0.5500	0.9800
73.15	0.6000	0.7028	107.68	0.6000	0.9844
72.88	0.6500	0.7278	105.40	0.6500	0.9879
72.64	0.7000	0.7554	103.29	0.7000	0.9907
72.45	0.7500	0.7859	101.35	0.7500	0.9930
72.30	0.8000	0.8198	99.54	0.8000	0.9950
72.22	0.8500	0.8576	97.86	0.8500	0.9966
72.19	0.9000	0.8997	96.28	0.9000	0.9979
72.23	0.9500	0.9469	94.81	0.9500	0.9991
72.34	1.0000	1.0000	93.43	1.0000	1.0000

Tabla 4. Resultados del Property Analysis para las mezclas candidatas.

6.2.4 Validación Termodinámica de los Datos de ELV Reportados

Para realizar el siguiente paso se seleccionaron los modelos predictivos y las ecuaciones de estado para la simulación y son los siguientes:

- NRTL.
- NRTL – Redlich-Kwong.
- UNIQUAC.
- UNIQUAC – Redlich-Kwong.
- Wilson.
- Wilson – Redlich-Kwong.

En primer lugar, se realizó la prueba de consistencia termodinámica sobre los datos reportados en la bibliografía para verificar los valores de ELV de cada componente.

Se consideraron diversos grupos de datos de ELV para cada una de las mezclas, a distintas condiciones de P y T.

Estas diferencias se deben a que no se tiene la bibliografía consultada no reporta el mismo número de grupos para las distintas mezclas. Estos datos de ELV se encuentran en el Apéndice A.

Los niveles de tolerancia para cada prueba se tomaron como los valores predeterminados de Aspen, siendo del 10% para la prueba por áreas y de 0.01 para la prueba por puntos. Los resultados son los siguientes:

Etanol - Agua				
Data set	Test method	Result	Value	Tolerance
ETOH-H2O	AREA	PASSED	-6.30	10%
ETOH-H2O	POINT	NOT PERFORMED		
70C	AREA	PASSED	1.09	10%
70C	POINT	PASSED	0.0005	0.01
500MMHG	AREA	PASSED	-8.49	10%
500MMHG	POINT	NOT PERFORMED		
706MMHG	AREA	PASSED	-7.77	10%
706MMHG	POINT	NOT PERFORMED		
Data set	Test method	Result	Value	Tolerance
ETOH-H2O	AREA	PASSED	-7.20	10%
ETOH-H2O	POINT	NOT PERFORMED		
70C	AREA	PASSED	0.44	10%
70C	POINT	PASSED	0.0005	0.01
500MMHG	AREA	PASSED	-9.00	10%
500MMHG	POINT	NOT PERFORMED		
706MMHG	AREA	PASSED	-6.79	10%
706MMHG	POINT	NOT PERFORMED		

Tabla 5. Resultados de las Pruebas de Consistencia para la mezcla Etanol – Agua.

Agua – Etilenglicol				
Data set	Test method	Result	Value	Tolerance
80393PA	AREA	FAILED	10.49	10%
80393PA	POINT	NOT PERFORMED		
Data set	Test method	Result	Value	Tolerance
80393PA	AREA	FAILED	27.29	10%
80393PA	POINT	NOT PERFORMED		

Tabla 6. Resultados de las Pruebas de Consistencia para la mezcla Agua – Etilenglicol.

En cada tabla de las Pruebas de Consistencia, se presentan dos series de resultados para cada mezcla, el primero corresponde al método de predicción de propiedades por coeficientes de actividad, y el segundo al coeficiente de actividad combinado con la EDE. No se hizo una variación de la tolerancia a efectos de darle el margen que el simulador de procesos tiene integrado, pues se consideró que este valor debe resultar suficiente dada la capacidad de análisis del programa.

6.2.5 Elección del Método de Predicción de Propiedades

Con las series de datos ingresadas en Aspen, se utilizó el módulo Data Regression en su modalidad de evaluación, para probar los métodos de predicción propuestos, y de esta forma obtener el que mejor ajusta su predicción a los valores de ELV experimentales.

Etanol - Agua	
Property method	UNIQ-RK UNIQUAC / REDLICH-KWONG
Weighted sum of squares	984.85
Residual root mean square error	3.55
Agua - Etilenglicol	
Property method	UNIQUAC UNIQUAC / IDEAL GAS
Weighted sum of squares	5213.27
Residual root mean square error	20.02

Tabla 7. Métodos de predicción de propiedades elegidos para cada mezcla candidata.

En la Tabla 7, están reportados los resultados de la evaluación del Data Regression para las mezclas, los cuales son considerados únicamente para el método de propiedades con un mejor ajuste, según la suma de cuadrados del error.

