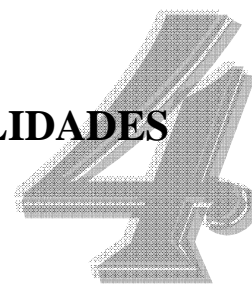


DESTILACIÓN REACTIVA: GENERALIDADES



4.1 Introducción

La destilación reactiva es un proceso en el cual ocurre simultáneamente la reacción química y la separación de productos. Esta es sin duda una de las tecnologías que más ventajas potenciales ofrece para la síntesis química en relación con los procesos convencionales, donde la reacción y la separación se llevan a cabo secuencialmente [182, 183].

Una de las principales ventajas de los procesos realizados por destilación reactiva es la eliminación de equipos para la recuperación de productos y para la recirculación de reactivos no convertidos, lo que lleva a la disminución en la inversión de capital y en costos de operación. Como un ejemplo espectacular se tiene el caso de producción de acetato de metilo en donde se sustituye un reactor y un tren de nueve torres de destilación por una única columna de destilación reactiva, alcanzando el 100% de conversión de los reactivos [184].

La destilación reactiva se caracteriza también porque puede mejorar el grado de conversión de reactivos, la selectividad hacia productos de interés y la transferencia de masa a un punto tal que en algunos casos puede evitar el fouling del catalizador heterogéneo [185].

Al tratarse de un proceso simultáneo reacción-separación, la destilación-reativa es una tecnología usada generalmente en reacciones que se ven limitadas por el equilibrio químico [186], tales como esterificación, alquilación, reacciones de hidrólisis de ésteres, entre otras. Debido a que la reconcentración de reactivos y el retiro constante de los productos permite que se alcance una conversión superior a la del equilibrio químico, semejante a lo que ocurre en un reactor con recirculación, solo que en este caso se acopla la reacción y la separación en un solo equipo.

Otra de las bondades que ofrece esta tecnología es que es considerada como ambientalmente amigable o “tecnología limpia”, porque su implementación genera un menor impacto ambiental en comparación con los procesos convencionales, como ha sido mostrado por nuestro grupo en el caso de producción de acetato de n-butilo a partir del algoritmo WAR [187], la cual es una metodología que permite determinar el potencial del impacto ambiental de un proceso químico.

Entre los procesos simultáneos reacción-separación la destilación reactiva es la tecnología que más ha sido investigada debido a las ventajas que ofrece, principalmente en las reacciones reversibles. Algunas ventajas que hasta el momento no han sido mencionadas es la significativa reducción de catalizador para el mismo grado de conversión, los menores tiempos de residencia, la conversión de los reactantes casi al 100% que junto con el aumento en la selectividad generan una alta productividad en esta tecnología.

Las etapas de análisis y diseño de un sistema reactivo para determinar la viabilidad operacional con el fin de realizar un proceso por destilación reactiva se muestran a continuación:

1. Estudio de la compatibilidad de los componentes de reacción y separación. La reacción debe darse en la fase líquida, para cumplir con las condiciones mínimas de la operación de destilación.
2. Las condiciones de temperatura y presión óptimas de la reacción deben ser compatibles con las condiciones de alta actividad del catalizador.
3. Análisis de la influencia del componente de separación sobre la reacción. Termodinámica topológica y análisis de la estática (numeral 4.2).
4. Trayectoria de operación. Diagrama de flujo simplificado.
5. Modelamiento matemático.
6. Simulación.
7. Experimentación física. Lo mínima posible

El problema básico en el diseño de la destilación reactiva consiste en la estimación de la posibilidad de obtener los estados estables con máxima conversión y selectividad. La etapa principal para el diseño de una tecnología en la producción de sustancias orgánicas es la síntesis del diagrama de flujo óptimo que asegure la calidad del producto requerida. Para esto lo más adecuado es partir de una metodología que permita establecer la secuencia de síntesis de esquemas tecnológicos de procesos realizados por destilación reactiva.

