



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química

DISEÑO DE GRADOS DE LIBERTAD

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO QUIMICO
p r e s e n t a :
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS TESIS
ADQ M. T. 300 ~~376~~
FECHA 1978 ~~1977~~ 370
PROC _____



JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN

EL TEMA:

PRESIDENTE: Jorge Martínez Montes.
VOCAL: Roberto Andrade Cruz.
SECRETARIO: Enrique Bravo Medina.
1er. SUPLENTE: Rafael García Nava.
2do. SUPLENTE: Alfonso Mondragón M.

Sitio donde se desarrolló el tema:

BIBLIOTECA FACULTAD DE QUIMICA U.N.A.M.
BIBLIOTECA CENTRAL U.N.A.M.
BIBLIOTECA PETROLEOS MEXICANOS.
BIBLIOTECA INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.
BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE QUIMICA.

Nombre completo y firma del sustentante:

RODRIGUEZ COLIADO ROBERTO

Rodríguez Collado

Nombre completo y firma del asesor del tema:

BRAVO MEDINA ENRIQUE

Bravo Medina

A TI SEÑOR:

"Por ayudarme a encontrar en el
recorrido de éste camino a un
amigo y en cada amigo una
bendición"

A MI QUERIDO PADRE:

Sr. Amador Rodríguez de la Cruz

Quien con su esfuerzo, confianza,
y cariño iluminó mi vida en éste
arduo camino que solo con su ayu
da pude recorrer.

A MI ADORADA MADRE:

Sra. Ma. del Carmen Collado de R.

Quien con su amor, ternura, y
desvelo dió a mi vida un pen-
samiento que iluminó mi cami-
no en la lejanía.

A ELLOS MI ETERNO AGRADECIMIENTO.

Por haber dejado parte de sus
vidas para que concluyera una
etapa de mi existencia:

"La de Estudiante"

A LA MEMORIA DE MIS QUERIDOS ABUELITOS:

Sr. Concepción Rodríguez Rosaldo.

Sra. Leandra de la Cruz de R.

Sr. Joaquín Collado Hernández.

Sra. Delfina Caraveo de C.

Por haberme dado unos padres
ejemplares.

A MIS QUERIDOS HERMANOS:

José Concepción.

José Cruz

Antonio.

Amador.

Ma. del Carmen.

Jorge.

Martha.

Ma. Elena.

Asunción.

Por recorrer junto conmigo éste
camino brindándome su apoyo y
comprensión en cada momento.

CON CARIÑO A MIS HERMANOS POLITICOS:

Aurelia.

Victor Manuel.

Alma Rosa.

Ma. Natividad.

Por su apoyo y comprensión.

A MIS ADORADOS SOBRINOS:

Luis Roberto.

Claudia Esther.

Susana del Carmen

Rosa Virginia.

Cinthya de Jesús.

Laura.

Antonio.

José.

Para que vean en mí un amigo que los apoye en la superación de lo realizado hasta ahora.

CON CARIÑO A:

Sr. Antonio Caraveo Jimenez.

Sra. Irene Burelo de C. (IN MEMORIAN)

Sr. Santos Prados Rodríguez.

Sra. Aura Caraveo de P.

Porque sus consejos y fé siempre
han sido un aliciente para mi
vida.

CON AGRADECIMIENTO A MIS MAESTROS DE:

Facultad de Química U.N.A.M.

Esc. Preparatoria de Comalcalco, Tab.

Esc. Secundaria Fed. de Comalcalco, -
Tab.

Por haberme transmitido sus
conocimientos y experiencias
durante el recorrido de ésta
etapa.

CON GRATITUD AL:

Ing. Enrique Bravo Medina.

Quien con interés, supo
dirigir el presente trabajo.

A LOS MIEMBROS DEL JURADO:

Quienes finalmente dieron
el verdadero valor a los
esfuerzos puestos en ésta
tesis.

A TODOS MIS FAMILIARES Y AMIGOS:

Porque son partícipes de
todo mi sentir y pensar.

I N D I C E

	Pág.
CAPITULO I.- INTRODUCCION.	1
CAPITULO II.- GENERALIDADES.	4
a).- Definiciones	4
1.- Grados de Libertad.	
2.- Componentes.	
3.- Fase.	
4.- Sistemas.	
5.- Proceso.	
6.- Corriente.	
7.- Elementos y Unidades.	
8.- Variables.	
9.- Tipos de Variables.	
b).- Restricciones	9
1.- Tipos de Relaciones de Restricción.	
2.- Restricciones Inherentes.	
3.- Restricciones de Balances de Materias.	
4.- Restricciones de Balances de Energía.	
5.- Restricciones de Distribución de Fases.	
6.- Restricciones de Equilibrios Químicos y Físicos.	
CAPITULO III.- GRADOS DE LIBERTAD.	18
a).- Principios del Método -	19

	Pág.
de Análisis.	
b).- Acercamiento Sistemático del Método.	24
c).- Método Propuesto.	25
d).- Análisis de Elementos Típicos.	27
1.- Corriente Individual.	
2.- Divisor de Corriente.	
3.- Mezclador.	
4.- Cambiador de Calor.	
5.- Bombas, Calentadores y Enfriadores.	
6.- Condensador o Reherbido-- dor Total.	
7.- Condensador o Reherbido-- dor Parcial.	
8.- Etapa Simple de Equilibrio o Plato Teórico.	
e).- Análisis de Elementos Complejos.	52
1.- Etapa o Plato de Alimentación.	
2.- Etapa con Corriente Lateral.	
3.- Columna de Absorción o Extracción.	
4.- Condensador o Reherbido-- dor Total con Reflujo.	
f).- Análisis de Unidades y Unidades Complejas.	67
1.- Columna de Absorción o	

Extracción con dos Alimentaciones.

- 2.- Unidad de Extracción - con Extractor de Reflujo.
- 3.- Unidad de Extracción - con dos Alimentaciones y Reflujo Refinado.
- 4.- Unidad de Destilación - con una Alimentación - Condensador Total y Reherbido Parcial.
- 5.- Unidad de Destilación - con una Alimentación, - un Condensador Parcial y un Reherbido Total.
- 6.- Columna de Destilación - con una Alimentación - una corriente Lateral, - Condensador Total y Reherbido Parcial.

CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES. 96

CAPITULO V.- BIBLIOGRAFIA. 99

CAPITULO I.

INTRODUCCION .

La solución de múltiples problemas de separación de multicomponentes, están completas cuando el Ingeniero diseñador conoce la composición, temperatura, presión y velocidad de flujo de cada una de las corrientes asociadas con la unidad de separación.

Una unidad de proceso en operación proporciona continuamente un conjunto de soluciones y por consiguiente puede ser considerada como una máquina computadora, la cual desempeña el mismo trabajo. Una o más alimentaciones de composición, temperatura, presión y velocidad, dadas son introducidas a la computadora o unidad de operación para ser analizadas o procesadas.

Pero la computadora o unidad de operación está limitada por ciertas características físicas propias tales como: diámetro, número y eficiencia de etapas, localización del plato de alimentación, condensación y capacidad de recirculación, eficiencia de aislamiento, seguridad en la temperatura y presión de trabajo, etc. En concordancia con esas limitaciones físicas, el operador o Ingeniero diseñador impone otras restricciones arbitrarias para ciertas especificaciones de velocidad de las corrientes, relaciones de velocidades, concentraciones de las corrientes, recuperación de ciertos productos u otras restricciones de operación deseadas. Sujeta a éstas restricciones, la computadora o unidad de operación produce un conjunto único de

resultados, dichos resultados serán dados en forma de composición, temperatura, presión y velocidad - de flujo de la corriente o corrientes involucradas.

El propósito de cualquier método de diseño es aproximarse a los resultados que una unidad en operación producirá.

El grado de exactitud requerido en la aproximación de los resultados estará determinado por el método de diseño utilizado. En el presente ninguno de los métodos posibles proporcionarán los resultados dados por la unidad en operación además - de que algunas son completamente abstractos para - servir a los propósitos del Ingeniero diseñador.

Debido a que la unidad operando requerirá - un cierto número fijo de restricciones que producirán la separación deseada, también el método de diseño requerirá un cierto número fijo de especificaciones si la solución converge con el conjunto de respuestas deseadas. Sin embargo, pocas restricciones permitirán a la unidad o método de cálculo a - converger con algunas otras soluciones que el Ingeniero diseñador desee. También existen muchas restricciones que no pueden ser admitidas por la unidad o método de cálculo utilizado para el diseño, - debido a que si muchas son especificadas, otras deben ser ignoradas si las convergencias para cualquier solución es obtenida.

La habilidad para determinar el número exacto de restricciones que deben ser arbitrariamente impuestas por el Ingeniero diseñador tienen hechos más importantes con la llegada de la computadora -

de alta velocidad, puesto que hace posible la reproducción de la unidad operando para casi cualquier grado de exactitud deseado en un mínimo de tiempo. Sin embargo, debido a que la computadora carece de intuición el problema debe de estar definido exactamente, esto es, el número correcto de restricciones (especificaciones de diseño) deben ser conocidas para ser alimentadas a la computadora.

La finalidad de la presente tesis es la proporcionar un método para clasificar y determinar esas restricciones para calcular los grados de libertad o variables de diseño a las unidades más usadas en Ingeniería Química, así como también ayudar al estudiante de ésta carrera a la formación de criterios para la solución de éstos problemas que comúnmente encontrarán en la vida profesional.

CAPITULO II

GENERALIDADES.

J. WILLARD GIBBS, estableció por primera vez en el año de 1876, que hay una relación fija entre el número de grados de libertad, número de componentes y número de fases presentes, mediante la relación conocida como "REGLA DE LAS FASES", cuya expresión matemática es:

$$N = C + 2 - \emptyset$$

En donde:

N = Número de grados de libertad

C = Número de Componentes

\emptyset = Número de fases presentes

Esta relación es una de las más importantes dentro de la Ingeniería Química debido a sus diversas aplicaciones, dentro de las muchas aplicaciones tenemos como por ejemplo, el cálculo de los grados de libertad en cualquier sistema sencillo donde existen una, dos o tres fases en equilibrios, así como también ésta relación representa los fundamentos básicos en el cálculo de los grados de libertad en equipos de procesos más complicados de Ingeniería Química como por ejemplo: Condensadores, reherbidores, divisores, columnas de destilación, absorción, etc.]

a).- DEFINICIONES :

Antes de continuar, es necesario definir y explicar con algunos detalles, ciertos términos -

que serán empleados frecuentemente. Estos son:

1.- GRADOS DE LIBERTAD.

Conocidos también como "VARIANCIA" ó "VARIABLES DE DISEÑO". Se definen por el número de cantidades variables independientes tales como temperatura, presión y concentración, que pueden modificarse a voluntad sin producir ninguna alteración en el número de fases. En la presente, lo definiremos, como el número de variables independientes que el Ingeniero diseñador puede especificar arbitrariamente para definir completamente el diseño del problema.

El número de grados de libertad (N_i) resulta, de la diferencia entre el número de variables (N_v) y el número de restricciones (N_c), en el diseño de un problema dado. ecuaciones que se incorporan para el diseño.

2.- COMPONENTES.

De un sistema, es el número mínimo de sustancias en función de las cuales se pueden describir separadamente las composiciones de cada una de las fases del sistema. Existen tres tipos o clases de componentes que serán necesarios definir: el componente Analítico, el componente fundamental o final y el componente termodinámico.

Los componentes analíticos son sustancias químicas seleccionadas tal que su número es el mínimo requerido en un análisis para fijar la distribución y concentración química de todas las variables independientes de componentes atómicos.

Los componentes finales o fundamentales, son sustancias químicas que van a través de un sistema sin ser químicamente alteradas; representan el número mínimo requerido para describir todos los componentes analíticos del sistema.

La idea de un componente termodinámico es una que GIBBS, utilizó en la derivación de la Regla de las fases, se definen como el número menor de sustancias químicas.

Independientemente variables del cual el material dado en todas sus variaciones pueden ser producidos. En la presente el uso del componente termodinámico está ampliamente referido a esas simples corrientes de fases que están en equilibrio heterogéneo con los demás.

El número de componentes puede estar expresado como un número "C" componentes, cuando no se conocen exactamente los componentes del sistema; y como un número concreto de componentes cuando si se conocen.

3.- FASE.

Una fase es una parte de un sistema, uniforme en todo lo que se refiere a su composición química y a sus propiedades físicas y la cual está separada de otras partes homogéneas del sistema por medio de superficies límites.

4.- SISTEMAS.

El término sistema se refiere a una sustan-

cia o grupo de sustancias bajo consideración, describe el material en flujo, que puede ser limitado por una frontera imaginaria como uno desee para incluir alguna parte del equipo físico considerado.

5.- PROCESO.

El término Procesos se refiere a los cambios que tienen lugar dentro del sistema. Es una serie de operaciones unitarias de transformación que pueden llevarse a cabo con o sin reacción Química, cambio de estado, etc.

6.- CORRIENTE.

Cualquier línea de flujo que entre o salga de un proceso será designada como "corriente", el número de dichas corrientes estará representado como Ns.

7.- ELEMENTOS Y UNIDADES.

Muchos procesos químicos son completamente complicados conteniendo muchos Elementos tales como: Condensadores, calentadores, divisores de corrientes, mezcladores, y, muchos otros. Esos elementos pueden ser combinados para formar "UNIDADES", tales como: Una columna de destilación consistente de un condensador, un reherbidor, platos y separadores. También las unidades pueden ser combinadas para formar los "Procesos".

8.- VARIABLES.

Todos los detalles de información requeri--

dos para designar a una corriente completamente, se rán llamadas "Variables".

En el cálculo de los grados de libertad las variables representan el número total posible de términos o datos desconocidos, es decir, el potencial total de incógnitas.

9.- TIPOS DE VARIABLES.

[Dentro de las variables, las más importantes que le interesan al Ingeniero diseñador de una unidad de separación, son las siguientes:

- 1.- Concentraciones de corrientes.
- 2.- Temperaturas.
- 3.- Presiones.
- 4.- Velocidades.
- 5.- Repetición de Variables, Nr.