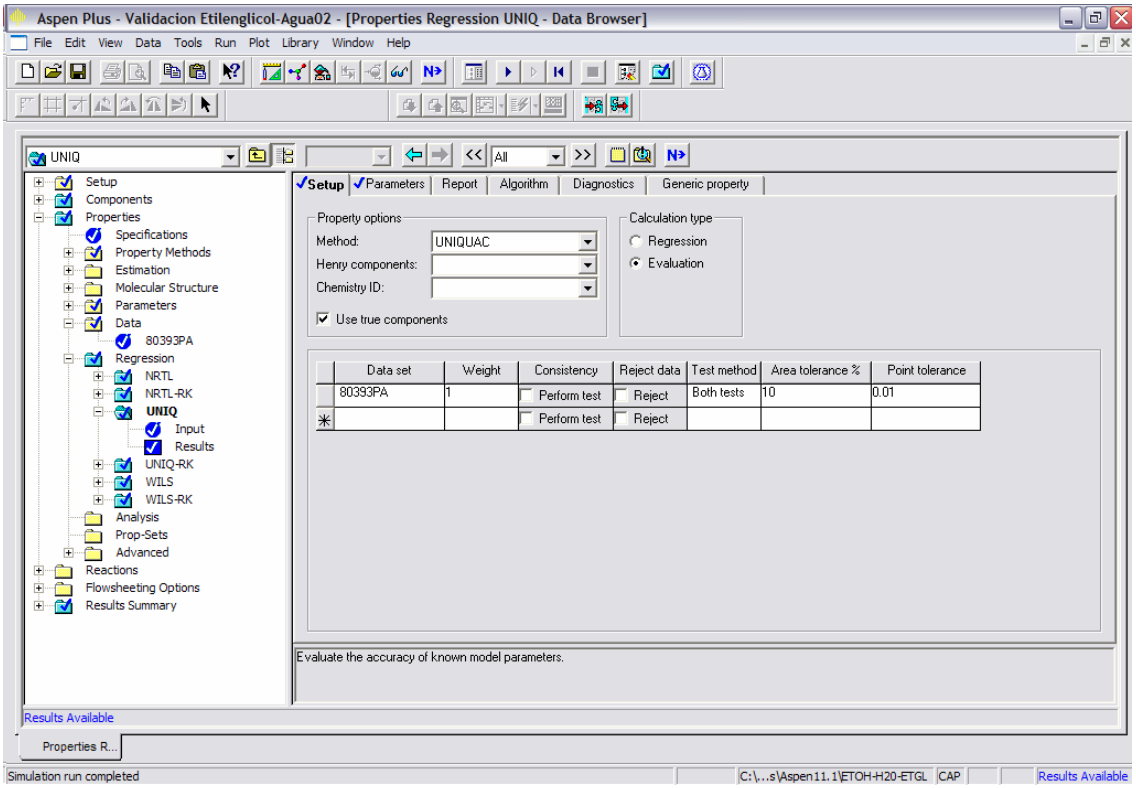

Figura 18. Data Regression en la modalidad de evaluación del método de propiedades.

Se graficaron los valores de ELV obtenidos por los dos mejores modelos predictivos contra valores experimentales, para la mezcla Etanol – Agua (UNIQUAC-RK, UNIQUAC) en la Figura 19 y para la mezcla Agua – Etilenglicol (UNIQUAC, NRTL) en la Figura 20.

Si se comparan los resultados, se puede observar la precisión con que se obtienen los valores para el ELV de cada una de las mezclas.

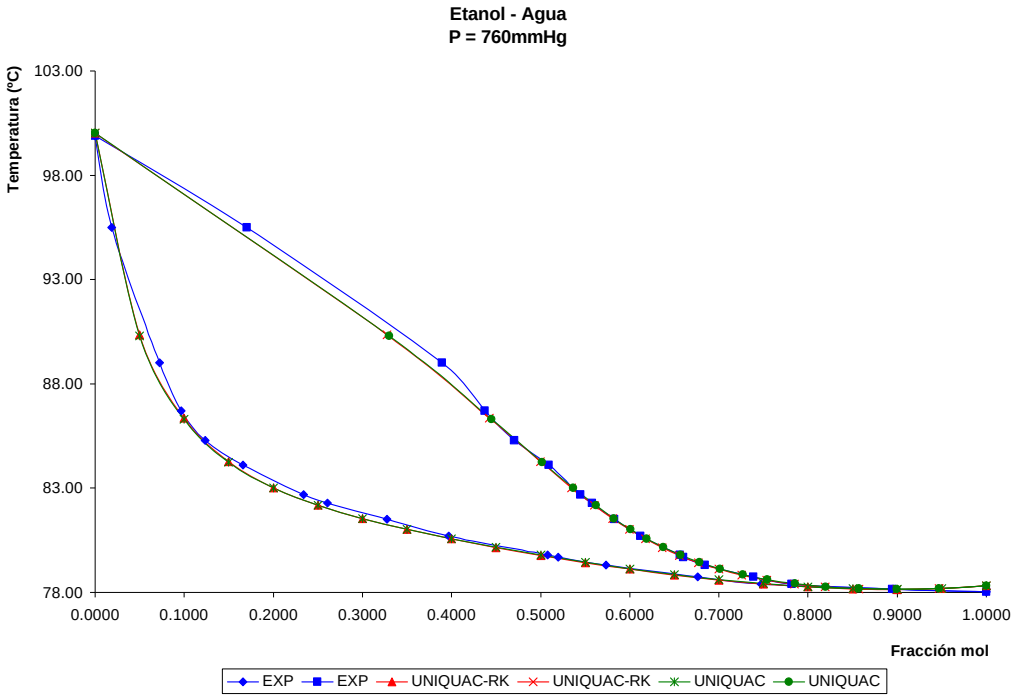

Figura 19. Diagrama PTxy comparativo para el Sistema Etanol – Agua.

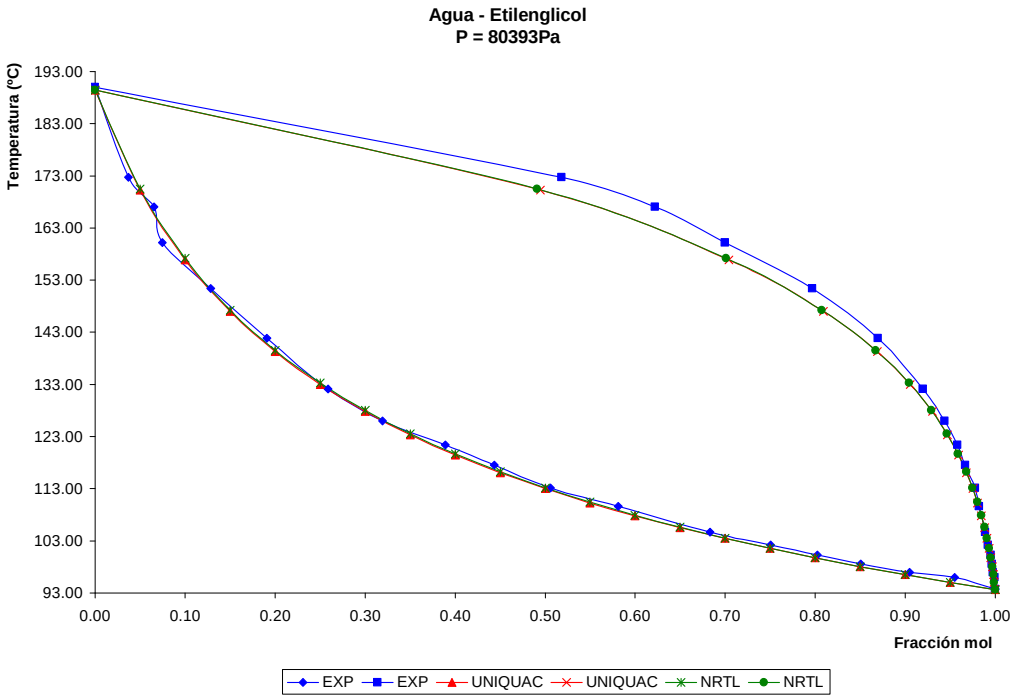

Figura 20. Diagrama PTxy comparativo para el Sistema Agua - Etilenglicol.