Para tal fin se destaca el análisis de la estática que permite determinar el esquema tecnológico más apropiado para procesos realizados por destilación reactiva. Este método tiene las siguientes ventajas sobre otros métodos conocidos.

- Necesita pocos datos iniciales: parámetros del modelo del equilibrio fásico y químico, y la estequiometría de la reacción.
- Es aplicable a mezclas multicomponentes y multirreactivas.
- Es aplicable a mezclas altamente no ideales, como azeotrópicas y con solubilidad limitada.
- Permite seleccionar los estados estables límites factibles.
- Puede ser fácilmente formalizado como algoritmo.
- Reduce el tiempo computacional y simplifica laboriosos y extensos experimentos a gran escala.
- El método ha sido utilizado satisfactoriamente en el diseño de muchos procesos industriales.

El análisis de la estática posee un fundamento científico para realizar la síntesis cualitativa del esquema tecnológico que precede al modelamiento matemático y experimental, lo cual permite una disminución de tiempo y capital en el diseño de los procesos realizados por destilación reactiva.

Los motivos anteriores, así como la experiencia del grupo de investigación en la aplicación del análisis de la estática para realizar la síntesis de esquemas tecnológicos en procesos realizados por destilación reactiva, lleva a utilizar este método para generar el esquema de procesamiento de acetato de n-butilo por destilación reactiva.

4.2 Conceptos Básicos del Análisis de la Estática

La fundamentación teórica del análisis de la estática requiere una descripción de los conceptos básicos utilizados en el estudio que permite determinar la configuración de la torre más adecuada en un proceso realizado por destilación reactiva.

Mezcla inicial: Esta mezcla corresponde a la mezcla virtual de todos los flujos que alimentan la columna de destilación reactiva. La composición de una mezcla inicial puede ser calculada usando la ecuación 4.1:

$$X_i^F = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^n F_j X_i^{F_j} \quad (4.1)$$

Donde F indica el flujo total alimentado, F_j se refiere al flujo de alimento de la etapa j . $X_i^{F_j}$ es la fracción molar del componente i en la corriente F_j . Y X_i^F es la composición de la mezcla inicial. n es el número total de etapas en la torre de destilación reactiva.

Mezcla pseudo inicial: Está formada por la mezcla virtual de todos los flujos de productos. Además se consideran los modos con número de flujos de productos no más de dos. Aquí, la composición de la mezcla pseudoinicial puede expresarse por la ecuación 4.2. La composición de la mezcla pseudoinicial corresponde a la estequiometría de la reacción química y está localizada sobre superficies lineales, también llamadas superficies de interacción química. La distribución de las composiciones, y consecuentemente, de los estados estables están inequívocamente determinadas por la composición de la mezcla pseudoinicial a modo de separación ∞/∞ (en particular separación directa e indirecta). Por lo tanto, la composición de la mezcla pseudoinicial es además considerada como un estado estable.

$$X_i^* = \frac{1}{F^*} \left(P X_i^P + W X_i^W + \sum_{j=1}^n U_j X_i^{U_j} \right) \quad (4.2)$$

P es el flujo de producto de la corriente principal y X_i^P es la fracción molar del componente i en esta corriente. W es la velocidad de flujo de fondos y X_i^W es la fracción molar del componente i en la corriente. U_j es la velocidad de flujo retirado desde la etapa j con una fracción molar del componente i de $X_i^{U_j}$. Y X_i^* es la composición de la mezcla pseudo-inicial.

Superficie de interacción química: está descrita por la ecuación 4.3. La dimensión de la superficie de interacción química es igual al número de reacciones químicas linealmente independientes. Los límites de la destilación en el simplex originan las regiones de destilación.

$$X^* = \left[1 - \sum_{\rho=1}^m \nu_{\rho} \xi_{\rho} \right] X^F + \sum_{\rho=1}^m \Omega_{\rho} \xi_{\rho} \quad (4.3)$$

ξ_{ρ} Es el avance de la reacción ρ . ν_{ρ} es el coeficiente estequiométrico total de la reacción química. $\Omega_{\rho} = (\nu_{1\rho}, \nu_{2\rho}, \dots, \nu_{c\rho})^T$ Es el vector de coeficientes estequiométricos de la sustancia i en la reacción ρ . m es el numero total de reacciones. X^* Es la superficie de interacción química generada.