Las concentraciones, temperaturas y presiones de las corrientes son variables Intensivas, és to es, sus valores son independientes de la cantidad de materia presente. Obviamente, es permitido sustituir cualquiera de éstas tres variables, por otras variables intensivas tales como, Entalpía mo lar, Entropía molar, etc. Pero ésto en muchos de los casos no es conveniente, ya que, únicamente son usadas para obtener los valores de otras Varia bles.]

La velocidad es una variable Extensiva, és to es, su valor depende de la cantidad de materia-

presente. La Entalpia total de corriente es otra propiedad o variable Extensiva que es utilizada en los cálculos pero solamente para obtener las velocidades de las otras corrientes involucradas en el sistema. El término de Velocidad es utilizado para describir la magnitud de las corrientes de material y Energía; como por ejemplo el calor suministrado a un reherbidor y el calor removido a través de un condensador.

La quinta variable anotada en la lista anterior, ni es una variable Intensiva ni Extensiva. Es el grado de libertad particular que el Ingeniero diseñador utiliza cuando él especifica cómo a menudo un elemento particular estará repetido en una unidad. Por ejemplo una sección o unidad de destilación analizada como un todo, está compuesta de una serie de etapas de equilibrio, y cuando el Ingeniero diseñador especifica el número de etapas que la unidad contendrá, él utilizará el grado de libertad particular representado por la repetición de variables o variables repetidas ($Nr = 1.0$), denotando las etapas de equilibrios. Si la columna de destilación es analizada por secciones, y contiene más de una sección como la de rectificación y la de agotamiento, el número de etapas en cada sección deberán ser especificadas y existirán tantas variables repetidas (número de etapas) como sección hallan, en este caso, $Nr = 2$, denotando las etapas de las diferentes secciones.

b).- R E S T R I C C I O N E S.

Cualquier relación matemáticas impuesto sobre el proceso constituye una "Restricción". Por --

ejemplo, la existencia de un proceso, indica la aplicación de balances de materia, balances de energía y de otros tipos de restricciones que serán discutidas posteriormente.

1.- TIPOS DE RELACIONES DE RESTRICCIÓN N_c

Como veremos posteriormente, la determinación del número de variables (N_v) para cualquier sistema es totalmente simple y directo, debido a que no es difícil contar las variables como composición, temperatura, presión y velocidad de todas las corrientes existentes en un sistema y adicionarles las variables repetidas requeridas.

Sin embargo, el procedimiento de contar las relaciones de restricción (N_c) es más complicado que la enumeración o conteo de variables, particularmente debido a un gran número de categorías de restricciones y en partes debido a un poco de situaciones complejas dentro de las categorías.

Para evitar omisión o repetición de restricciones es necesario tener cuidado y seguir algunos procedimientos arbitrarios pero consistentes que reducen los cambios por error. Deberíamos considerar primero solamente las restricciones debidas a elementos y subsecuentemente notar una categoría adicional para elementos que están combinados en Unidades.

Es conveniente agrupar todas las posibles restricciones dentro de los siguientes tipos:

1.- Restricciones Inherentes.

- 2.- Restricciones de Balances de Materia.
- 3.- Restricciones de Balances de Energía.
- 4.- Restricciones de Distribución de Fases.
- 5.- Restricciones de equilibrios Químicos y Físicos.

2.- RESTRICCIONES INHERENTES.

Ciertas relaciones o condiciones de restricción son a menudo inherentes en el sistema particular bajo consideración.

Estas restricciones usualmente toman la forma de identidades o igualdades entre dos o más variables. Por ejemplo, el concepto de las etapas de equilibrio involucra las restricciones inherentes-tales como la temperatura y presión de una corriente residual en equilibrio con otra corriente, ya - que ambas poseen la misma temperatura y presión - por estar en equilibrio.

Entre las restricciones inherentes, una de- las más importantes es la de las especies ausentes. Por ejemplo, si el sistema contiene un total de 3- especies y si una corriente contiene solamente 2 - de las 3, hay una restricción impuesta por la necesidad de anotar la concentración de la otra espe-cie como cero.

Un segundo tipo de restricciones inherentes es encontrada en el ejemplo de la combustión, ésta vez en la forma de una relación fijada. La rela- - ción de Oxígeno a Nitrógeno en una corriente de aire está o debe estar establecida, tan pronto como-

uno específica que el aire constituye las corrientes, la composición está implicada. La composición puede ser establecida por cualquier detalle simple de información concerniente a éstas mezclas de dos componentes.

Otra restricción inherente se encuentra en las composiciones idénticas de los elementos, los cuales no sufren cambios de composición, tales como condensadores totales y bombas.

Otro ejemplo se encuentra en los elementos, unidades, o, procesos en los cuales no se toman en cuenta los efectos caloríficos tales como: una corriente de calor, el trabajo realizado o adquirido, etc, para su análisis; habrá una restricción inherente adicional para cualquiera de ellos ya que únicamente se realiza un conteo de materia y no de energía. Entonces la información de temperatura es innecesaria, y por consiguiente también la de presión. En éstos casos, para todos los intentos y propósitos, todas las temperaturas y presiones son consideradas a ser idénticas o iguales. Entonces las dos variables (temperatura y presión) contadas en cada corriente para esas condiciones son innecesarias y 2 Ns restricciones inherentes son impuestas.

Cuando dos corrientes dejan un elemento simple, éstas deben estar a idénticas temperaturas y presiones, aún cuando sus composiciones no sean iguales. Entonces para las dos corrientes, uno puede especificar la temperatura y presión de una, y la temperatura y presión de la otra deben de ser las mismas.

Este tipo de restricción es importante úni-

camente cuando la temperatura y presión son partes importantes del análisis (cuando el balance de - - energía se realiza). Cuando únicamente el balance de materia es realizado no son importantes. Ya que todos las presiones y temperaturas son ignoradas - en éstos casos.

En la figura 1, es obvio que todas las propiedades intensivas de D y $L_n + 1$ deben ser iguales. Sin embargo, en la figura 4, es obvio que hay $C - 1$ concentraciones iguales independientes (C -- concentraciones para cada uno de los C componentes y uno para la concentración de la corriente total) y una misma velocidad entre A y A' . Para cada - - igualdad independiente, una relación de restric- - ción inherente puede anotarse y cada restricción.- (o su equivalente) deben ser restados del número - total de variables N_v , en el cálculo del número de variables independientes o arbitrarias o grados de libertad N_i .

3.- RESTRICCIONES DE BALANCES DE MATERIA.

Este tipo de restricciones está expresado - de acuerdo a la clase de balance de materia que se efectúa en el sistema, por ejemplo, un balance de materia total puede ser escrito para cada uno de - los componentes presentes, obteniéndose C relaciones de restricción debidas a los C componentes del sistema. Este número de relaciones de restricción debe ser restado del número de variables cuando se calculan los grados de libertad.

Sin embargo, en lugar de C balances de componentes, es permitido por supuesto escribir $C - 1$

bálanes de componentes más uno de la cantidad del balance total.

Para un sistema de C componentes, también, puede escribirse $C + 1$ balances, uno para cada uno de los C componentes y un balance de materia total.

Debe tenerse cuidado al tomarse que las restricciones de balances de materias utilizadas sean independientes de las restricciones inherentes que puedan ser obtenidas previamente.

Por ejemplo, en situaciones como la mostrada en la fig. 2, donde A y A' son en realidad una corriente, las restricciones de C balances de componentes que deben ser aplicados no son independientes de las $C - 1$ concentraciones iguales y una velocidad idéntica puede ser contada previamente como una restricción inherente.*

Es preciso determinar que el número de balances de materias está relacionado con el número de componentes, y, no con el número de especies presentes.

4.- RESTRICCIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA.

Un balance total de energía proporciona diferentes relaciones de restricción dependiendo de la información suficiente para el establecimiento de éste o más balances que pueden ser escritos alrededor de cualquier proceso. Cuando la información es suficiente para el establecimiento de un probable balance de energía habrá una restricción provista por el único balance de energía el cual -

involucrará todas las corrientes de calor, así como también todas las corrientes de material dadas en el proceso bajo consideración. En algunos casos el balance de energía no puede ser independiente de las restricciones inherentes, por lo que es necesario analizarlo cuidadosamente para evitar redundancia u omisión en el conteo de restricciones.

5.- RESTRICCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE FASES.

Cada componente en un sistema contiene más de una fase distribuidas por si mismo entre varias fases de una manera características.

La distribución de un componente entre dos fases está descrito por su coeficiente de distribución "K". Un componente que está distribuido entre tres fases poseerá tres coeficientes de distribución, uno para la fase líquida, uno para la fase gas, y el otro para la fase sólida, pero solamente dos serán independientes ya que el otro será dependiente.

En general si todos los componentes existen en todas las fases, el número de relaciones de restricción debido al fenómeno de distribución de fases será $C(N_p - 1)$, donde N_p representa el número de fases presentes en el sistema.

6.- RESTRICCIONES DE EQUILIBRIOS QUÍMICOS Y FÍSICOS.

En sistemas químicamente reactivos, los distintos constituyentes químicamente estarán referidos a relaciones de equilibrio químico. El número de ta-

Las relaciones es igual al número mínimo de ecuaciones estequiométricas que deben ser escritas, para formar todas las especies químicas presentes de los componentes independientes seleccionados.

Una relación de equilibrio Químico relaciona dos o más constituyentes en la misma o en diferente fase, ya que solamente una relación de distribución describe la distribución de un constituyente entre dos fases.

Las concentraciones de los componentes en una mezcla pueden estar interrelacionadas si uno u otro de los equilibrios químicos y físicos existen. Por ejemplo si se destila una mezcla de metanol y agua, la composición del vapor estará relacionada con la composición del líquido a cualquier temperatura y presión provistas, tal que las dos fases están detenidas en un simple contacto para que la relación de equilibrio entre ambas fases sean establecidas.

Similarmente, en una reacción química reversible, tal como la disociación del carbonato de calcio (Piedra caliza) a el Oxido (cal) y Bióxido de carbono, la fracción de carbonato disociada estará gobernada por la temperatura del proceso, originando que las tres fases esten retenidas en contacto por un tiempo suficiente para establecer las concentraciones en equilibrio.

Es razonable preguntar si las concentraciones limitantes del equilibrio físico o químico pueden ser importantes en la Industria, en donde la velocidad de suministro gobierna la cantidad de ma

terial producido para la venta.

La contestación técnicamente es "No" debido a que un proceso en equilibrio es fundamentalmente Antieconómico.

Hay sin embargo, algunas circunstancias donde es deseable asumir que un proceso debería efectuar alguna conversión, o separación, si el equilibrio fuera alcanzado y entonces la velocidad y capacidad del proceso para alcanzarlo, como una apreciación es denominada "Eficiencia" e indica la fracción de la separación alcanzada en equilibrio en el proceso real.

El término de Equilibrio será muy importante en el desarrollo del método de análisis que se mencionará posteriormente ya que sus funciones básicas son tomados de la regla de las fases.

CAPITULO III

GRADOS DE LIBERTAD.

[En el diseño de procesos de separaciones físicas de componentes por mecanismos involucrados - transferencia de masa y calor, el primer paso - usualmente consiste en la especificación de condiciones del proceso o variables independientes (grados de libertad). Cuando las suficientes y necesarias variables independientes son fijadas, el sistema está definido y otras variables pueden ser determinadas por diseño computacional.]

[Normalmente las variables de un sistema están interrelacionadas en un camino semejante que - solamente algunas de ellas pueden ser expresadas - como funciones explícitas de las otras, las restantes tienen que ser determinadas por medio de sistemas de cálculos apropiados.]

Un ejemplo es el diseño de una columna de destilación para separar una mezcla binaria de Benceno - Tolueno. El diseño de la columna es para tener una alimentación intermedia, un reherbidor parcial con una corriente de producto de fondos líquida, y un condensador total con una corriente de producto destilado líquido, operando la columna a presión atmosférica.

Es posible especificar para ésta columna la concentración de benceno o tolueno en la corriente de destilación o en la de fondos, la recuperación de uno u otro componente en cualquiera de las corrientes y la relación de reflujo, tres variables-

independientes. Entonces, el número de platos teóricos en las secciones de arriba y abajo de la alimentación podría ser determinado por los diagramas del método de McCabe - Thiele, de ésta manera se determinarían dos variables dependientes implícitas.

Sin embargo, un análisis formal muestra, que para la columna existen cuatro variables independientes que podrían ser especificadas. La cuarta variable, no anotada arriba, está implícita en el método McCabe - Thiele, ésta es, la localización óptima de plato de alimentación; el procedimiento prudente es para ser llevado de una línea de operación a la otra en la vecindad de la intersección de las líneas con objeto de asegurar un mínimo de platos teóricos totales.

a).- PRINCIPIOS DEL METODO DE ANALISIS.

La dificultad de colocar el número correcto de variables independientes fué estudiado por Gilliland y Reed (2), quienes propusieron un método de ataque por uso de la regla de las fases y la primera ley de la termodinámica. Como será mostrado posteriormente, la regla de las fases contribuye con la enumeración de todas las variables, N_v , en un sistema, y la primera ley con la enumeración de todas las condiciones posibles, N_c , inherentes y necesarias en el sistema. La diferencia entre las variables y condiciones posibles representan las variables independientes, N_i , o grados de libertad, entonces:

$$N_i = N_v - N_c$$

$$(3 - 1)$$

Los casos que se presentan cuando ésta ecuación es utilizada en los análisis de los sistemas considerados; son:

$$F = M - N$$
$$N_i = N_v - N_c.$$

A.- Si $N_v > N_c$, entonces, $N_i > 0$, implicando ésta circunstancia que el sistema no está completamente definido y el Ingeniero diseñador necesita especificar otras Variables para completar el sistema a diseñar.

B.- Si $N_v = N_c$; entonces, $N_i = 0$, ésto implica que el sistema está completamente definido para el diseño.

C.- Si $N_c > N_v$ entonces $N_i < 0$, denotando que el análisis realizado en el diseño del sistema, es un absurdo; o sea que el análisis estuvo mal planteado.

Las variables posibles de un sistema, N_v , podrían ser enumeradas como sigue:

1.- La regla de las fases de los grados de libertad de cualquier sistema de estados sencillos en el que existen una, dos o más fases en equilibrio:

$$N = C + 2 - \emptyset \quad (3 - 2)$$

Esos grados de libertad representan las llamadas variables intensivas tales como concentración; temperatura, presión, entropía y otras propiedades termodinámicas determinadas por el estado

e independientes de la cantidad de los componentes presentes.