6.3 DISEÑO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

6.3.1 Diseño Preliminar utilizando el Método Gráfico

El diseño del trabajo experimental de la torre de destilación se hace una vez establecidas las mezclas que resultan idóneas para los objetivos planteados.

El primer paso fue el desarrollo del método de McCabe – Thiele para las mezclas elegidas.

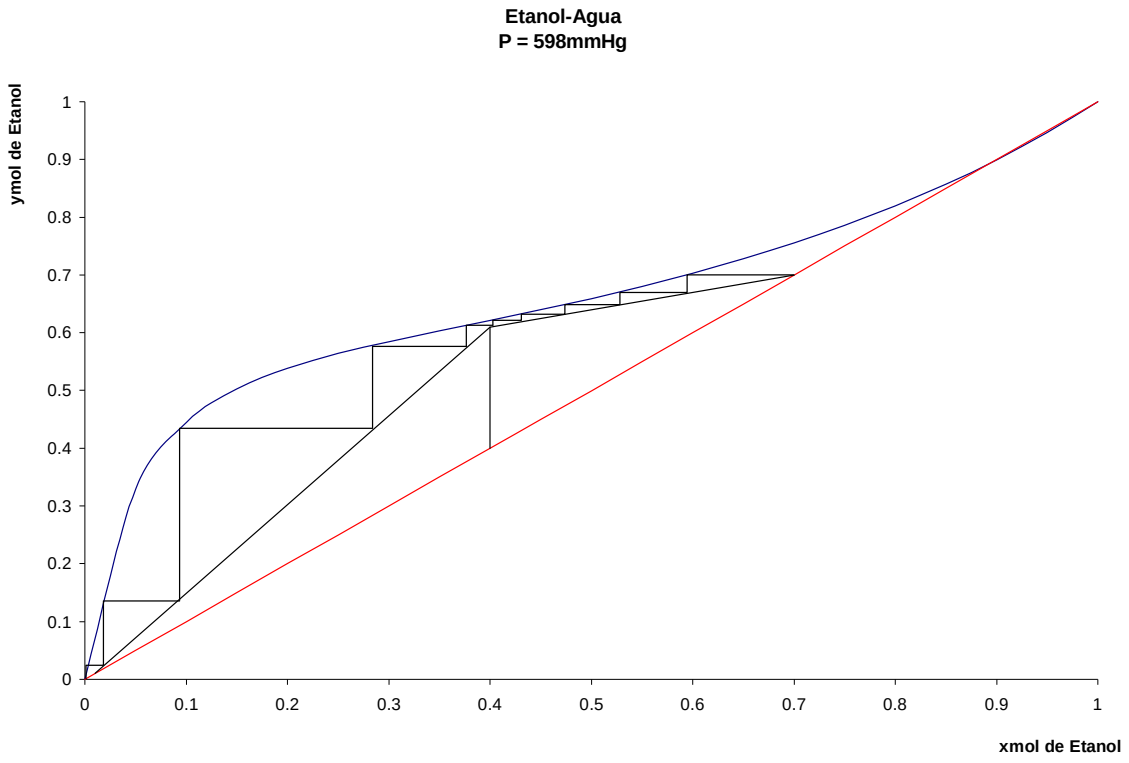

Figura 21. Diagrama de McCabe – Thiele para la mezcla Etanol – Agua.

Con el desarrollo de los diagramas se puede obtener el número de platos teóricos que requiere la torre para llevar a cabo la separación de los componentes de la mezcla. Para el caso de la mezcla Etanol – Agua, las composiciones se fijaron en:

- Fracción mol de 0.7 para el etanol en el destilado.
- Fracción mol de 0.99 para el agua en los fondos.

Estas composiciones son debido a la presencia del azeótropo alrededor del 0.88 de fracción mol de etanol en la mezcla, así se le da facilidad de operación a la torre en la experimentación. Además, se trató de encontrar las condiciones que corresponden a la configuración de la torre de destilación de la planta piloto.