Región de destilación: es el área o volumen del simplex concentracional llena con un manojo de trayectorias de destilación. Los límites de la destilación en el simplex originan las regiones de destilación.

Subregión de destilación: corresponde a los subgrupos de todas las mezclas iniciales, para las cuales en el modo de separación dado (directa o indirecta) corresponden a las composiciones de flujo de productos idénticas cualitativamente.

Traectoria tentativa de los procesos de destilación reactiva: permite estimar un perfil de composición. Este perfil permite observar la posibilidad de alcanzar una productividad de reacción apropiada.

En el caso del modo de separación ∞/∞ ni la posición de la alimentación ni la distribución de la zona de reacción tiene influencia sobre la trayectoria probable. La trayectoria sólo depende de la composición de la mezcla realmente separada en la columna de destilación reactiva (por ejemplo, la mezcla pseudoinicial). A su vez, la composición de la mezcla pseudoinicial está definida por la composición de la mezcla inicial y del avance para cada una de las reacciones.

Dentro de la estructura del modelo para los procesos de la destilación reactiva usados en el análisis de la estática y los correspondientes modos de separación ∞/∞ , los parámetros de operación son la relación del flujo de productos (P/W), y también el volumen y la localización de la zona de reacción. En el caso de separaciones formuladas, tal como directa o indirecta, el número de parámetros de operación disminuye a una unidad. En particular, los procesos de destilación reactiva con una reacción química se tiene solamente un parámetro de operación (por ejemplo, la relación P/W).

Superficie de equilibrio químico: es un grupo de composiciones en fase líquida para las cuales la velocidad de global de todas las reacciones químicas son iguales a cero. Esta superficie divide el simplex concentracional para cada reacción en áreas de realización directa e inversa. La dimensión de la superficie de equilibrio químico está determinada por la regla de fases de Gibbs.

Estado estable límite: es un estado correspondiente al rendimiento máximo del producto objetivo.

4.3 Principales Etapas del Análisis

Al diseñar procesos que involucran sistemas reactivos, siempre se tienen exigencias operacionales bajo las cuales se debe establecer el esquema de procesamiento, como son:

- Demanda de energía mínima.
- Conversión y selectividad máximas (máximo rendimiento del producto).
- Limitaciones para los niveles de impurezas en los flujos de productos.

Más adelante, el análisis de la estática utiliza determinadas concepciones acerca de los procesos de destilación reactiva, asumiendo lo siguiente:

- Se consideran las reacciones en equilibrio
- La columna de destilación reactiva opera a modo de separación ∞/∞ .

El orden para determinar los estados estables límites dependen de las propiedades de los procesos de destilación reactiva, más exactamente en las posibilidades de localizar la zona de reacción en secciones específicas de la columna de destilación reactiva. Así, esto es un paso clave para seleccionar el método de diseño correspondiente a los procesos de destilación reactiva.

4.4 Sistemas con Zona de Reacción Localizada

Ahora consideraremos el esquema del proceso, donde hay productos inestables intermedios, como una reacción total con reactantes químicos estables (reactantes y productos). Su estabilidad implica la posibilidad para separarlos como compuestos puros o como una mezcla con reactantes usando el proceso combinado de separación con reacción química.

La estrategia del análisis en este caso incluye lo siguiente:

- Localización de la zona de reacción.
- Construcción del diagrama de destilación y ubicación de las regiones y subregiones de destilación.
- Especificación de las composiciones de alimentación.
- Búsqueda de los estados estables límites desde la dependencia $P/W=f(X^*)$.
- Se comprueba la posibilidad de los estados estables predichos.
- La trayectoria probable debe desarrollarse en el simplex concentracional total: Selección de la variante de organización de la destilación reactiva.
- Síntesis del diagrama de flujo completo para la producción del producto deseado

Este proceso de análisis y determinación del esquema de procesamiento para la síntesis de acetato de n-butilo por destilación reactiva, es descrito en el siguiente capítulo.