Sin embargo, para un sistema de flujo, hay asociada con cualquier corriente una variable extensiva adicional, ésta es la velocidad de flujo que no es determinada por el estado y es por eso que no se ocupa la misma regla de las fases. Por tanto, para un sistema de una fase hay $C + 1$ variables intensivas, una variable extensiva (velocidad) o $C + 2$ variables totales. Para un sistema de dos fases, donde las velocidades de flujos de ambas fases, pueden ser independientes, hay C variables intensivas, 2 variables extensivas (ambas velocidades), y $C + 2$ variables totales.

2.- Para cualquier sistema, considerado como un todo, o cualquier parte de ello, habrá que adicionarle a las variables anteriores los grados de libertad que seleccionan la cantidad, o, velocidad, de energía intercambiada entre el sistema y alrededores.

En un sentido estricto el método es aplicable a sistemas en equilibrio puesto que las bases de la regla de las fases es el equilibrio. Por eso el análisis será rigurosamente correcto para procesos de separación reducidos a estados prudentes naturales. Diferentes tipos de operaciones podrían ser examinados conteniendo un número infinito de etapas donde cada una de las cuales aprovechan algún porcentaje de equilibrio.

Es necesario estimar que serán analizadas 3 categorías de variables: Aquellas pertenecientes a

la entrada y salida de la masa aquellas pertenecientes a la entrada y salida de energía y aquellas pertenecientes a elementos repetitivos.

En cualquier corriente que suministra o remove masa, la especificación completa de la corriente requerirá de $C + 2 =$ variables de información como se indicará más adelante. Por lo tanto, podemos plantear que el número de variables dependientes de la masa, en un sistema que contiene un número de C componentes y N_s corrientes es:

$$N_v = N_s (C + 2) \quad (3 - 3)$$

Las corrientes de entradas y salidas de energías no tienen características relacionadas con la composición, temperatura o presión. Ellas son completamente especificadas por una designación de la cantidad de energía, en unidades apropiadas. Cada corriente de energía, adiciona, entonces, exactamente una variable.

El uso repetitivo de elementos físicos idénticos de equipos sugiere un interés y concierne con el diseño de aspectos internos de una unidad (por ejemplo, los platos en una columna de destilación). Este tipo de variables de elementos repetitivos son frecuentemente llamadas "Variables de Redundancia". Ellas existen solamente para proveer al diseñador con una oportunidad de seleccionar el número de tales elementos repetitivos y numerar uno para todos los elementos de un tipo simple.

Las condiciones inherentes y necesarias, N_c , en un sistema, son enumeradas como sigue:

1.- En un sistema deben realizarse un balance de materia y energía. La primera ley de la termodinámica estipula que la cantidad total de energía entrando a cualquier sistema deben ser exactamente igual a la cantidad de energía saliente más cualquier acumulación de energía dentro del sistema. Para Procesos de flujos en los que los cambios de energía cinética, energía potencial, y trabajo hecho son insignificantes, la primera ley es simplificada directamente a balances de entalpía o calor. Normalmente el balance de calor determina una condición en cualquier sistema y habrá muchas condiciones fijadas por balances de materia como componentes haya en el sistema.

2.- Condiciones inherentes adicionales en un sistema están determinadas en igualdad de variables de ciertas corrientes semejantes, uniendo las partes diferentes de un sistema compuesto.

Para operaciones ordinarias ciertas de las variables son colocadas frecuentemente por diseño, tales como la composición y velocidad de flujo de las alimentaciones (N_f), la presión en cada plato de una columna de destilación (N_π), y el calor perdido en cada plato (N_Q). De ésta manera para cualquier sistema el número de esas variables normalmente fijadas es:

$$N_x = N_f + N_\pi + N_Q \quad (3 - 4)$$

La diferencia entre las variables independientes, N_i , y aquellas normalmente fijadas, N_x , representa las posibles variables independientes,

Na, por especificación de proceso.

$$Na = Ni - Nx \quad (3 - 5)$$

$$Na = Nv - Nc - Nx \quad (3 - 6)$$

Las posibles variables independientes, Na, son uno de los principales intereses en la solución de problemas de diseño y el presente método es desarrollado principalmente para su enumeración.

b).- ACERCAMIENTO SISTEMATICO DEL METODO.

Los cuatro principios básicos colocados anteriormente son relativamente simples, y en la teoría el número considerable de variables podría siempre ser obtenido por principios de esos fundamentos. Sin embargo, en la práctica será encontrado que tales procedimientos no son solamente tediosos sino también algo confusos. Una dificultad frecuente en la aplicación de los principios anteriores radica en el reconocimiento de variables y condiciones, así que ninguna debe ser omitida o contada dos veces. Como ejemplo, tenemos que con el uso del método McCabe = Thiele para la designación de una columna de destilación con una alimentación intermedia, es probable alcanzar conclusiones erróneas tales como la obtención de tres variables independientes existentes en dicha columna, siendo en realidad cuatro variables independientes como se indicó anteriormente. Puede ser considerado como un ejemplo adicional, el calor suministrado o eliminado en un reherbidor, ya que surge la duda al considerar si éstas son dos variables indepen-

dientes o una que debemos tomar en cuenta.

Algunas de éstas circunstancias no son fáciles para ver si ciertas condiciones deberían ser clasificadas como inherentes en un sistema o como normalmente fijada por diseño. Por ejemplo cuando una corriente está dividida la operación es adiabática. El hecho de no intercambiar calor entre el sistema y sus alrededores, podrían ambas aparecer como una condición inherente del sistema o como una variable normalmente fijada representando como cero al calor perdido.

El presente método proporcionar un sistema autoconsistente de clasificación y enumeración de variables y condiciones designadas para evitar los errores y dilemas descritos anteriormente.

Los resultados de éstos estudios serán tabulados y resumidos tal que algún sistema complejo puede ser analizado en un mínimo de tiempo sin recurrir a los primeros principios.

c).- M E T O D O P R O P U E S T O.

En el presente método las partes componentes de un proceso de separación o un sistema de operación son clasificadas como, elementos, elementos complejos, unidades y unidades complejas, en orden creciente de complejidad. La clasificación es algo arbitraria y es realizada por conveniencia.

Un elemento es un equipo de etapa simple tales como un tanque de flasheo, un condensador total, un plato teórico, etc.

Un elemento complejo es un elemento con - - ciertas características menores adicionales, tales como un condensador total con reflujo (ésto es, un condensador total en el cual el condensado está dividido en una corriente de destilado y una corriente de reflujo).

Otro ejemplo de un elemento complejo es una repetición de platos teóricos en series para formar un conector de multiplatos, un caso particular es un absorbedor. Una combinación de elementos o - elementos complejos forman lo que se llama Unidad, tales como una columna agotadora que es un conec--tor de multiplatos conectados a un reherbidor, - - cuando unidades, elementos, elementos complejos - son conectados, forman unidades complejas como unfraccionador de petróleo con agotadores.

Puede ser notado que una clase mayor o más-compleja (tales como la columna agotadora) está - compuesta de clases menores o menos complejas (platos teóricos y reherbidor de la columna de agotamiento).

El problema de enumerar variables y condiciones es entonces reducido a los dos puntos si--guientes:

1.- Enumeración de variables y condiciones de las clases más simples, el elemento por aplicación directa de los principios adoptados.

2.- Establecimiento de relaciones entre varias clases tales que las clases mayores deben ser analizadas por aplicación de los resultados obteni

dos por las clases menores sin recurrir a los primeros principios.

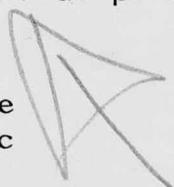
A través de éste estudio las variables fijadas normalmente por algún sistema serán la composición y velocidad de flujo de la alimentación, la presión del sistema y el calor intercambiado entre el sistema y sus alrededores. Esta selección de variables fijadas será arbitraria, pero la lógica del método es fuertemente afectado por alguna otra selección.

d).- ANALISIS DE ELEMENTOS TIPICOS.

operativos

Para la primera etapa del problema, se puede empezar por el elemento. Un aprovechamiento más eficiente en éste tipo de análisis es romper las unidades de procesos en partes o elementos, éstos pueden ser analizados individualmente para determinar sus respectivos grados de libertad. Al número N , que representa condiciones de variables, le será asignado un índice sobrescrito para designar una de las cuatro clases anteriormente mencionadas y otro índice subscrito denotando la naturaleza de la variable o condición. De ésta manera, N_i denota el número de variables independientes de un elemento (es decir, los grados de libertad de un elemento). Las ecuaciones (3 - 1), (3 - 5) y - - - (3 - 6) pueden ser escritas para un elemento como sigue:

$$N_i^e = N_v^e - N_c^e \quad (3 - 7)$$



$$Na = N_i - N_x \quad (3 - 8)$$

$$Na = N_v - N_c - N_x \quad (3 - 9)$$

1.- CORRIENTE INDIVIDUAL.

El elemento más simple que el ingeniero diseñador de procesos debe diseñar es una corriente simple homogénea.

Cuando la corriente es considerada en un punto, las variables involucradas son las siguientes:

VARIABLES .	N_v
COMPOSICION .	$C - 1$
TEMPERATURA .	1
PRESION .	1
VELOCIDAD .	$\frac{1}{C + 2}$

Entonces, una corriente simple homogénea -- contribuirá con $C + 2$ variables para cualquier elemento o unidad de la cual forma parte, No hay ninguna clase de restricciones o condiciones cuando una corriente de una fase es considerada solamente en un punto, ya que en ella no existen condiciones iguales (inherentes), balances de materias y energía, distribuciones de fases ni equilibrios Químicos, así que:

$$N_c = 0$$

$$N_i = N_v = C + 2$$

De ésta manera, el diseñador tendrá que especificar esas $C + 2$ variables, para que la corriente quede completamente definida.

2.- DIVISOR DE CORRIENTE.

Un divisor simple parte una corriente cualquiera en dos o más corrientes de productos. La figura 1 A muestra un divisor con dos corrientes de productos y la 1 B con $(m + 1)$ corrientes de productos.

Para el primero tenemos tres corrientes de material y una corriente de calor debido a intercambio de calor entre el elemento y sus alrededores, así que:

$$N_v = N_s (c + 2) + \text{corriente de Energía.}$$

$$N_v = 3 (c + 2) + 1 = 3c + 6 + 1 = 3c + 7.$$

Cada corriente de material contribuye con $C + 2$ variables, mientras que la corriente de calor tiene solamente la velocidad como una variable que contribuye a N_v .

Será arbitrariamente tomado que las corrientes salen de cualquier elemento están a la temperatura

tura y presión del elemento, ésto es, las $C + 2$ variables las cuales cada corriente saliente posee, - serán asignadas antes que la corriente deje el elemento debido a que antes hay oportunidad para caídas de presiones o cambios de temperatura.

Por otro lado, las corrientes entrantes a cualquier sistema están consideradas que poseen $C + 2$ variables, las cuales son en general independientes de las condiciones dentro del elemento.

Esto, es las variables son especificadas antes que las corrientes entren a los elementos.

El elemento en la figura 1 puede ser considerado dentro del círculo punteado. Un conjunto de condiciones o restricciones independientes son las siguientes:

R E S T R I C C I O N E S .

Inherentes:	N_c^e
T Identicas entre L_{n+1} y D.	2
Concentraciones identicas entre L_{n+1} y D. = = = = =	$C - 1$
Concentraciones identicas entre L_c y D	$C - 1$
Balance de Materia:	
Balance de la cantidad total.	1
Balance de Energía.	1
Restricción de Distribución	0

Restricción de Equilibrio.

$$\frac{0}{2c + 2}$$

Ciertas restricciones pueden ser cambiadas de un tipo a otro. Por ejemplo, las $C - 1$ concentraciones idénticas entre L_c y D (o L_{n+1}) y el balance de la cantidad total pueden ser reemplazados por C balances de componentes. También, el balance de energía podría ser innecesario (ésto es, no independiente) si una temperatura idéntica entre L_c y D (o L_{n+1}) fuera anotada como una restricción inherente para éste elemento.

Estos ejemplos, ilustran que es el número de restricciones o condiciones lo que es importante y no su forma.

Los grados de libertad (o las variables las cuales el Ingeniero diseñador debe de especificar) definen una operación única de un divisor de corriente dados por:

$$N_i = N_v - N_c = (3c + 7) - (2c + 2) = C + 5$$

Como se mencionó anteriormente, normalmente en el diseño de elementos, se tienen fijadas tres variables por diseño que son en este caso:

La Corriente de Alimentación	L_c	(N F)	$C + 2$
La Presión del Divisor		(N π)	1
El Intercambio de calor	0	(N Q)	1

Entonces el número de esas variables normal

mente fijadas es:

$$N_x = N_f + N_\pi + N_Q = (c + 2) + 1 + 1 = C + 4$$

Por consiguiente, los grados de libertad posibles (o posibles variables independientes que el ingeniero diseñador debe especificar son:

$$N_a = N_i - N_x = (c + 5) - (c + 4) = 1$$

Este número representa la (S) posibilidad (E S) que tiene el Ingeniero diseñador de definir completamente el diseño de un sistema. En este caso, el ingeniero diseñador puede tomar este número para la especificación de la relación L_{n+1}/D en el sistema.

Los divisores de corrientes son generalmente adiabáticos.

También la presión del elemento puede ser tomada como la presión de la corriente simple de alimentación. Si esas dos restricciones fueran anotadas como restricciones inherentes N_i se reduciría a $C + 3$ variables independientes para un divisor simple de corrientes adiabático.

Esto eleminaría la necesidad de enlistar π y Q especificaciones para el divisor.

En la figura 1 B se muestra un divisor que parte una corriente de alimentación en $(m + 1)$ corrientes de productos.

En éste caso considerando al elemento como un todo, tenemos $(m + 1)$ corrientes de material y una corriente de energía representado por cambios de velocidad entonces:

$$N_v = (m + 1) (c + 2) + 1 = Mc + c + 2m + 3$$

Dentro del conjunto de restricciones o condiciones independientes que pueden ser anotadas tenemos:

	^e N _c
R E S T R I C C I O N E S .	
Inherentes.	(*) (m-1) (c + 1) + 1 (**)
Balances de Materias.	C ✓
Balances de Energía.	1
Q.	1 (Q = 0)
DISTRIBUCION DE FASES	----
EQUILIBRIOS QUIMICOS.	-----
	mc + m + 2

(*) Debido a la igualdad de variables enteras de todas las corrientes de productos.