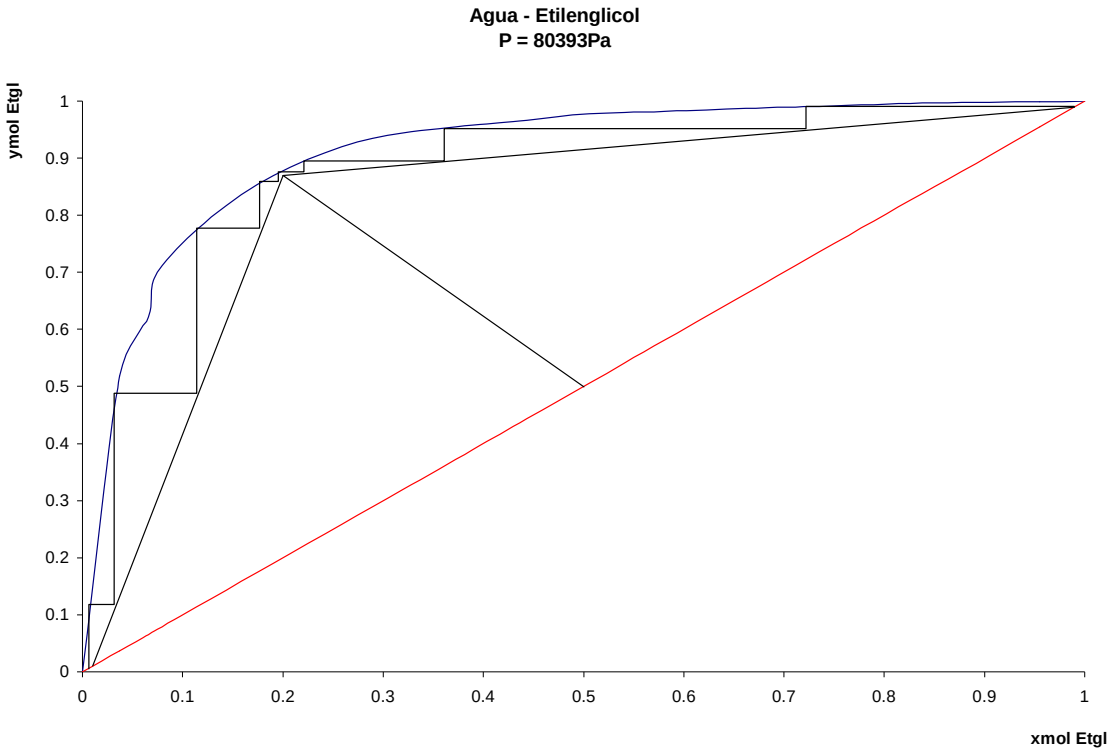

Figura 22. Diagrama de McCabe – Thiele para la mezcla Agua - Etilenglicol.

Para el caso de la mezcla Agua – Etilenglicol, las composiciones establecidas para el diagrama son:

- Fracción mol de 0.99 para el agua en el destilado.
- Fracción mol de 0.99 para el etilenglicol en los fondos.

Como la mezcla no presenta un azeótropo y la curva de ELV es bastante amplia en las composiciones del equilibrio, estos valores se pueden obtener sin mayor complicación con el método gráfico.

Los resultados obtenidos con el método gráfico son:

	Etanol - Agua	**Agua - Etilenglicol**
# de Platos	10	8
Plato de Alimentación	6	4
Composición de la Alimentación	x_{mol} de etanol = 0.4	x_{mol} de agua = 0.5
Fase de la Alimentación	Punto de burbuja	ν = 0.47
Relación de Reflujo	0.47	0.2

Tabla 8. Resultados del Método Gráfico para las mezclas experimentales.

El ajuste de la composición y de la fase de alimentación se hizo para tratar de alcanzar el número de etapas que tiene la torre de la UDLA, P.

Es claro que, en el caso de la mezcla ideal, el número de platos se ve reducido dado que es más fácil de separar, además de que sus puntos de ebullición están mucho más separados entre sí.

Los resultados obtenidos no reflejan completamente las condiciones fijas de la torre de la planta piloto, especialmente en el número de platos.

Esto necesita un ajuste para hacer coincidir el número de etapas disponible en la columna y las condiciones de diseño, por lo que los métodos rigurosos resultan adecuados para ello.

6.3.2 Ajuste de condiciones con Métodos Rigurosos

La simulación con RadFrac es el siguiente paso en el diseño del trabajo experimental. Para la mezcla Etanol – Agua se hizo una simulación con las condiciones fijas que tiene la torre, relación de reflujo y flujos de alimentación y destilado que ajustarán a las composiciones de los productos, condiciones de alimentación y un perfil de presiones para el sistema.

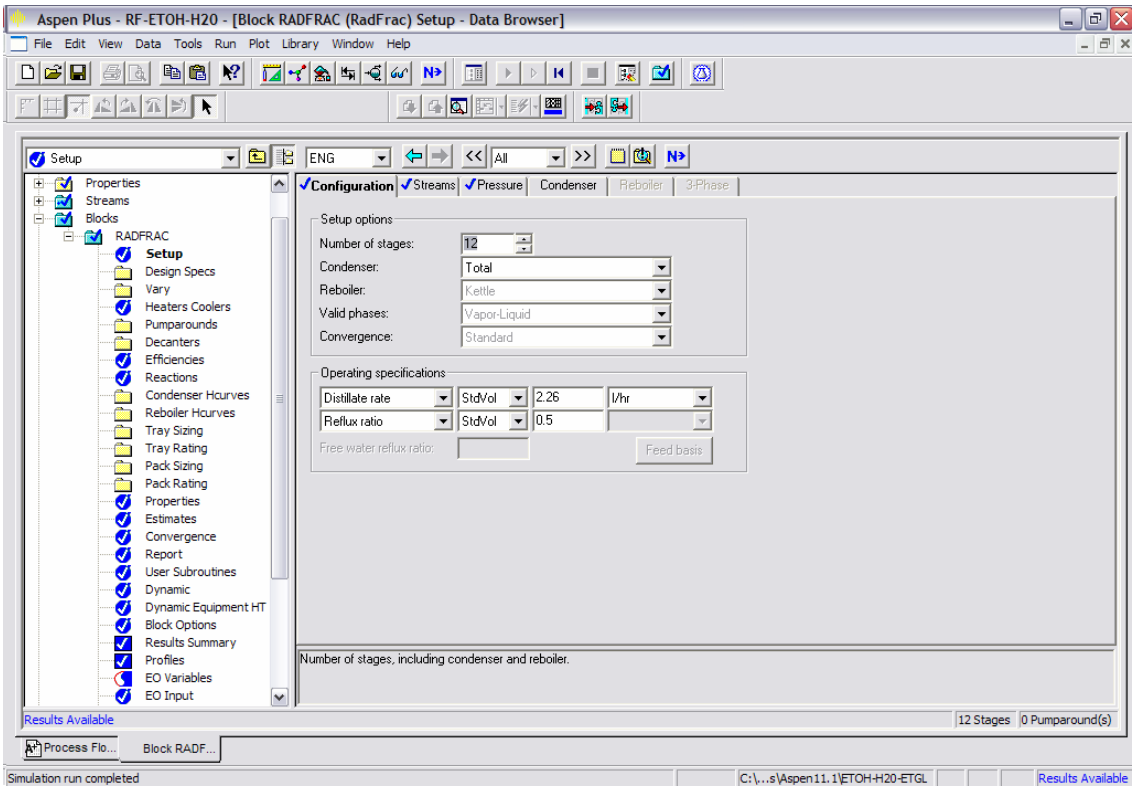

Figura 23. Especificaciones de RadFrac para la mezcla Etanol – Agua.