SÍNTESIS DE ACETATO DE N-BUTILO POR DESTILACIÓN REACTIVA: ANÁLISIS DE LA ESTÁTICA



5.1 Introducción

El análisis de la estática se ha convertido en la principal herramienta en el estudio cualitativo de los procesos de destilación reactiva, para determinar la viabilidad operacional y la mejor configuración de torre (localización de la zona de reacción) con una mínima información inicial y basado en el análisis de termodinámica topológica, a partir de la selección de los estados estables límites. Las consideraciones que deben hacerse al realizar el análisis de la estática son: (i) reacción en condiciones de equilibrio y (ii) la columna de destilación reactiva opera a reflujo y eficiencia total, es decir condiciones (∞/∞).

Dentro de la estructura del modelo para los procesos de la destilación reactiva usados en el análisis de la estática y los correspondientes modos de separación ∞/∞ , los parámetros de operación son la relación del flujo de productos (P/W), el volumen y la localización de la zona de reacción, que pueden alterarse dentro de algunos límites del avance de cada reacción química o cambiando el volumen de las zonas de reacción y su arreglo dentro de la columna. Al mismo tiempo, como parámetro de operación es posible considerar al avance de las reacciones químicas. Además en el caso de separaciones formuladas, tal como directa o indirecta, el número de parámetros de operación disminuye a la unidad. En particular, con los procesos de destilación reactiva con una reacción química se tendrá sólo un parámetro de operación (por ejemplo, la relación P/W) [60].

Uno de los principales problemas encontrados para extender la tecnología de la destilación reactiva a otro tipo de sistemas reactivos, es que esta limitada por la resistencia térmica y la actividad catalítica a altas temperaturas de los catalizadores sólidos necesarios en la reacción. Este impacto ha sido especialmente fuerte en sistemas reactivos que requieren catalizadores con sitios ácidos de Brønsted, por ejemplo las resinas ácidas de intercambio iónico, utilizadas en reacciones de: alquilación, acilación, transalquilación, isomerización, eterificación, esterificación, hidratación y nitración [188, 189].

Recientemente sólo algunas de estas reacciones químicas que son de gran interés industrial y académico se han podido estudiar bajo condiciones de destilación-reactiva [190-193], debido básicamente a la baja resistencia térmica de los catalizadores con sitios ácidos de Brönsted, como los que se encontraron en las resinas comerciales acidosulfónicas con base estireno tipo Amberlyst-15, catalíticamente activa solo hasta 120°C [194].

Un claro ejemplo del creciente interés sobre las condiciones en que mejor trabajan los catalizadores con sitios ácidos que se pueden comportar como ácidos de Brönsted, está la creciente razón de información publicada sobre la comparación y el diseño de catalizadores para reacciones de esterificación [195-200], en las cuales la mayoría se encargan del proceso de síntesis de acetato de n-butilo, el éster de mayor temperatura de ebullición que se obtiene por destilación reactiva utilizando resinas ácidas, que además es un proceso que goza de alto rendimiento, pero que en la práctica debe realizarse a presión de vacío.

Lo anterior ilustra la gran necesidad que existe en cuanto a la modificación y diseño de catalizadores sólidos ácidos con propiedades térmicas mejoradas, que bajo estas condiciones de operación tenga en principio una actividad catalítica semejante a la de las resinas comerciales disponibles, como el Amberlyst-15. Esto con el fin de implementarlas en los procesos de destilación reactiva, consecuente con el trabajo realizado en la primera parte de este trabajo. Como ejemplo de la posible extensión de los catalizadores propuestos están las esterificaciones de ácido acético con alcoholes como el amílico e iso-amílico; cuyos productos son compuestos de gran importancia en la industria de la perfumería y alimentos, estos aun se producen en tecnologías convencionales reacción-tren de separación que tanto requerimiento energético tienen y más aún para este tipo de mezclas reactivas se necesita una gran cantidad de equipos de separación para obtener el producto final con un grado de pureza comercialmente importante. Este problema es más evidente para la esterificación de ácidos grasos que generalmente se hace con catalizadores homogéneos.