(**) Debido a que las presiones del sistema son iguales a la presión de la alimentación.

Entonces los grados de libertad o variables independientes que el ingeniero diseñador debe especificar son:

$$N_i = N_v - N_c = (mc + C + 2m + 3) - (mc + m + 2)$$

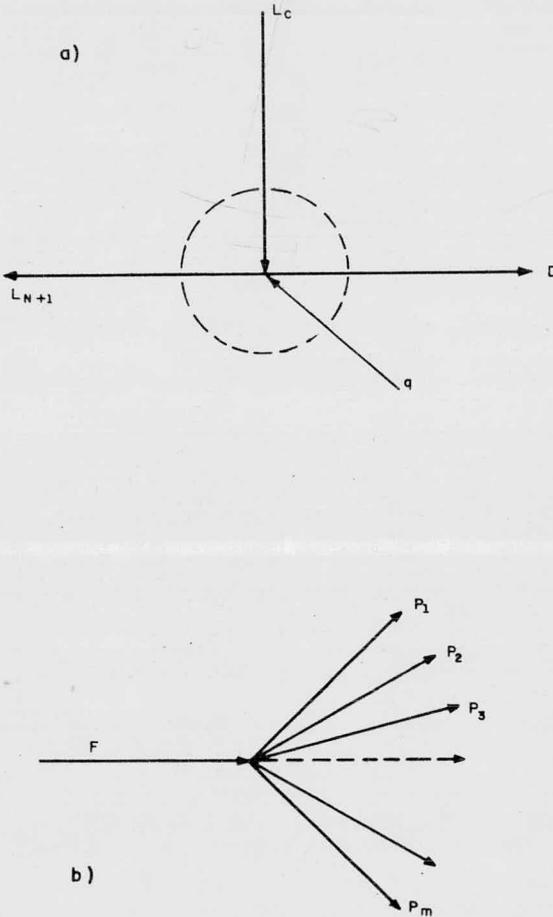


Figura No. 1

- a) DIVISOR DE CORRIENTE SIMPLE
- b) DIVISOR DE CORRIENTE GENERAL

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

$$N_i = c + m + 1.$$

Las variables que normalmente son fijadas - por diseño son en este caso:

Corriente de alimentación	C + 2
Calor intercambiado (Q)	-----
Presión del sistema (π)	<u>-----</u>
	C + 2

$$\text{De \acute{e}ste Modo: } N_x = N_f + N_\pi + N_Q = C + 2$$

Los posibles grados de libertad o variables independientes restantes a especificar son:

$$N_a = N_i - N_x = (c + M + 1) - (C + 2) = m - 1$$

Este n\u00famero representa la posibilidad de especificar las (m - 1) corrientes de productos - m\u00e1s una de la corriente de alimentaci\u00f3n.

3.- MEZCLADOR.

Una mezcla de corriente est\u00e1 representada - esquem\u00e1ticamente en la figura 2. Tres corrientes - de material y una corriente de energ\u00eda debida al - intercambio de calor, est\u00e1n involucradas, tal que:

$$N_v = 3 (c + 2) + 1 \pm 3c + 7.$$

Las condiciones de restricción incluyen: C-Balances de componentes y un balance de energía para dar $N_C^e = C + 1$. No hay restricciones inherentes o de distribución. El número de Variables sobre el cual el ingeniero diseñador tiene control es:

$$N_i^e = N_v^e - N_c^e = (3c + 7) - (C + 1) = 2c + 6$$

Las variables fijadas normalmente por diseño son:

Las Corrientes de alimentación	$2(c + 2)$
La Presión del mezclador	1
El Intercambio de calor	$\frac{1}{2c + 6}$

$$\text{De éste modo: } N_x^e = 2(c + 2) + 1 + 1 = 2c + 6$$

Por consiguiente el número de grados de libertad posibles a especificar por el ingeniero diseñador son:

$$N_a^e = N_i^e - N_x^e = (2c + 6) - (2c + 6) = 0$$

Este número expresa que al fijar las tres condiciones anteriores, el sistema estaba completamente definida para el diseño.

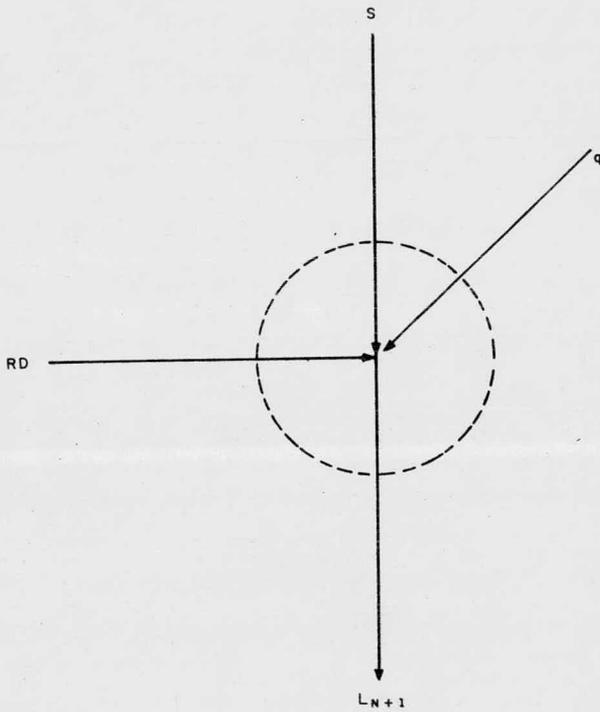


Figura No. 2
MEZCLADOR

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

4.- CAMBIADOR DE CALOR.

La figura 3, muestra el diagrama de flujo - para un cambiador de calor. En este elemento están incolucradas cuatro corrientes de material y una - corriente de calor, debido al intercambio de calor entre ambas corrientes, tal que:

$$N_v = 4 (c + 2) + 1 = 4c + 8 + 1 = 4c + 9$$

Las condiciones o restricciones incluyen:

Balances de materia.	2c (*)
Balances de Energía	1
Inherentes	-----
Distribución de fases	-----
Equilibrio Químico	-----
	<hr/>
	2c + 1

(*) Puesto que no hay intercambio de material entre las corrientes AA' y BB', hay C balances de materia para cada corriente, 0 (2c balances de material total)

Los grados de libertad o variables sobre el cual el Ingeniero diseñador tiene control son:

$$N_i = N_v - N_c = (4c + 9) - (2c + 1) = 2c + 8$$

Las variables fijadas normalmente por diseño son:

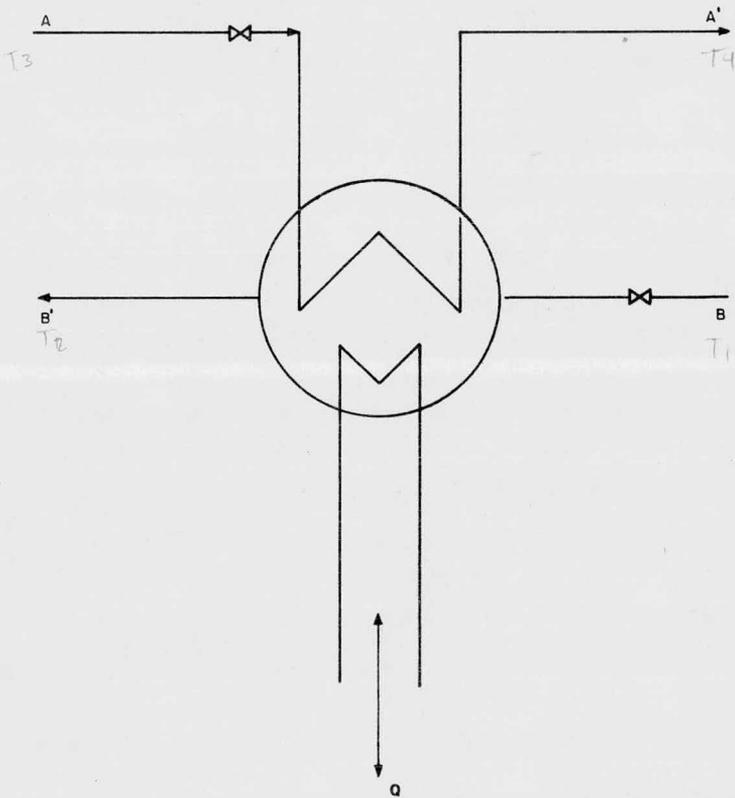


Figura No. 3
CAMBIADOR DE CALOR

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

Alimentaciones	$2 (c + 2)$
Presiones de las Alimentaciones	2
Calor intercambiado	$\frac{1}{2c + 7}$

$$\text{Entonces } N_x^e = 2 (c + 2) + 2 + 1 = 2c + 7$$

Por consiguiente, el número de posibles grados de libertad o variables independientes, restantes que el ingeniero diseñador debe especificar - es:

$$N_a^e = N_i^e - N_x^e = (2c + 8) - (2c + 7) = 1$$

Este número representa la posibilidad de - completar el diseño del sistema, especificando una variable, que podría ser la temperatura de A' o B' . De esta manera, el Ingeniero diseñador especifica el diseño del sistema.

5.- BOMBAS, CALENTADORES Y ENFRIADORES.

El diagrama de flujo para éstos elementos - está mostrado en la figura 4. Tales elementos son analizados al mismo tiempo debido a que poseen las mismas características, por ejemplo: los tres elementos poseen dos corrientes de material y una de energía, ésta corriente en la bomba es debida a - cambios de presiones manifestándose como trabajo - (W) y en los calentadores y enfriadores es debido al intercambio de calor entre el sistema calentador o enfriador y el sistema calentado o enfriado respectivamente, en cada caso:

$$N_v^e = 2 (c + 2) + 1 = 2c + 4 + 1 = 2c + 5$$

Ya que solamente dos corrientes de material están involucrados, la aplicación de C balances de componentes depende de la composición y velocidades idénticas entre A y A'. Los C balances de componente, además de un balance total de energía - - dan:

$$N_c^e = c + 1$$

$$N_i^e = N_v^e - N_c^e = (2c + 5) - (c + 1) = C + 4$$

Las variables normalmente fijadas por diseño son:

Alimentación	C + 2
Presión del sistema	1 (*)
Calor del Sistema.	

$$\text{Entonces: } N_x^e = C + 2 + 1 = C + 3$$

(*) Cantidad de calor perdido constante para la bomba o presión constante para el calentador y enfriador.

Los grados de libertad posibles para definir completamente el diseño del sistema son:

$$N_a^e = N_i^e - N_x^e = (c + 4) - (c + 3) = 1$$

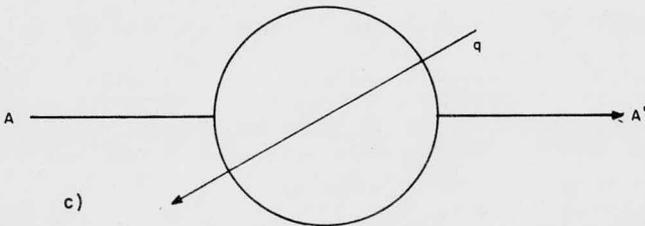
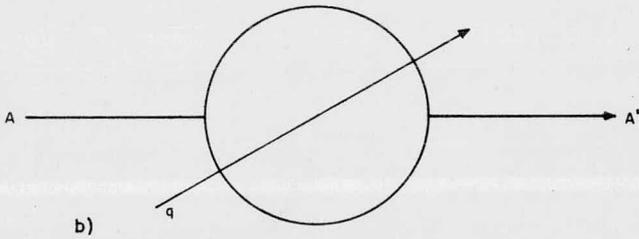
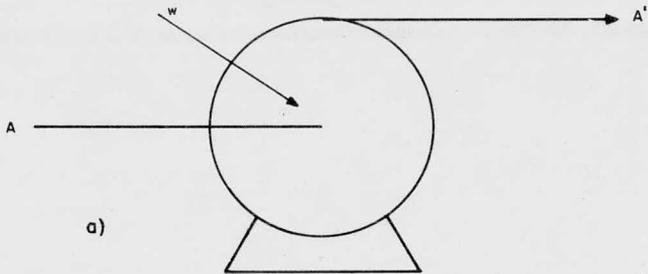


Figura No. 4
a) BOMBA
b) CALENTADOR
c) ENFRIADOR

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLL ADO	1978

Este número indica que el ingeniero diseñador tiene una oportunidad para definir el sistema, fijando o especificando una variable que puede ser la descarga de presión o temperatura del sistema.

6.- CONDENSADOR O REHERBIDOR TOTAL:

Un condensador es descrito como total cuando todo el vapor alimentado es condensado a líquido. También, un reherbidor puede ser denominado como total si todo el líquido alimentado es vaporizado. Estos equipos son mostrados esquemáticamente en la figura 5. Un condensador total es un equipo práctico, mientras que en muchos sistemas un reherbidor no lo es, debido a que la vaporización completa usualmente trae consigo problemas de ensuciamiento debido a la depositación de impurezas de alto punto de ebullición en los tubos del reherbidor. También, en el caso de un horno a fuego directo, la vaporización completa puede causar el sobrecalentamiento de los tubos debido a la alta resistencia de transferencia de calor de las películas de vapor. Por esas razones, el tipo de reherbidor mostrado en la figura 5 es normalmente diseñado para vaporizar solamente una parte de la corriente que pasa a través de él. A pesar de ésta vaporización incompleta, el término total se ha usado para describir un reherbidor donde toda la alimentación al reherbidor es regresada a la columna de destilación sin residuos, siendo retirada como producto de fondo.