Las especificaciones son:

- Número de etapas: 12 (se consideran el condensador y el rehervidor).
- Plato de alimentación: 7.
- Composición de la alimentación: 0.4 x_{mol} de etanol.

- Relación de reflujo: 0.50.
- Flujo de alimentación: 3 lt/hr.
- Flujo de destilado: 2.26 lt/hr.
- Presión de la alimentación: 598 mmHg.
- Temperatura de la alimentación: 25ºC.
- Presión en el condensador: 572.15 mmHg.
- Caída de presión en la torre: 1psi.

Las modificaciones hechas sobre lo calculado para el diseño con el método gráfico, fueron en base a un mejor ajuste de los resultados de la destilación en el simulador:

Etanol - agua	Alimentación	Fondos	Destilado
Substream: MIXED Mole Flow kmol/hr			
ETANOL AGUA	0.0349 0.0523	2.72E-04 0.0387	0.0346 0.0135
Mole Frac			
ETANOL	0.4	6.96E-03	0.7184
AGUA	0.6	0.9930	0.2816
Total Flow kmol/hr	0.0872	0.0390	0.0481
Total Flow kg/hr	2.5514	0.7111	1.8403
Total Flow l/min	0.0500	0.0128	0.0411
Temperature K	298.15	365.72	344.64
Pressure atm	0.7868	0.8208	0.7528
Vapor Frac	0	0	0
Liquid Frac	1	1	1
Solid Frac	0	0	0
Enthalpy cal/mol	-67607.55	-67029.34	-65482.69
Enthalpy cal/gm	-2312.41	-3680.80	-1715.71
Enthalpy cal/sec	-1638.87	-727.07	-877.06
Entropy cal/mol-K	-56.19	-35.52	-65.51
Entropy cal/gm-K	-1.92	-1.95	-1.71
Density mol/cc	0.0290	0.0505	0.0195
Density gm/cc	0.8504	0.9209	0.7454
Average MW	29.23	18.21	38.16
Liq Vol 60F l/min	0.0495	0.0119	0.0376

Tabla 9. Resultados de las corrientes de alimentación y productos para la mezcla Etanol – Agua.

Comparando con el método gráfico, puede verse que la fracción mol para el etanol en el destilado es de 0.7 contra 0.7184 como resultado del simulador. La fracción mol de agua en fondos es de 0.99 contra 0.9930 de Aspen.

Esto es debido a que el método de solución de Aspen es mucho más complejo e involucra más variables que el método gráfico, aunque no se debe olvidar que éste último provee las bases para la simulación.

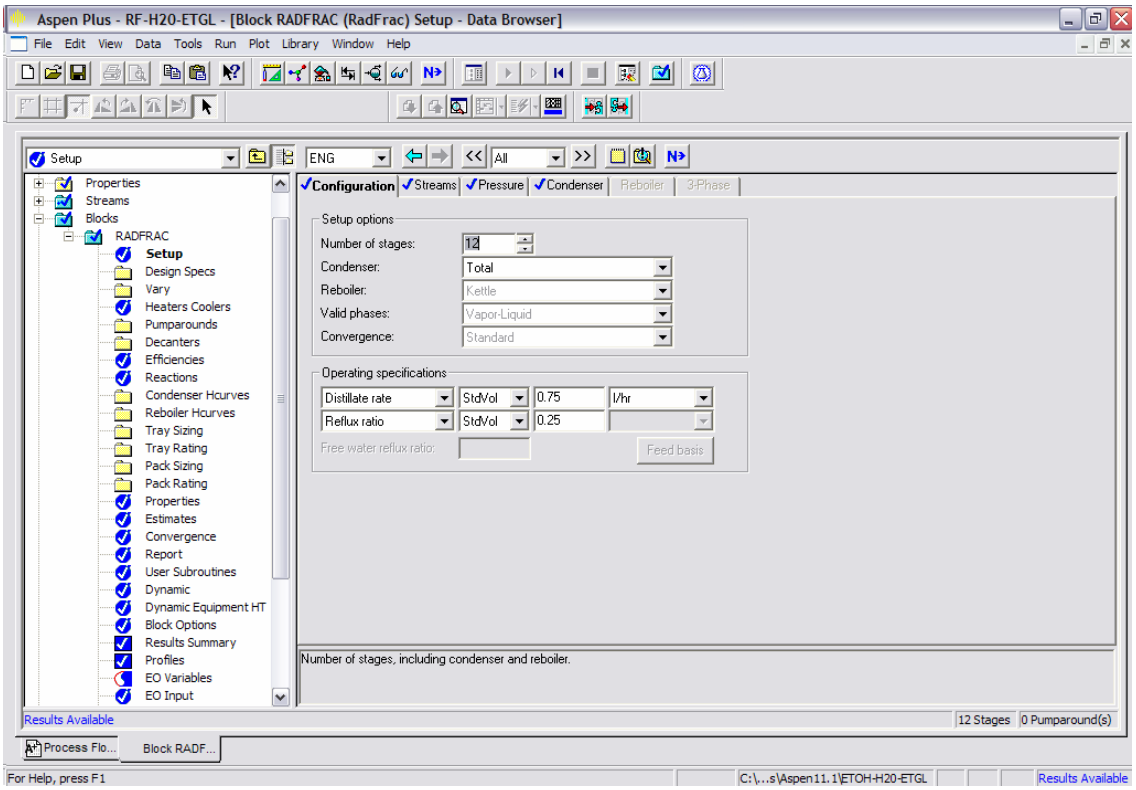

Figura 24. Especificaciones de RadFrac para la mezcla Agua – Etilenglicol.

Del mismo modo, la simulación de la mezcla Agua – Etilenglicol se realizó con las especificaciones correspondientes:

- Número de etapas: 12 (se consideran el condensador y el rehervidor).
- Plato de alimentación: 7.
- Composición de la alimentación: 0.5 x_{mol} de agua.

- Relación de reflujo: 0.25.
- Flujo de alimentación: 3 lt/hr.
- Flujo de destilado: 0.75 lt/hr.
- Presión de la alimentación: 598 mmHg.
- Temperatura de la alimentación: 25ºC.
- Presión en el condensador: 572.15 mmHg.
- Caída de presión en la torre: 1psi.