Aunque la modificación y diseño de catalizadores a partir de técnicas de soporte y funcionalización con matrices inorgánicas es una práctica que crece rápidamente y que tiene como objetivo el mejoramiento de las propiedades estructurales, térmicas y mecánicas de los catalizadores convencionales, en muy pocas ocasiones se ha buscado el efecto

sinérgico que puede lograrse al acoplar estos avances con tecnologías no-convencionales, como son los procesos simultáneos reacción-separación. Tal es el caso que en la mayoría de publicaciones referidas a la síntesis y modificación de estos materiales funcionales pocas pruebas han sido realizadas sobre sistemas reactivos.

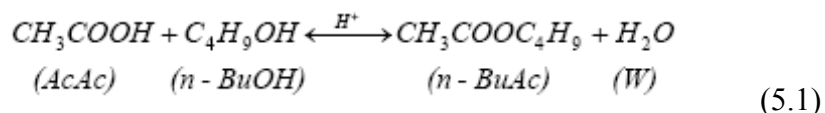
En este sentido, un trabajo previo realizado por nuestro grupo (Cardona et-al) [201], y que se desarrollo de forma paralela a esta tesis de maestría, mostró el efecto que podría ocasionar la síntesis de estas dos ramas de la ciencia; la de los materiales y la de los procesos no-convencionales, a partir de la comparación energético-económica entre los procesos de producción de acetato de n-butilo por destilación reactiva a las presiones absolutas de 0.33 y 1 atm. Allí se evidenció las potenciales ventajas económicas que se tienen con solamente llevar a cabo este proceso a presión atmosférica, pero bajo el supuesto que se cuenta con un catalizador sólido ácido de propiedades químicas semejantes a las de la resina comercial Amberlyst-15, la cual debe contar con una mayor resistencia térmica. Los resultados indican que se logra una disminución del 26.6% en el consumo energético y del 20% en el costo de inmovilizado, sin considerar los gastos del catalizador. Este hecho fue alentador para motivar y direccionar esta investigación hacia la síntesis de nuevos materiales catalíticos con sitios ácidos de Brønsted de propiedades térmicas mejoradas, que pueden ser extendidos a una gran gama de reacciones importantes desde el punto de vista comercial. Además aquí se muestra el aumento en la productividad del 9% a partir de modelos económicos rigurosos mediante optimización MINLP.

La importancia comercial del acetato de n-butilo se destaca porque es un los solvente ampliamente utilizado en la industria del barniz, pintura, farmacéutica, cosmética, cuero, películas fotográficas, plásticos y como intermediario en la manufactura de adhesivos. A pesar de las modernas tendencias en la eliminación de los solventes volátiles, se espera que el consumo del acetato de n-butilo crezca en el futuro cercano debido a que este tiene un bajo impacto en el ambiente [202] comparado con otro tipo de solventes comunes como el tóxico y teratogénico etoxietilacetato [151, 199]. La demanda mundial anual del acetato de n-butilo es superior a 360 millones de libras [203], debido a que se esta popularizando como sustituto de solventes aromáticos [204] y del acetato de etilo.

5.2 Estructura del Proceso de Destilación Reactiva

El análisis de la estática ha sido suficientemente ilustrado en [182] y trabajado en [182, 186, 205, 206]. A continuación se toman algunos conceptos básicos mostrados en [60], para entender el procedimiento seguido en el diseño de la columna de destilación reactiva para la síntesis de acetato de n-butilo a partir de esterificación de ácido acético con n-butanol por destilación reactiva.

El acetato de n-butilo se puede producir a partir de la reacción reversible de esterificación de ácido acético con n-butanol que se lleva a cabo en fase líquida y con la presencia de un catalizador fuertemente ácido.