Los análisis para condensadores y reherbidores totales son idénticos, como puede ser visto en la figura 5, dos corrientes de material y una co--

corriente de calor, debida al intercambio de calor - entre la corriente de vapor y la del líquido en ambos casos, están involucradas y:

$$N_v^e = 2 (c + 2) + 1 = 2c + 4 + 1 = 2c + 5$$

Un balance de C componentes y un balance de energía producen C + 1 restricciones (como previamente se mencionó, la composición y velocidad idénticas no son independientes de los balances de los componentes cuando solamente dos corrientes de material están involucrados). El número de variables las cuales deben ser especificadas por el ingeniero diseñador es:

$$N_i^e = (2c + 5) - (c + 1) = C + 4$$

Las variables fijadas normalmente son:

La corriente entrante $C + 2$

La temperatura de la corriente saliente 1

La presión de la corriente saliente. 1

De ésta manera:

$$N_x^e = (c + 2) + 1 + 1 = C + 4$$

En algunos casos, sería más conveniente fijar "q" en lugar de la temperatura de salida.

Los grados de libertad posibles o variables independientes necesarios a especificar por el ingeniero diseñador son:

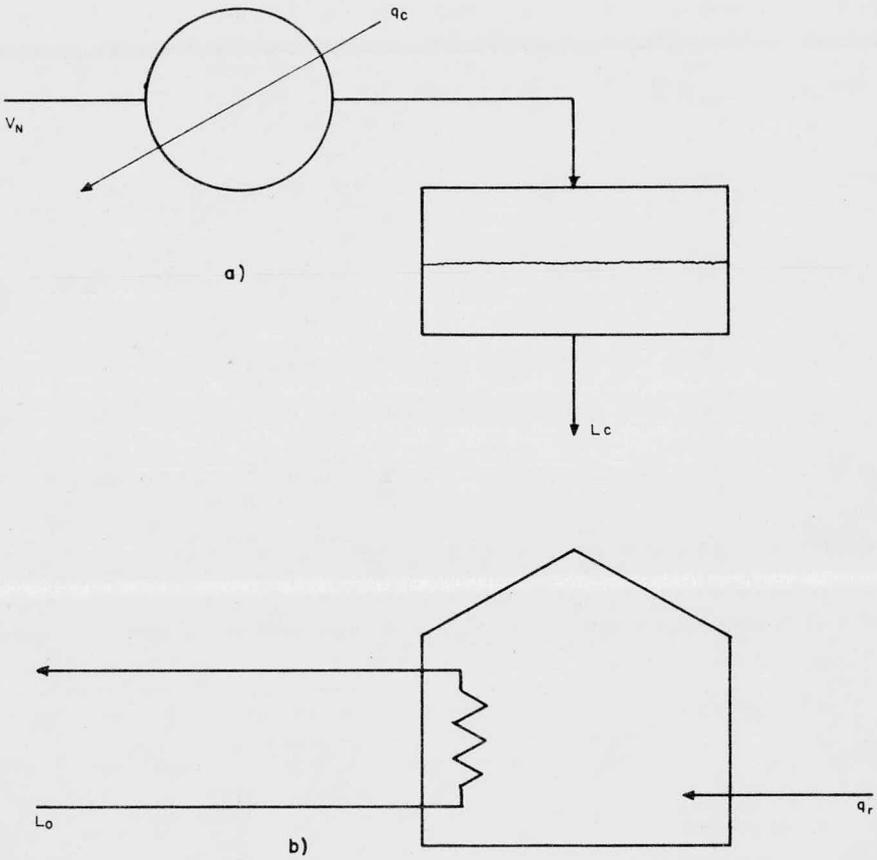


Figura No. 5
a) CONDENSADOR TOTAL
b) REHEVIVADOR TOTAL

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

$$N_a^e = N_i^e - N_x^e = (c + 4) - (c + 4) = 0$$

Este número denota que el sistema quedará completamente definido, al fijar las tres variables anteriores.

7.- CONDENSADOR O REHERBIDOR PARCIAL.

Si el condensador o reherbidor efectúa un cambio de fase solo en una parte de la corriente entrante, es llamado condensador o reherbidor parcial. En vista de la discusión anterior para reherbidores totales, es necesario extender ésta definición adicionando la estipulación de que parte de la alimentación en un reherbidor parcial se remueve como producto, en vez de regresar totalmente a la columna. Los condensadores o reherbidores parciales son siempre considerados a ser etapas de equilibrio en lo que a la separación alcanzada se refiere. Como en el caso de los reherbidores y condensadores totales, el análisis de éstos elementos es el mismo, sin tomar en cuenta de si el material es condensado o vaporizado.

En la figura 6, puede ser visto que tres corrientes de material y una corriente de calor están incolucradas para dar:

$$N_V^e = 3(c + 2) + 1 = 3c + 6 + 1 = 3c + 7.$$

Las restricciones restringentes pueden ser anotadas como sigue:

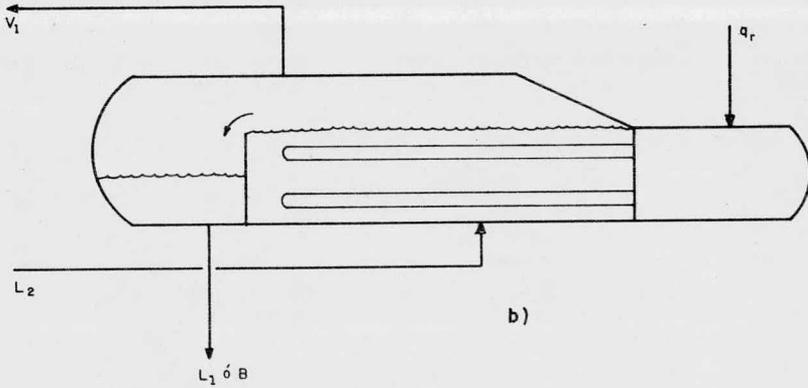
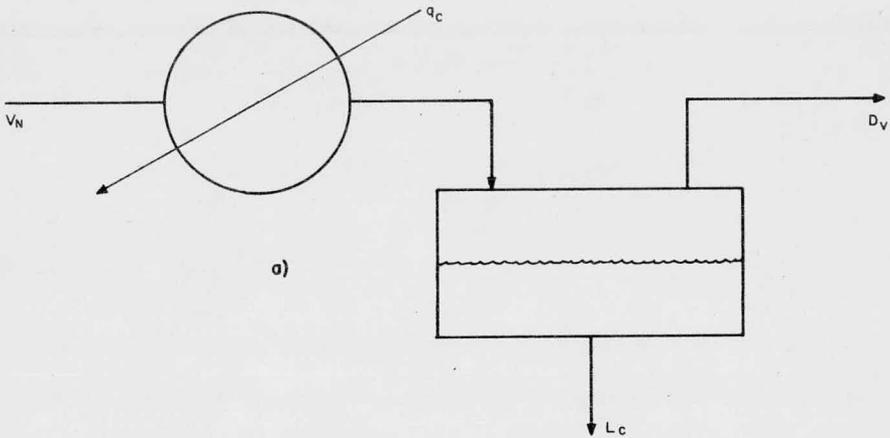


Figura No. 6
a) CONDENSADOR PARCIAL
b) REHERVADOR PARCIAL

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

TIPO DE RESTRICCIÓN	N_c^e
Inherentes (Dos corrientes en equilibrio a la misma T y P) (*)	2
Balances de componentes	C
Balances total de Energía	1
Relación de distribución	<u>C</u>
TOTAL	$2c + 3$

De modo que:

$$N_i = N_v - N_c = (3c + 7) - (2c + 3) = C + 4$$

Este es el mismo resultado que el obtenido para condensadores y reherbidores totales y las mismas variables pueden ser convenientemente especificadas por el ingeniero diseñador.

La única diferencia es que la magnitud de "Q" debe ser menor que el calor latente de condensación o vaporización de la corriente entrante si el término "Parcial" es aplicado en el sentido estricto.

8.- ETAPA SIMPLE DE EQUILIBRIO O PLATO TEORICO.

Una representación esquemática de una etapa simple de equilibrio o plato teórico aparece en la figura 7a. Cuatro corrientes de material y una corriente de calor, debido al intercambio de calor entre la corriente del líquido descendente y la corriente del vapor ascendente proveen de:

$$N_v^e = 4 (c + 2) + 1 = 4C + 8 + 1 = 4C + 9$$

Las corrientes V_n y L_n están en equilibrio - una con otra por definición de etapa de equilibrio y entonces, están a la misma presión y temperatura. Esas dos identidades inherentes cuando son adicionadas a c balances de componentes, un balance de energía y c relaciones de distribución dan:

$$N_c^e = 2 + C + 1 + C = 2C + 3$$

Entonces:

$$N_i^e = N_v^e - N_c^e = (4c + 9) - (2c + 3) = 2c + 6$$

Las variables más comúnmente fijadas por el diseñador de una etapa simple de equilibrio son - las siguientes:

Especificaciones.	N_x^e
Especificación de L_{n+1}	$C + 2$
Especificación de $V_n - 1$	$C + 2$
Presión de la Etapa	1
Intercambio de calor, Q	1

De ésta manera:

$$N_x^e = (C + 2) + (C + 2) + 1 + 1 = 2C + 6$$

Es necesario explicar que la presión en la etapa no es fijada por las especificaciones de las

presiones para L_{n+1} y V_{n-1} y por lo tanto debe ser contada como una variable separada.

Los posibles grados de libertad restantes - a especificar por el Ingeniero diseñador son:

$$N_a = N_i - N_x = (2C + 6) - (2C + 6) = 0$$

Este número indica que el sistema quedó completado, al fijar las condiciones anteriores.

Otro arreglo para el análisis de una etapa de equilibrio fué propuesta por Kwauk (1) en donde las corrientes L_{n+1} y V_{n+1} son mezclados antes de entrar a la etapa de equilibrio en un mezclador para proveer de una corriente de producto de dos fases, la cual es alimentada directamente al plato de equilibrio.

Dicho arreglo proporciona 3 corrientes de material y una corriente de calor (Q de mezclado), pero es necesario aclarar que las corrientes de materia no son iguales, ya que únicamente dos contienen una sola fase y la otra contiene dos fases, de ésta manera:

$$N_v = 2(c + 2) + (c + 2) + 1 = 3c + 7$$

El conjunto de restricciones para éste caso esta dado por C balances de componentes y un balance de Energía los cuales dán:

$$N_c = C + 1$$

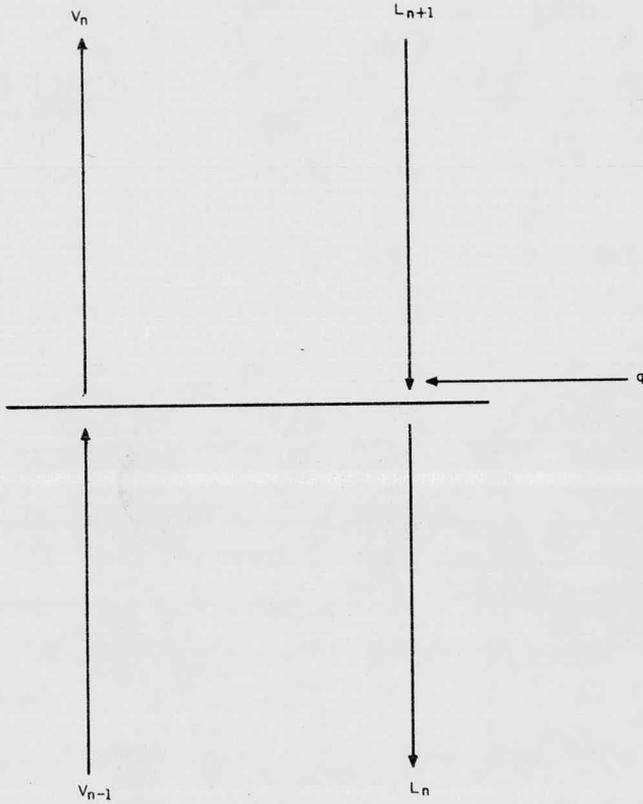


Figura No. 7
ETAPA SIMPLE DE EQUILIBRIO

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

Entonces:

$$N_i = N_v - N_c = (3c + 7) - (c + 1) = 2c + 6$$

Las variables independientes normalmente fijadas por el Ingeniero diseñador son:

L_{n+1}	$C + 2$
$V_n \neq 1$	$C + 2$
Q en el Mezclador	1
π en el Mezclador	1

Por consiguiente:

$$N_x = (C + 2) + (c + 2) + 1 + 1 = 2c + 6$$

Las cuales hacen que el número de posibles grados de libertad restantes a especificar por el Ingeniero diseñador sea cero, debido a que:

$$N_a = N_i - N_x = (2c + 6) - (2c + 6) = 0$$

Que es el mismo resultado obtenido por SMITH (3) y GUILLILAND (2).

e).- ANALISIS DE ELEMENTOS COMPLEJOS.

Un elemento complejo es esencialmente un elemento modificado, las modificaciones usualmente son las adiciones o divisiones de corrientes. Para un elemento complejo las ecuaciones (3 - 1), - -

(3 - 5) y (3 - 6) pueden ser escritas como sigue.

$$N_i = N_v - N_c \quad (3 - 10)$$

$$N_a = N_i - N_x \quad (3 - 11)$$

$$N_a = N_v - N_c - N_x \quad (3 - 12)$$

De un elemento complejo puede obtenerse una combinación de elementos componentes, la relación que tienen éstos elementos complejos con sus componentes, puede escribirse de la siguiente manera:

$$N_v = \sum N_i + N_r \quad (3 - 13)$$

Esta ecuación estipula que el número total de variables de un elemento complejo es igual a la suma de las variables independientes (grados de libertad) de los elementos componentes más N_r , la cual representa libremente el número de veces que un elemento componente puede estar repetido.

Según la ecuación (3 - 13) las restricciones o condiciones que están ya listadas en la, N_i de los elementos complejos, no serán contadas otra vez como condiciones específicas del elemento complejo.

Las condiciones o restricciones necesarias en los elementos complejos, están limitadas a aquellas corrientes que unen a los elementos componen-

tes. Estas corrientes serán denominadas como "Corrientes Intermedias". Cuando dos elementos están conectadas por una corriente intermedia, la corriente de salida de un elemento y la de entrada del otro, son consideradas como dos corrientes independientes cuando los elementos son tratados separadamente, necesariamente poseen las mismas variables intensivas y extensivas.