Los resultados obtenidos en la simulación son:

Agua - Etilenglicol	Alimentación	Destilado	Fondos
Substream: MIXED Mole Flow kmol/hr			
AGUA	0.0409	0.0409	1.90e-07
ETGL	0.0409	0.0001	0.0407
Mole Frac			
AGUA	0.5	0.9954	4.66e-06
ETGL	0.5	0.0045	0.9999
Total Flow kmol/hr	0.0819	0.0411	0.0407
Total Flow kg/hr	3.2813	0.7497	2.5316
Total Flow l/min	0.0499	0.0134	0.0444
Temperature K	298.15	365.51	463.73
Pressure atm	0.7868	0.7528	0.8208
Vapor Frac	0	0	0
Liquid Frac	1	1	1
Solid Frac	0	0	0
Enthalpy cal/mol	-88968.5	-67225.05	-102906.26
Enthalpy cal/gm	-2221.88	-3690.70	-1657.95
Enthalpy cal/sec	-2025.23	-768.61	-1165.93
Entropy cal/mol-K	-72.06	-35.52	-90.19
Entropy cal/gm-K	-1.7996	-1.9504	-1.4530
Density mol/cc	0.0273	0.0509	0.01530
Density gm/cc	1.0937	0.9274	0.9498
Average MW	40.04	18.21	62.06
Liq Vol 60F l/min	0.0505	0.0124	0.0380

Tabla 10. Resultados de las corrientes de alimentación y productos para la mezcla Agua – Etilenglicol.

Nuevamente las modificaciones al experimento se hicieron a favor de una mejor predicción en el simulador. Del mismo modo se observa que el método gráfico tiene una

fracción mol de 0.99 para el agua en destilado, mientras que Aspen tiene 0.9954. Para el etilenglicol en fondos, la fracción mol del método gráfico es de 0.99 y en la simulación es de 0.9999.

Los resultados obtenidos son la base para la experimentación en la columna de la planta piloto, pues teniendo una perspectiva del comportamiento de la misma, se puede planear la destilación con más cuidado.

6.4 EXPERIMENTACIÓN CON LAS MEZCLAS ELEGIDAS

Para hacer el trabajo experimental, fue necesario realizar las curvas de calibración de IR de las mezclas, para poder hacer una estimación de las concentraciones en cada una de las muestras a tomar, ya sea para los productos o en algún plato en específico.

Para preparar las mezclas se utilizaron:

- Agua grado bidestilada.
- Etanol al 96%.
- Etilenglicol al 99.95%.

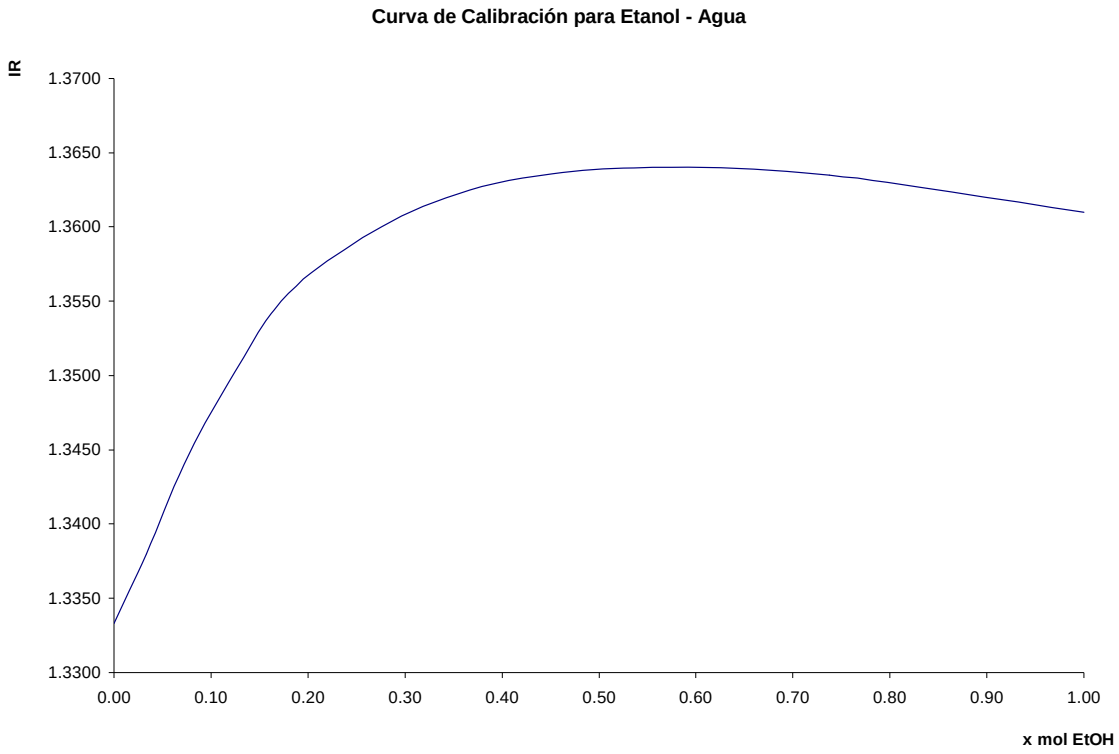

Figura 25. Curva de calibración de IR para le mezcla Etanol – Agua.

Se hizo la consideración para el etanol en lo que respecta a su pureza, dado que por el rango limitado de IR de la mezcla Etanol – Agua, un pequeño cambio en la composición resulta imperceptible en el valor del IR. Los valores para la curva de calibración de la mezcla Etanol – Agua son:

x_{mol} de EtOH	x_{mol} de Agua	IR
0.0000	1.0000	1.3333
0.0335	0.9665	1.3380
0.0724	0.9276	1.3440
0.1180	0.8820	1.3495
0.1722	0.8278	1.3550
0.2378	0.7622	1.3585
0.3188	0.6812	1.3614
0.4213	0.5787	1.3633
0.5552	0.4448	1.3640
0.7374	0.2626	1.3635
1.0000	0.0000	1.3610

Tabla 11. Valores de IR por composiciones para la mezcla Etanol – Agua.