Bajo condiciones del medio de reacción ácidas y de altas temperaturas como las que requiere el proceso de destilación reactiva es posible que ocurran reacciones laterales que llevan a subproductos formados desde el n-butanol. La deshidratación lleva a butenos, la auto-condensación a éteres, el n-butanol y los butenos podrían seguir reaccionando hacia otros productos en una serie de posibles reacciones. Entre las principales reacciones laterales que podrían darse están la isomerización del n-butanol hacia s-butanol, así como la respectiva esterificación del ácido acético con el s-butanol y la posible transesterificación entre el acetato de n-butilo y el s-butanol; la eventualidad teórica de otras nueve reacciones laterales ha sido descartada experimentalmente [199]. Para este caso de análisis solamente la reacción principal es tenida en cuenta.

Como ya se había dicho la presión del sistema estará limitada por la resistencia térmica del catalizador. La resina comercial Amberlyst-15 se desactiva a temperaturas superiores a 120°C, aunque en aplicaciones comerciales esta trabaja solamente hasta 110°C, por lo que convencionalmente la producción de acetato de n-butilo por destilación-reativa se realiza a 0.33 atm [187, 202], debido a que la temperatura normal de ebullición del acetato de n-butilo es 126°C.

Para este caso se realiza la síntesis del esquema tecnológico para la producción de acetato de n-butilo por destilación reactiva a presión atmosférica, debido a que a esta condición es a la cual debe evaluarse el material mesoporoso funcionalizado con los grupos mercaptopropil. Bajo esta condición de presión operativa y considerando que no se presentan reacciones laterales durante el proceso, el sistema reactivo presenta diez puntos singulares. Los cuatro componentes puros y seis azeótropos distribuidos en dos ternarios entre los que se encuentra el de mínima temperatura de ebullición global. Además hay tres heterogéneos y uno de máxima temperatura de ebullición. Estos puntos singulares son listados en la Tabla 6 en orden ascendente de temperaturas de ebullición.

Tabla 6. Caracterización termodinámica de la mezcla reactiva

Temp. (°C)	Clasificación	Tipo	No. Comp.	AcAc	n-BuOH	n-BuAc	H ₂ O
90,48	Nodo Inestable	Heterog	3	0	0,1013	0,1978	0,7009
90,95	Silla	Heterog	2	0	0	0,2821	0,7179
92,52	Silla	Heterog	2	0	0,2513	0	0,7487
100,02	Silla	Homog	1	0	0	0	1
116,9	Silla	Homog	2	0	0,778	0,222	0
117,68	Silla	Homog	1	0	1	0	0
118,01	Silla	Homog	1	1	0	0	0
122,55	Silla	Homog	3	0,4524	0,336	0,2117	0
122,62	Nodo Estable	Homog	2	0,4876	0,5124	0	0
126,01	Nodo Estable	Homog	1	0	0	1	0

Como consecuencia de esta distribución de puntos singulares, el simplex concentracional obtenido para el sistema de producción de acetato de n-butilo queda dividido en dos regiones de destilación, que se muestran en la Figura 50.

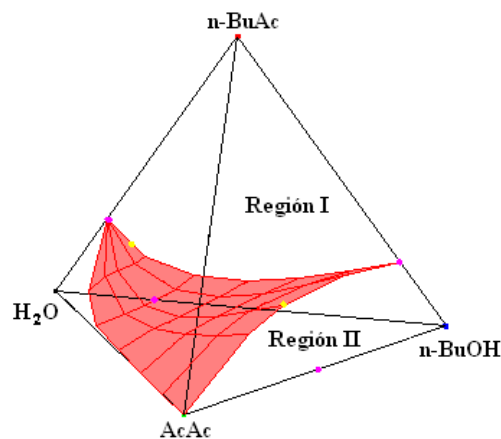


Figura 50. Mapa de curvas de residuo del sistema reactivo a 1 atm

Las líneas de destilación parten del azeótropo ternario de mínimo punto de ebullición BuOH-BuAc-H₂O y llegaran, según la región de operación, bien sea al azeótropo binario AcAc-BuOH (Región II), o al n-BuAc (Región I). Como consecuencia de esta distribución, puede entonces concluirse que existe una región de operación que permite obtener el acetato de n-butilo de alta pureza como fondo formulado. Por tanto, el análisis de la estática del sistema estará encaminado a facilitar dicha formulación de corrientes, cumpliendo tanto las condiciones de pureza, como una adecuada recuperación de productos y conversión de reactivos. Las convenciones usadas en los diagramas cuaternarios presentados para describir el análisis de la estática del sistema serán las siguientes:

- Acetato de n-Butilo (n-BuAc).
- Agua (H₂O).
- Ácido acético. (AcAc)
- n-Butanol. (n-BuOH)
- Azeótropo binario.
- Azeótropo ternario.
- Superficie tentativa de la separatriz cuaternaria.
- Plano de interacción química y línea de avance de la reacción.
- líneas de balance para la operación de destilación por fondo formulado.

Para graficar las líneas de avance de reacción se procede a hallar el polo o punto de origen de las mismas, conocido como polo π . La ubicación del polo π esta determinada por:

$$L_1 = L_2 \left(\frac{N_P}{N_R - N_P} \right) \quad (5.2)$$

Donde L_1 es la distancia al polo π , L_2 la distancia desde la alimentación estequiométrica hasta el punto de formación de productos, N_P son las moles de productos, y N_R las moles de reactivos. Para la producción de acetato de n-butilo el total de coeficientes estequiométricos es cero, y las moles finales son iguales a las iniciales. Las moles de reactivos consumidos y las moles de productos formados serán iguales. Entonces la distancia al polo π será infinita, y las líneas de interacción química serán paralelas.

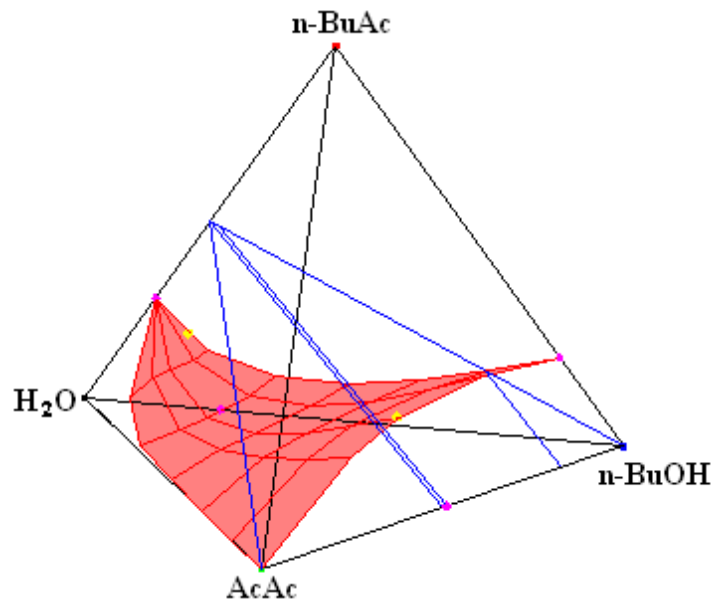


Figura 51. Regiones de separación y superficie de existencia de las líneas de avance de la reacción.

Para este análisis existen tres composiciones de alimentación que actúan como puntos límites entre las diferentes alimentaciones posibles; la región de exceso de n-butanol para la cual cuando el avance de reacción es igual a la unidad genera una mezcla sobre la separatriz cuaternaria; la alimentación estequiométrica; el azeótropo AcAc–n-BuOH, y a la composición de exceso de ácido acético.

5.2.1 Región de Límite de n-Butanol – Azeótropo Binario

La región esta delimitada por las composiciones molares de ácido acético de 0.4876 para el azeótropo y de 0.2146, que es el mínimo necesario a partir del cual las líneas de avance de la reacción permiten la separación del acetato de n-butilo por los fondos de la torre, es decir que cruza la separatriz. Para toda la región se tiene un exceso de n-butanol, o lo que es lo mismo, el ácido acético es el reactivo límite. En esta región se comparan dos composiciones de alimentación, una intermedia y el límite, en el azeótropo binario.