En la numeración de las Variables fijadas - normalmente para el elemento complejo, la siguiente relación es adoptada:

$$N_x = N_f + \sum (N_x - N_f) \quad (3 - 14)$$

Esta ecuación divide las variables normalmente fijadas en dos grupos, los que pertenecen a la alimentación, N_f , y aquellas que pertenecen a la pérdida de calor y presión,

$$N_x - N_f, \text{ ya que } N_x - N_f = N_Q + N_T.$$

Un elemento complejo y sus elementos componentes tendrán a menudo alimentaciones comunes, debido a ésto la clasificación es realizada únicamente para evitar redundancia en la numeración de estas variables.

Sustituyendo las ecuaciones (3 - 13) y (3 - 14) en (3 - 10) y (3 - 12) se obtiene.

$$N_i = N_i + N_r - N_c \quad (3 - 15)$$

$$N_a = N_i + N_r - N_c - N_f - \sum (n_x - n_f) \quad (3 - 16)$$

Las aplicaciones de éstas ecuaciones son de notadas en la siguiente clase de elementos complejos considerados.

1.- ETAPAS O PLATO DE ALIMENTACION.

Una Etapa de alimentación difiere de una etapa simple de equilibrio en que una quinta corriente está involucrada, como se muestra en la figura 8, en general no existen igualdades entre F y cualquiera de las otras cuatro corrientes de materia, ésto es, la composición, temperatura, presión y velocidad de F no son iguales con las demás corrientes.

Las cinco corrientes de materia y la corriente de calor dan:

$$N_v = 5 (c + 2) + 1 = 5c + 11$$

El conjunto de restricciones incluyen: El equilibrio de las corrientes V_n y L_n el cual implica que la presión y temperatura de ambas corrientes sean iguales, c balances de componentes, un balance de energía y c relaciones de distribución, de los cuales se obtienen:

$$N_c = 2 + C + 1 + C = 2C + 3$$

El número de variables independientes de d_i

seño es entonces:

$$N_i = N_v - N_c = (5C + 11) - (2C + 3) = 3C + 8$$

El número de variables normalmente fijadas por el Ingenio diseñador del elemento es el siguiente:

Especificaciones

- Alimentación (F)	C + 2
- Corriente Ln+1	C + 2
- Corriente Vn - 1	C + 2
Presión de la etapa	1
Intercambio de calor (Q)	1

De esta manera:

$$N_x = (c + 2) + (c + 2) + (c + 2) + 1 = 3C + 8$$

Este número hace, que los posibles grados de libertad a especificar por el ingeniero diseñador sea igual a cero, debido a que:

$$N_a = N_i - N_x = (3c + 8) - (3c + 8) = 0$$

Esto demuestra que el sistema está completamente definido con las especificaciones anteriores.

KWAUK (1) estipula que F y Ln+1 son mezcladas en un mezclador separado antes de entrar a la etapa de equilibrio en contacto con Vn-1. La pre--

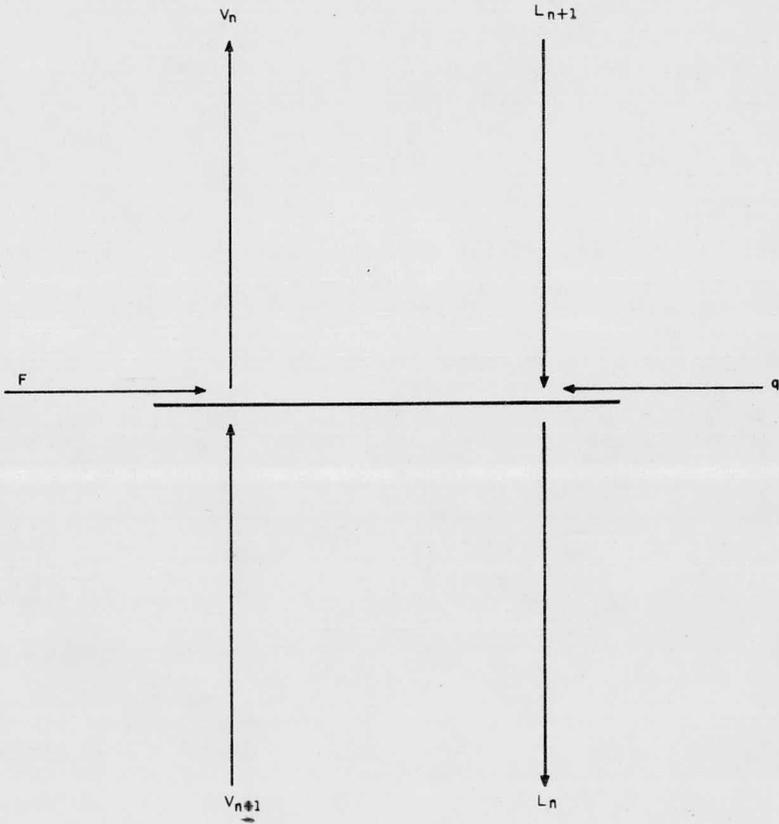


Figura No. 8
ETAPA DE ALIMENTACION

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

si3n y p3rdida de calor por 3sta mezcla extra debe ser especificada. Esto hace que N_i para el arreglo de Kwauk sea igual a $3c + 10$, los cuales hacen que dos variables m3s, la presi3n de mezclado y p3rdida de calor deben ser especificadas por el dise3ador.

2.- ETAPA CON CORRIENTE LATERAL.

Una etapa con corriente lateral es una etapa intermedia en una serie de etapas simples de - equilibrios, por la cual una corriente de producto es retirada. La corriente de producto, puede ser - regresada a otra etapa, despu3s de un enfriamiento o calentamiento; pero 3sto, no es de importancia - en el an3lisis de 3sta etapa. El t3rmino de etapa - con corriente lateral puede ser aplicado a cual - - quier etapa similar a la dibujada en la figura 9, - sin hacer caso de la distribuci3n de la corriente - S.

Ya que cinco corrientes de materia y una co - rriente de calor est3n involucradas, el n3mero to - tal de variables N_V^E es el mismo que para la etapa - de alimentaci3n; es decir:

$$N_V^E = 5 (c + 2) + 1 = 5C + 11$$

El n3mero de relaciones de restricci3n N_C^E , - no es el mismo que para la etapa de alimentaci3n, - ya que la corriente "S" debe de ser id3ntica en - composici3n, temperatura T y presi3n con las corrien - tes L_n y V_n . Entonces N_C^E es:

R E S T R I C C I O N E S .	$\frac{E}{N_c}$
I N H E R E N T E S .	
Composición idéntica entre "S" y Ln o Vn	C - 1
Temperatura y Presión idéntica entre "S" y Ln o Vn.	2
Temperatura y Presión idéntica entre Vn y Ln.	2
Balances de Materia:	
Balances de Componentes	C
Balances de Energía.	1
Relaciones de distribución	C

De ésta manera:

$$N_c = (c - 1) + 2 + 2 + c + 1 + c = 3C + 4$$

Para una etapa con corriente lateral, el número de variables sujetas al control del diseñador entonces se convierten en:

$$N_i = N_v - N_c = (5C + 11) - (3c + 4) = 2C + 7$$

El número de variables normalmente fijadas por el diseñador del sistema es el siguiente:

Especificaciones.

Corriente Ln+1	C + 2
----------------	-------

Corriente Vn-1	C + 2
----------------	-------

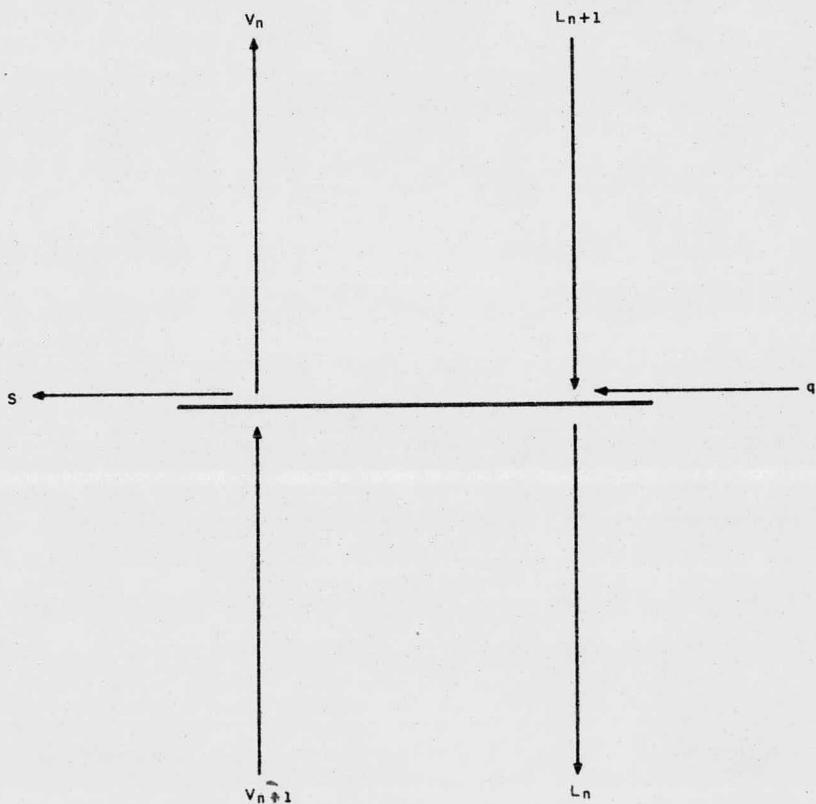


Figura No. 9
ETAPA CON CORRIENTE LATERAL

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

Presión de la etapa.	1
Intercambio de calor.	1

Por consiguiente:

$$N_x = (c + 2) + (c + 2) + 1 + 1 = 2c + 6$$

Las posibles variables independientes o grados de libertad a especificar por el diseñador --- son:

$$N_a = N_i - N_x = (2c + 7) - (2c + 6) = 1$$

Este número representa que para definir completamente el diseño de éste elemento, el diseñador necesita especificar otra variable del sistema, y éste grado de libertad adicional debería probablemente ser utilizado para especificar la velocidad de "S".

La composición, temperatura y presión de "S" son fijadas por las especificaciones usualmente hechas para la etapa de equilibrio como se mencionó anteriormente.

3.- COLUMNA DE ABSORCION O EXTRACCION.

La figura 10 muestra una columna de absorción o extracción. La corriente L_{n+1} es el aceite-absorbedor en una columna de absorción o el solvente fresco en una columna de extracción.

La columna resulta de la combinación de N -

etapas simples de equilibrio. La etapa 1 no es tomada como etapa de alimentación ni la etapa N como etapa con corriente lateral, entonces cada una involucra solamente cuatro corrientes de material.

Las corrientes de intercambio de calor no están mostradas en la figura 10 pero existen y sus magnitudes deben ser especificadas por el diseñador.

La decisión de la forma de usar el número de etapas es del diseñador, y por consiguiente la especificación de N constituye un grado de libertad particular, y $N_r = 1$. El número total de variables N_v a ser consideradas está dado por:

$$N_v = \sum_{E} N_i^E + N_r = N (2c + 6) + 1$$

Debido a que $N_i^E = 2c + 6$ para una etapa simple de equilibrio.

Hay 2 (N-1) corrientes intermedias, las cuales contribuyen con (c + 2) variables independientes, por consiguiente habrán 2 (N-1) (c + 2) nuevas identidades (no enumeradas anteriormente) que existen cuando los elementos están combinados.

La sustracción de éstas restricciones de N_v nos dan N_i^E grados de libertad disponibles para el diseñador:

$$N_i^E = N_v - N_c$$

$$N_i^E = \left[1 + N(2C + 6) \right] - \left[2(N - 1)(C + 2) \right] = 2C + 2N + 5$$

Las variables normalmente fijadas por diseño son:

	E
Especificaciones	N _x
Presión en cada etapa	N
Intercambio de calor en cada etapa.	N
Corriente Vo o F	C + 2
Corriente Ln+1 o S	C + 2

Por consiguiente:

$$N_x = N + N + C + 2 + C + 2 = 2C + 2N + 4.$$

Los posibles grados de libertad restantes para definir completamente el diseño del elemento son:

$$N_a^E = N_i^E - N_x^E = (2C + 2N + 5) - (2C + 2N + 4) = 1$$

Este número expresa que para definir completamente el sistema, el ingeniero diseñador debe especificar otra variable del sistema, la cual podría ser el número de etapas N del absorbedor, el cual toma ese grado de libertad restante.

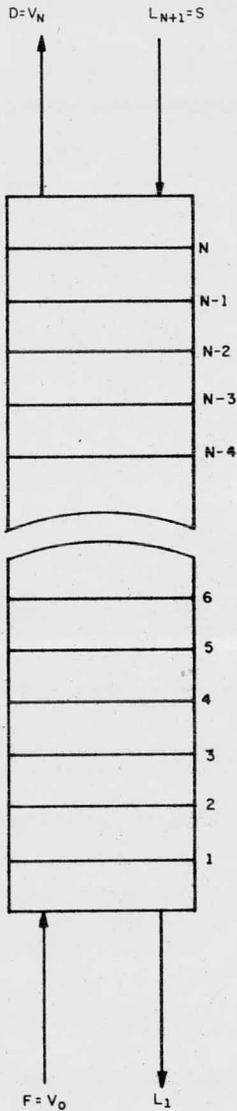


Figura No. 10

COLUMNA DE ABSORCION O
EXTRACCION SIMPLE

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

4.- CONDENSADOR O REHERBIDOR TOTAL CON REFLUJO.

La figura 11 muestra el diagrama de flujo - de este elemento complejo.

Como puede ser visto, dos tipos de elemen-- tos están involucrados de los cuales cada uno de - ellos participan en el número total de variables - N_v consideradas tales como:

Elementos	$N_v = \sum^e N_i + N_r$
Divisor de Corriente	C+5
Condensador o reherbidor total	C+4

De ésta manera:

$$N_v = \sum^e N_i + N_r = (C + 5) + (c + 4) = 2C + 9$$

Debido a que no hay en éste caso variables repetidas; $N_r = 0$.