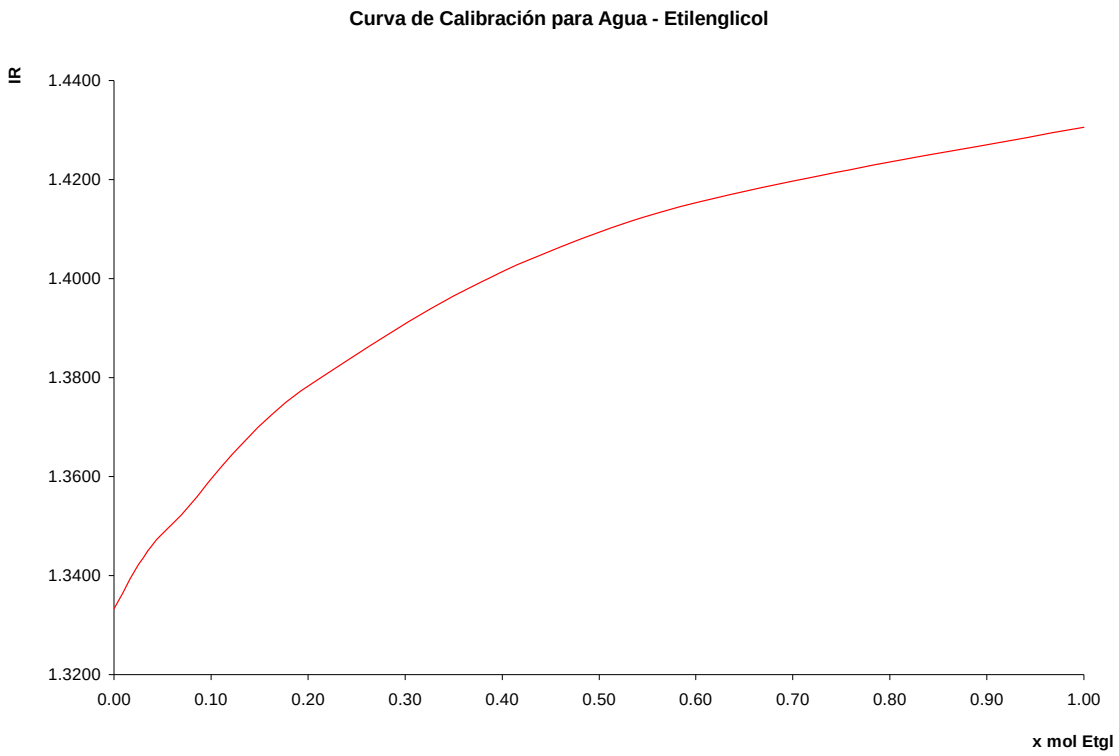

Figura 26. Curva de calibración de IR para le mezcla Agua – Etilenglicol.

Para el caso de la mezcla Agua – Etilenglicol, no existió este problema ya que la el reactivo usado fue de una pureza alta, además, el intervalo de IR es más amplio. Los valores para la curva de calibración de la mezcla Agua – Etilenglicol son:

Fracc. mol de Etgl	Fracc. mol de Agua	IR
0.0000	1.0000	1.3333
0.0347	0.9653	1.3450
0.0749	0.9251	1.3535
0.1219	0.8781	1.3645
0.1775	0.8225	1.3750
0.2446	0.7554	1.3840
0.3269	0.6731	1.3940
0.4304	0.5696	1.4040
0.5643	0.4357	1.4135
0.7445	0.2555	1.4215
1.0000	0.0000	1.4305

Tabla 12. Valores de IR por composiciones para la mezcla Agua - Etilenglicol.

La experimentación con las mezclas se hizo tomando en cuenta los resultados del diseño de los métodos gráficos y rigurosos. Las condiciones de alimentación, composiciones de los productos, relación de reflujo y flujos de productos se establecieron en la torre al momento de realizar la experimentación. Sin embargo, ya en la práctica, se hizo evidente que no es lo mismo realizar una destilación en un simulador de procesos que en una torre real.

Las condiciones de la alimentación y las composiciones de los productos se dejaron como elementos fijos en la torre, debido a que representan la operación idónea del sistema en función del diseño de la torre de la planta piloto.

Fue necesario cambiar la relación de reflujo y los flujos de los productos debido a que los elementos de control y la capacidad de flujos de la torre no corresponden a lo que fue cargado en el simulador como datos iniciales, además, el diseño y la estructura de la torre hacen que el trabajo experimental se ajuste a lo que ofrece la columna.

Para la mezcla Etanol - Agua, se obtuvieron los siguientes resultados:

Etanol - Agua	**Diseño Propuesto**	**Trabajo Experimental**
# de Etapas	10	10
Plato de alimentación	6	6
Composición de la alimentación	0.4 x_{mol} de etanol	0.4 x_{mol} de etanol
Relación de reflujo	0.5	0.8
Flujo de alimentación	3 lt/hr	1 lt/hr
Flujo de destilado	2.26 lt/hr	0.76 lt/hr
Presión de alimentación	598 mmHg	598 mmHg
Temperatura de alimentación	25 ºC	25 ºC
Presión en el condensador	572.15 mmHg	-
Caída de presión en la torre	1 psi	-

Tabla 13. Condiciones experimentales VS condiciones del diseño para la mezcla Etanol – Agua.

En el caso de la mezcla Agua – Etilenglicol se tiene:

Agua - Etilenglicol	Diseño Propuesto	Trabajo Experimental
# de Etapas	10	10
Plato de alimentación	6	6
Composición de la alimentación	0.5 x_{mol} de agua	0.5 x_{mol} de agua
Relación de reflujo	0.25	0.5
Flujo de alimentación	3 lt/hr	1 lt/hr
Flujo de destilado	0.75 lt/hr	0.25 lt/hr
Presión de alimentación	598 mmHg	598 mmHg
Temperatura de alimentación	25 ºC	25 ºC
Presión en el condensador	572.15 mmHg	-
Caída de presión en la torre	1 psi	-

Tabla 14. Condiciones experimentales VS condiciones del diseño para la mezcla Agua – Etilenglicol.