La Figura 52 muestra la línea de interacción química (azul) para la mezcla de alimentación que contiene 0.3254 fracción molar de AcAc. Esta composición corresponde al punto medio de la región analizada. Además se presentan las líneas de balance (verde) en función del avance de la reacción.

Las líneas de balance permiten obtener directamente la relación entre los flujo de destilado a fondos P/W, esta relación es mostrada en la Figura 53 para la alimentación molar de AcAc de 0.3254. Por medio de la relación P/W se determina cual es la alimentación óptima que genera la mayor cantidad de productos a máxima conversión.

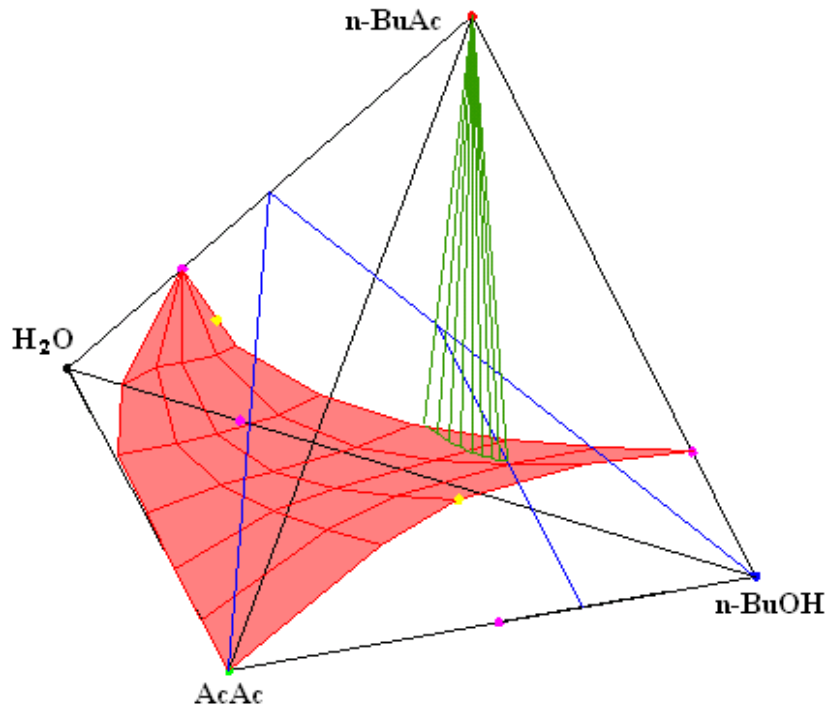


Figura 52. Líneas de interacción química y de balance para la alimentación molar de 0,3284 en AcAc

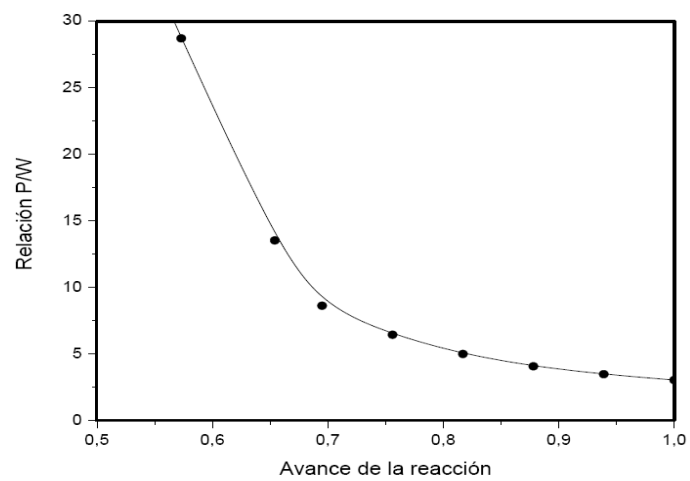


Figura 53. Relación P/W en función de la conversión para alimentación molar de 0,3284 en AcAc