Hay una corriente intermedia, la cual contribuye con $(c + 2)$ variables independientes, por lo tanto habrá 1 $(C + 2)$ nuevas identidades no enumeradas anteriormente, de ésta manera:

$$N_c = C + 2.$$

El número de variables independientes o grados de libertad las cuales deben ser especificadas es:

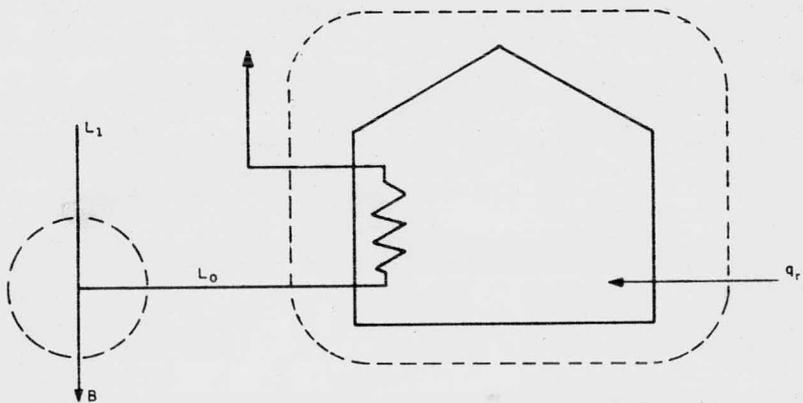
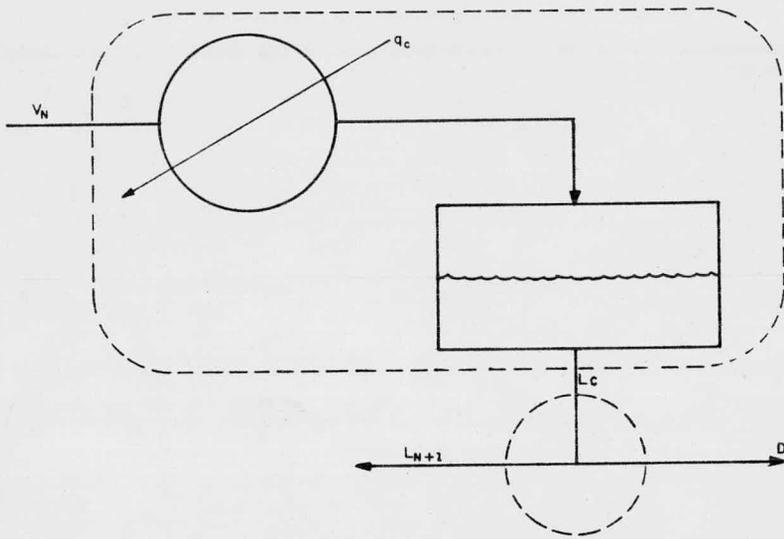


Figura No. 11
CONDENSADOR O REHEVADOR TOTAL
CON REFLUJO.

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

$$N_i = N_v - N_c = (2c + 9) - (c + 2) = c + 7$$

Las variables independientes normalmente fijadas por diseño son:

Especificaciones	E	
Alimentación	(Nf)	C + 2
Presión y temperatura del divisor		2
Presión y temperatura del condensador o reherbidor.		2

Por consiguiente:

$$N_x = N_f + N_Q + N_{\pi} = (C + 2) + 4 = C + 6.$$

Las posibles variables independientes o grados de libertad restantes a especificar son:

$$N_a = N_i - N_x = (c + 7) - (c + 6) = 1$$

La especificación de la relación de reflujo o el intercambio de calor complementa todas las variables necesarias para definir completamente el sistema.

f).- ANALISIS DE UNIDADES Y UNIDADES.

COMPLEJAS.

El análisis para unidades y unidades complejas será considerado al mismo tiempo, debido a que una unidad o unidad compleja resulta de la combinación

ción de elementos o elementos complejos. Este análisis será realizado analizando cada uno de los elementos componentes de la unidad o unidad compleja; y, combinando esos resultados obtendremos la respuesta justa del sistema considerado.

Debido a lo anterior; en el presente análisis, las acuaciones empleadas son las mismas que fueron usadas en el análisis de elementos y elementos complejos; así que, para el cálculo del número total de variables intensivas y extensivas que deben considerarse en una combinación de elementos, la siguiente ecuación es empleada:

$$N_v^u = N_r + \sum^e N_i \quad (3 - 17)$$

donde el índice sobreescrito, "U", se refiere a la unidad, unidad compleja, o combinación de elementos y "E" se refiere en términos generales a los elementos componentes.

El número de variables independientes N_i^u asociadas con la combinación puede ser calculado por:

$$N_i^u = N_v^u - N_c^u \quad (3 - 18)$$

donde N_c^u representa las nuevas relaciones de restricción que surgen cuando los elementos están combinados. N_c^u no incluye ninguna de las relaciones de restricción consideradas en el cálculo de N_i^e para varios elementos.

El número de variables independientes fija-

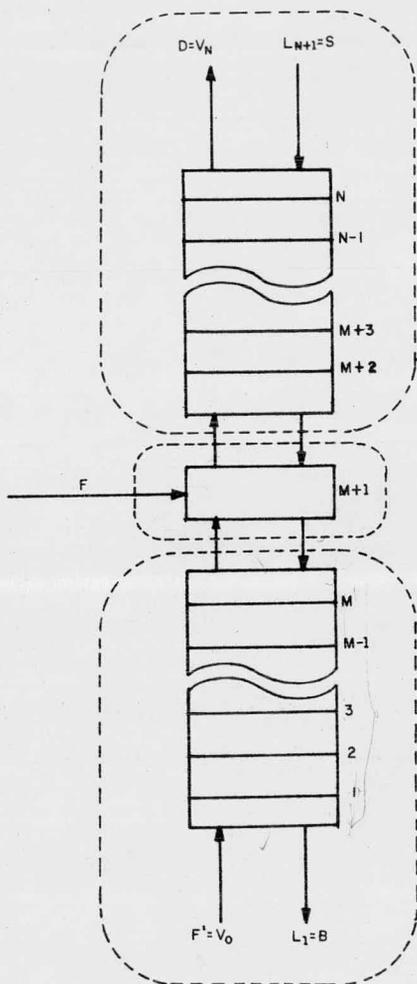


Figura No. 12
UNIDAD DE ABSORCION O EXTRACCION
CON DOS ALIMENTACIONES.

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

das normalmente por diseño, puede ser calculado por:

$$N_x = N_f + \sum (N_Q + N_{\pi}) \quad (3 - 19)$$

Las posibles variables independientes restantes a especificar por el ingeniero diseñador, serán calculados de la siguiente manera:

$$N_a = N_i - N_x \quad (3 - 20)$$

Las aplicaciones de éstas ecuaciones están dados en los siguientes ejemplos.

1.- COLUMNA DE ABSORCIÓN O EXTRACCIÓN CON DOS ALIMENTACIONES.

La figura 12 ilustra la realidad de una columna de absorción o extracción con dos alimentaciones, está compuesta esencialmente por dos unidades simples de absorción o extracción conectadas por una etapa de alimentación intermedia. El número de variables independientes N_i asociadas con una etapa de alimentación es $3C + 8$. De los análisis de una columna de absorción o extracción es conocido que las N_i para la sección de fondo es $2c + 2M + 5$ y las N_i para la sección de domo es $2c + 2(N - M - 1) + 5$, debido a que el número de platos en ésta sección resulta de la diferencia del número de platos de ambas secciones.

Esta suma incluye los grados de libertad necesarios para especificar el número de etapas en -

cada sección la combinación de los tres elementos-
dá:

$$N_v^u = (3c + 8) + (2C + 2M + 5) + 2C + 2(N - M - 1) + 5$$

$$N_v^u = 7c + 2N + 16.$$

El número de relaciones de restricción debi-
do a las nuevas corrientes intermedias por unión -
de elementos es:

$$N_c^u = 4(c + 2) = 4c + 8 \quad \text{y} \quad N_i^u = (7C + 2N + 16) - (4c + 8) = 3C + 2N + 8.$$

Las variables independientes normalmente fi
jadas por diseño son:

Especificaciones	N_x^u
Presión en cada etapa	N
Intercambio de calor en cada etapa	N
La corriente S o L_{n+1}	C + 2
La alimentación F	C + 2
La corriente F' o V_o	C + 2

De esta manera:

$$N_x^u = N + N + C + 2 + C + 2 + C + 2 = 3C + 2N + 6$$

Los posibles grados de libertad o variables

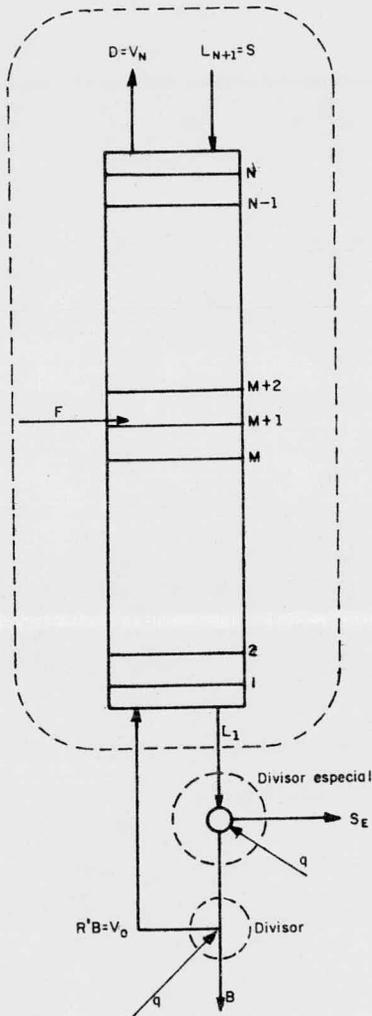


Figura No. 13
COLUMNA DE EXTRACCION CON UNA ALIMENTACION
Y UN EXTRACTOR DE REFLUJO.

FACULTAD DE QUIMICA UNAM.

TESIS PROFESIONAL

ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO 1978

independientes restantes a especificar por el diseñador son:

$$N_a = N_i - N_x = (3c + 2N + 8) - (3C + 2N + 6) = 2$$

Este número, indica que para definir el diseño del sistema el ingeniero diseñador debe especificar otras dos variables las cuales pueden ser: el número total de etapas, N y el número de etapas abajo de la alimentación, M .

2.- UNIDAD DE EXTRACCION CON EXTRACTOR DE REFLUJO.

Una columna de extracción con una alimentación y operando con un extractor de reflujo es mostrado en la figura 13.

Si V_o es sustituida por F' , puede ser notado que el elemento más grande de ésta figura es igual a la unidad mostrada en la figura 12, y por consiguiente posee $3c + 2N + 8$ variables independientes cuando se considera totalmente. El elemento divisor normal en la figura 13, fué mostrado y analizado anteriormente para dar una $N_i = c + 5$.

Una columna de extracción que opera con un extractor de reflujo requiere del uso de alguna clase de dispositivo de extracción para recobrar el solvente de la extracción de la corriente saliente de la etapa 1. No obstante, el tipo de dispositivo de extracción utilizado, para los propósitos de éstos análisis, podemos considerar el dispositivo como un divisor especial el cual divide cada componente de L_1 en Se y $(L_1 - Se)$ de acuerdo -

con la recuperación de factores especificados por el diseñador. En general, las corrientes SE y (L1-SE) no necesitan, estar en equilibrio mutuamente, y por consiguiente, la relación de distribución de equilibrio no puede ser estipulada en el caso general. Además las corrientes SE y (L1 - SE) no necesitan estar a la misma presión y temperatura.

Las tres corrientes de material y una corriente de energía asociadas con el divisor especial dán:

$$N_v^E = 3 (c + 2) + 1 = 3C + 7.$$

En éste sistema no hay restricciones inherentes idénticas o restricciones de distribución de equilibrio, las relaciones de restricción constan solamente de c balances de componentes y un balance de energía y $N_c^E = C + 1$, entonces:

$$N_i^E = N_v^E - N_c^E = (3C + 7) - (C + 1) = 2C + 6$$

Para el divisor especial.

La especificación de la corriente de alimentación L1 involucrará $C + 2$ variables, el diseñador podrá utilizar las $C + 4$ variables restantes para especificar la recuperación de cada componente en SE y las temperaturas y presiones de las dos corrientes de productos.

Sumando las N_i^E para los tres elementos involucrados en la figura 12 obtenemos:

$$N_v = \sum N_i = (3C + 2N + 8) + (C + 5) + (2C + 6) = 6C + 2N + 19$$

Tres corrientes intermedias son formadas -- cuando los tres elementos están combinados, así -- que:

$$N_e = 3 (c + 2) = 3C + 6$$

Por lo tanto, el número de variables inde--pendientes sobre las cuales el diseñador tiene con--trol es:

$$N_i = N_v - N_e = (6c + 2N + 19) - (3c + 6) = 3c + 2N + 13$$

Las variables que son normalmente especificadas por diseño son:

	N_x
Especificaciones	N_x
Presión en cada etapa	N
Intercambio de calor en cada etapa	N
Temperatura y presión de la corriente SE	2
Temperatura y presión de la corriente (L1 - SE)	2
Intercambio de calor y presión del divisor.	2

$$S \qquad C + 2$$

$$F \qquad C + 2$$

Entonces:

$$N_x = N + N + 2 + 2 + 2 + C + 2 + C + 2 = 2C + 2N + 10$$

El número de posibles variables independientes restantes a especificar por el diseñador es:

$$N_a = N_i - N_x = (3C + 13) - (2C + 2N + 10)$$

$$N_a = C + 3$$

Este número indica que para completar el di seño del sistema, el diseñador debe especificar $C + 3$ variables más, que pueden ser: El número total de etapas, N , que contribuyen con un grado de libertad, el número de etapas abajo de la etapa de alimentación, M ($N_i^e = 1$), la relación de reflujo en el extractor $R' = V_0/B$ ($N_i = 1$) y la recuperación de cada componente en el divisor especial que contribuye con C grados de libertad. La suma de los grados de libertad para éstas especificaciones dan $N_i = C + 3$ necesarios para completar el di seño de la unidad.

3.- UNIDAD DE EXTRACCION CON DOS ALIMENTACIONES. Y REFLUJO REFINADO.