Para el trabajo experimental, un punto importante es que la torre alcance el estado estable en su operación, esto es para poder asegurar que las condiciones del experimento no presenten una variación y puedan considerarse como definitivas. El estado estable se determinó cuando la variación en las temperaturas fue nula y las composiciones de los productos se mantuvieron constantes. En la experimentación el estado estable se alcanzó aproximadamente después de una hora de operación.

Con estas condiciones modificadas, las composiciones que se alcanzaron en los productos son:

Destilado	**IR**	**x_{mol} de Etanol**
	1.3635	0.7374
Fondos	**IR**	**x_{mol} de Agua**
	1.34	0.9535

Tabla 15. Composiciones experimentales de los productos para la mezcla Etanol – Agua.

Destilado	**IR**	**x_{mol} de Agua**
	1.335	0.9950
Fondos	**IR**	**x_{mol} de Etgl**
	1.4290	0.9574

Tabla 16. Composiciones experimentales de los productos para la mezcla Agua – Etilenglicol.

Como puede observarse, la composición de los productos de destilado es similar para los valores propuestos en el diseño gráfico, y aunque las corrientes de fondos no alcanzan las composiciones propuestas, se acercan bastante.

Puede decirse que para los objetivos del laboratorio, se alcanza la separación de las mezclas con las condiciones desarrolladas experimentalmente.

6.5 SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES EXPERIMENTALES

Con las condiciones de la Tabla 13 y la Tabla 14 ya desarrolladas en el laboratorio, puede realizarse una segunda ronda de simulaciones, en la que se manejen dichas condiciones, y así analizar la predicción con Aspen.

Esto también se hace con la finalidad de hacer una validación sobre los datos obtenidos con el trabajo de simulación, para conocer el nivel con el que se puede trabajar de un medio a otro y viceversa.

Los resultados arrojados por la segunda ronda de simulaciones se encuentran en la Tabla 17 y en la Tabla 18. Estos resultados comprueban que las condiciones experimentales funcionan para alcanzar la separación deseada de los componentes de las mezclas.

Puede verse que la pureza de los productos de nueva cuenta ha resultado más alta que la determinada con el método gráfico. Esto pone en evidencia que la base del diseño preliminar resulta ideal para el desarrollo del trabajo.

Etanol - Agua	Alimentación	Fondos	Destilado
Mole Flow kmol/hr			
ETANOL	0.0116	4.84E-06	0.0116
AGUA	0.0174	0.0128	4.60E-03
Mole Frac			
ETANOL	0.4	3.76E-04	0.7164
AGUA	0.6	0.9999	0.2835
Total Flow kmol/hr	0.0290	0.0128	0.0162
Total Flow kg/hr	0.8504	0.2314	0.6190
Total Flow l/min	0.0166	4.17E-03	0.0138
Temperature K	298.15	367.72	344.65
Pressure atm	0.7868	0.8208	0.7528
Vapor Frac	0	0	0
Liquid Frac	1	1	1
Solid Frac	0	0	0
Enthalpy cal/mol	-67607.55	-67011.73	-65487.35
Entropy cal/mol-K	-56.19	-35.19	-65.43
Density gm/cc	0.8504	0.9236	0.7456

Tabla 17. Resultados de las corrientes de alimentación y productos para la mezcla Etanol – Agua para las condiciones experimentales.

Agua - Etilenglicol	Alimentación	Destilado	Fondos
Mole Flow kmol/hr			
AGUA	0.0136	0.0136	2.49E-08
ETGL	0.0136	6.21E-05	0.0135
Mole Frac			
AGUA	0.5	0.9954	1.83E-06
ETGL	0.5	4.52E-03	0.9999
Total Flow kmol/hr	0.0273	0.0137	0.0135
Total Flow kg/hr	1.0937	0.2499	0.8438
Total Flow l/min	0.0166	4.49E-03	0.0148
Temperature K	298.15	365.51	463.74
Pressure atm	0.7868	0.7528	0.8208
Vapor Frac	0	0	0
Liquid Frac	1	1	1
Solid Frac	0	0	0
Enthalpy cal/mol	-88968.55	-67225.05	-1.02E+05
Entropy cal/mol-K	-72.06	-35.52	-90.19
Density gm/cc	1.0937	0.9274	0.9498

Tabla 18. Resultados de las corrientes de alimentación y productos para la mezcla Agua – Etilenglicol para las condiciones experimentales.

6.6 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA TORRE

Un hecho importante es la determinación de las eficiencias de los platos de la columna, para ello, se hizo un Design Specification en Aspen.

Con esta herramienta se le pide al programa ajuste las eficiencias de Murphree por secciones o por etapa, para alcanzar una composición específica de alguno de los productos. Tomando en cuenta que la torre tiene diferentes platos en la zona de rectificación que en la de agotamiento, se hizo el Design Specification para la eficiencia de cada zona.

Para el caso de la mezcla Etanol – Agua, la especificación fue establecida para la composición de agua en los fondos, con un valor de 0.99. Las demás condiciones de operación también se mantuvieron como fueron determinadas experimentalmente. El perfil de eficiencias es:

Etanol - Agua	
# de Plato	Eficiencia de Murphree
1-5	0.7891
6-10	0.3103

Tabla 19. Eficiencias de Murphree experimentales por secciones para la mezcla Etanol – Agua.

En el caso de la mezcla Agua – Etilenglicol, la especificación para Aspen fue de una composición de 0.99 de etilenglicol en fondos, e igualmente se dejaron las condiciones ya establecidas, y los resultados son:

Agua - Etilenglicol	
# de Plato	Eficiencia de Murphree
1-5	0.4185
6-10	0.4342

Tabla 20. Eficiencias de Murphree experimentales por secciones para la mezcla Agua - Etilenglicol.

Los valores de las eficiencias resultan, para la zona de rectificación, de un valor adecuado en el caso de la mezcla Etanol – Agua y bajo para la mezcla Agua - Etilenglicol. Para la zona de agotamiento, la eficiencia resulta baja en ambas mezclas. Esto puede deberse a que resulta difícil mantener un control de temperatura constante en la zona de agotamiento, ya que la resistencia no es muy precisa en cuanto a la cantidad de calor suministrada a la torre.