Una unidad de extracción con dos alimentaciones y en sistema para refinar el reflujo es mos

trada en la figura 14. Como puede ser visto la undad consta de tres elementos que son: una columna-simple de extracción con dos alimentaciones, que - contribuye con $3C + 2N + 8$ grados de libertad, un-divisor que involucra $C + 5$ grados de libertad y - un mezclador que involucra $2C + 6$ grados de liber-tad. La suma de éstos tres elementos dan:

$$N_v^u = \sum N_i^E = (3C + 2N + 8) + (C + 5) + (2C + 6) = 6C + 2N + 19$$

Tres corrientes intermedias son formadas -- cuando los tres elementos están combinados, tal - que:

$$N_c^u = 3 (c + 2) = 3C + 6$$

Los grados de libertad o variables indepen-dientes sobre los cuales el diseñador tiene con-trol son:

$$N_i^u = N_v^u - N_c^u = (6C + 2N + 19) - (3C + 6) = 3C + 2N + 13$$

Las variables independientes normalmente fijadas por diseño, involucran de éstos N_i los si- - guientes:

Especificaciones.	N_x^u
Presión en cada etapa	N

Intercambio de calor en cada etapa	N
Presión y temperatura de la corriente D.	2
Presión y temperatura de la corriente RD.	2
S	C + 2
F	C + 2
Intercambio de calor y presión del mezclador.	2

De ésta manera:

$$N_x = N + N + 2 + 2 + 2 + C + 2 + C + 2 = 2C + 2N + 10$$

El número de variables independientes restantes a especificar, por el ingeniero diseñador es:

$$N_a = N_i - N_x = (3C + 2N + 13) - (2C + 2N + 10)$$

$$N_a = C + 3.$$

Este número indica que el ingeniero debe especificar las siguientes variables para completar el diseño de la unidad:

Número total de etapas N.	1
Número de etapas abajo de la alimentación M.	1

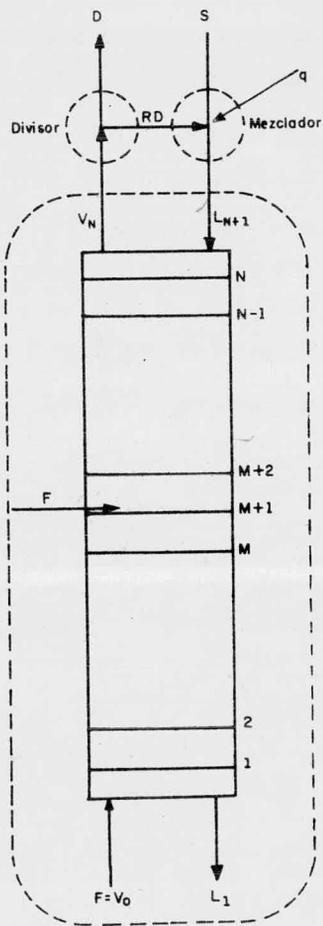


Figura No. 14
COLUMNA DE EXTRACCION CON DOS ALIMENTACIONES
Y REFLUJO REFINADO.

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

Relación de reflujo en el divisor 1

Recuperación de cada componente
en el divisor.

$$\frac{C}{C + 3}$$

4.- UNIDAD DE DESTILACION CON UNA ALIMENTACION, -
CONDENSADOR TOTAL Y REHERBIDOR PARCIAL.

La figura 15, muestra los distintos elementos que comprende una unidad de destilación que posea una alimentación, un condensador total y un reherbidor parcial. El número de variables, N_v , que pueden ser consideradas en el análisis completo de la unidad es la suma de las N_i para los seis elementos involucrados:

ELEMENTOS.	$N_v = \sum N_i$	
Condensador total.	C	+ 4
Divisor de reflujo.	C	+ 5
N - (M+1) etapas simple de equilibrio	2C + 2	(N-M-1) + 5
Etapas de alimentación.	3C	+ 8
(M-1) Etapas simples de equilibrio.	2C + 2	(M-1) + 5
Reherbidor parcial	C	+ 4
	<hr/>	
	10C	+ 2 N + 27

Las N_i enlistadas para la sección de etapas simple de equilibrio fueron obtenidas del análisis de una columna de absorción o extracción simple.

Nueve corrientes intermedias son formadas -

por la combinación de los elementos involucrados, y por consiguiente:

$$N_c^u = 9 (c + 2) = 9c + 18.$$

Los grados de libertad o variables independientes disponibles para el diseñador son:

$$N_i^u = N_v^u - N_c^u = (10c + 2N + 27) - (9c + 18) = C + 2N + 9.$$

Las variables independientes, normalmente fijadas por diseño, por el ingeniero diseñador son:

Especificaciones	N_x^u	:
Presión en cada etapa (incluyendo reherbidor)	N	:
Alimentación F.	C + 2	:
Presión el condensador.	1	:
Presión es el divisor de reflujo	1	:
Intercambio de calor en cada etapa (Incluyendo reherbidor)	N-1	:
Intercambio de calor en el divisor de reflujo	$\frac{1}{C + 2N + 4}$:

De ésta manera:

$$N_a^u = N_i^u - N_x^u = (C + 2N + 9) - (C + 2N + 4) = 5$$

Este número indica que el ingeniero diseñador tiene 5 posibilidades de especificar otras variables para completar el diseño del sistema. Dentro de éstas las cinco especificaciones más comunes son:

Temperatura de reflujo.	1
Número total de etapas, N.	1
Número de etapas abajo de la etapa de alimentación M.	1
Relación de destilado o D/F.	1
Relación máxima de vapor permitido o V/F	$\frac{1}{5}$

En muchas situaciones, N y M son determinadas y la relación máxima de vapor permitido es conocida por experiencia o puede ser inmediatamente estimada. La composición de D y B pueden ser calculadas como una función de velocidades elevadas, otras especificaciones pueden ser más convenientes en otros problemas y cualquiera de las cinco variables listadas anteriormente puede ser sustituida por una o más de las variables siguientes:

- 1.- Relación de reflujo R/D.
- 2.- Carga del Condensador Q_c .
- 3.- Carga del reherbido Q_r .
- 4.- Recuperación de uno o dos componentes en D o B.
- 5.- Concentración de uno o dos componentes-

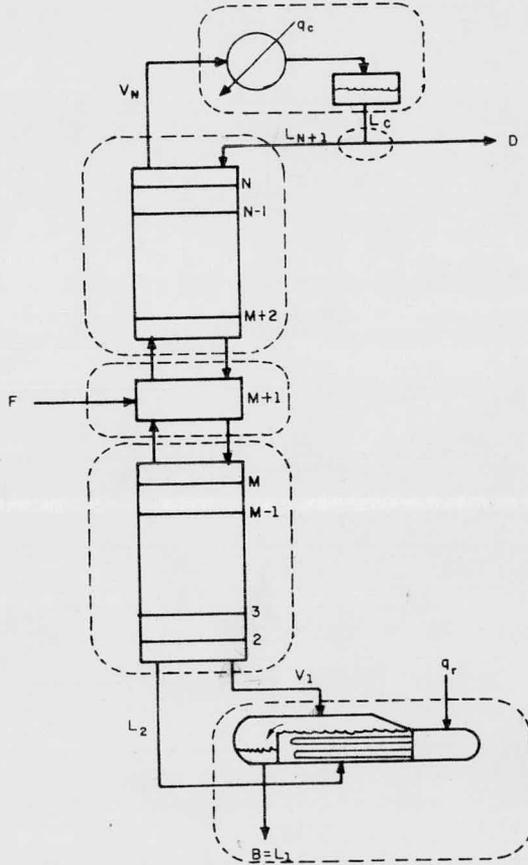


Figura No. 15
COLUMNA DE DESTILACION CON UNA ALIMENTACION, CONDENSADOR
TOTAL Y REHEVADOR PARCIAL.

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

en D o B.

Algunas de las variables anteriores, no pueden ser especificadas independientemente por ejemplo, la magnitud de Q_c especificada, tiene efecto en la temperatura del condensado entre el punto de burbuja y el punto de congelación. Usualmente es más fácil especificar la temperatura del condensado en lugar de Q_c . Otras variables están interrelacionadas de modo que es difícil especificar valores razonables. Cuando son usadas simultáneamente. Las magnitudes de Q_r y Q_c están cercanamente relacionadas de modo que es imposible especificarlas antes de conocer el balance total de Energía o entalpía.

Similarmente, la relación máxima de vapor - está relacionada cercanamente con Q_r . de modo que una situación probablemente imposible será creada, si la especificación de ambas es intentada por el diseñador.

5.- UNIDAD DE DESTILACION CON UNA ALIMENTACION, UN CONDENSADOR PARCIAL Y UN REHERBIDOR TOTAL.

La figura 16, muestra los elementos componentes de una unidad que posee una alimentación un condensador parcial y un reherbidor total.

El número total de variables N_v^u , para la unidad mostrada en la figura, está dado por la siguiente suma de las N_i^u para los siete elementos involucrados:

Elementos.	$N_v^u = \sum N_i^e$	
Condensador parcial	C	+4
Divisor de reflujo	C	+5
N - (M + 1) Etapas simples de equilibrios.	$2C + 2 (N-M-1)$	+5
Etapas de alimentación.	3C	+8
M Etapas simples de equilibrios	$2C + 2M$	+5
Reherbido total.	C	+4
Divisor de fondos.	C	+5
	$11C + 2 N$	+34

Diez corrientes intermedias son formadas - cuando éstos elementos son combinados para formar la unidad, así que:

$$N_c^u = 10 (c + 2) = 10C + 20$$

Por consiguiente el número de variables independientes o grados de libertad sujetas a control es:

$$N_i^u = N_v^u - N_c^u = (11C + 2N + 34) - (10C + 20) = C + 2N + 14$$

De estos grados de libertad, el ingeniero - diseñador toma para fijar por diseño las siguientes:

Especificaciones,	N_x^u
Presión en cada etapa.	N
Presión en el condensador.	1
Presión en el reherbidor.	1
Presión en los dos divisores.	2
Intercambio de calor en cada etapa.	N
Intercambio de calor en los dos <u>di</u> visores.	2
F	$\frac{C + 2}{C + 2N + 8}$

Los posibles grados de libertad restantes a especificar para completar el diseño de la unidad son:

$$N_a = N_i - N_x = (c + 2N + 14) - (c + 2N + 8) = 6$$

Este número expresa, que para completar el diseñador del sistema, se tienen que especificar - otras seis variables, las cuales probablemente pueden ser:

Especificaciones	N_a^u
Relación de productos D_v/D_I	1
Velocidad de circulación L_o a través del reherbidor.	1
Número total de etapas, N.	1
Número de etapas por abajo del plato de alimentación M.	1

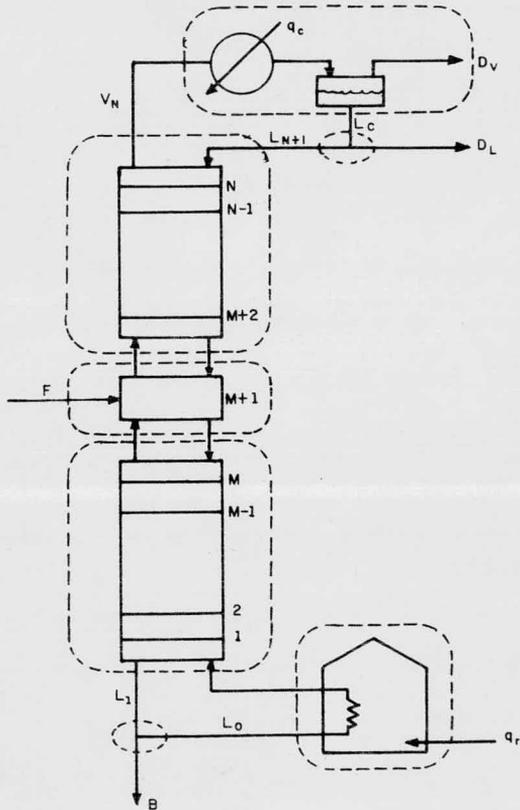


Figura No. 16
COLUMNA DE DESTILACION CON UNA ALIMENTACION, CONDENSADOR
PARCIAL Y REHERVADOR TOTAL

FACULTAD DE QUIMICA UNAM.

TESIS PROFESIONAL

ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO 1978

Relación máxima de vapor o V/F. 1

Relación total de destilado $D=D_v+D_l$
o D/F.

$$\frac{1}{6}$$

Otra posible alternativa, para especificar esas 6 variables posiblemente podrá ser:

1.- Relación de reflujo. $R= L_{n+1} / D.$

2.- Carga del reherbador. Q_r

3.- Carga del Condensador. Q_c

4.- Recuperación de uno o dos componentes -
D o B.

5.- Concentración de uno o dos componentes -
en D o B.

6.- COLUMNA DE DESTILACION CON UNA ALIMENTACION, -
UNA CORRIENTE LATERAL, CONDENSADOR TOTAL Y RE-
HERBIDOR PARCIAL.

La adición de una corriente lateral a la -
unidad mostrada en la figura 15, incrementa el nú-
mero de elementos involucrados desde siete hasta -
ocho, los cuales son mostrados en la figura 17. -
Las N_v^u para la unidad completa en la figura 17 es-
tá establecida por la suma de las N_i^e de los ele-
mentos constituyentes de la unidad, como sigue:

Elementos.	$N_v^u =$	$\sum N_i^e$
Condensador total.	c	+4
Divisor de Reflujo.	c	+5

Handwritten notes and calculations in the top right corner, including a vertical list of numbers (16, 5, 21, 12, 15, 10, 9, 38) and some arithmetic like $34 = 43$.

(N-S) Etapas simples de equilibrio.	$2c + 2 (N - S) + 5$
Etapas con corriente lateral.	$2c + 7$
(S - 1) - (M+1) Etapas simple de equilibrio.	$2c + 2 (S - M - 2) + 5$
Etapas de alimentación	$3c + 8$
(M - 1) Etapa simple de equilibrio.	$2c + 2 (M - 1) + 5$
Reherbador parcial.	$\frac{c + 4}{14c + 2N + 37}$

Las trece corrientes intermedias formadas cuando los ocho elementos están combinados dan:

$$N_c = 13 (c + 2) = 13c + 26$$

Entonces:

$$N_i = N_v - N_c = (14c + 2N + 37) - (13c + 26) = c + 2N + 11$$

La adición de una corriente lateral, incrementó los grados de libertad en dos, comparado con la unidad mostrada en la figura 15, $(c + 2N + 9)$. - Estos dos grados de libertad pueden ser usados para especificar la relación o velocidad de "S", y el número de etapas entre la corriente lateral y el plato de alimentación.

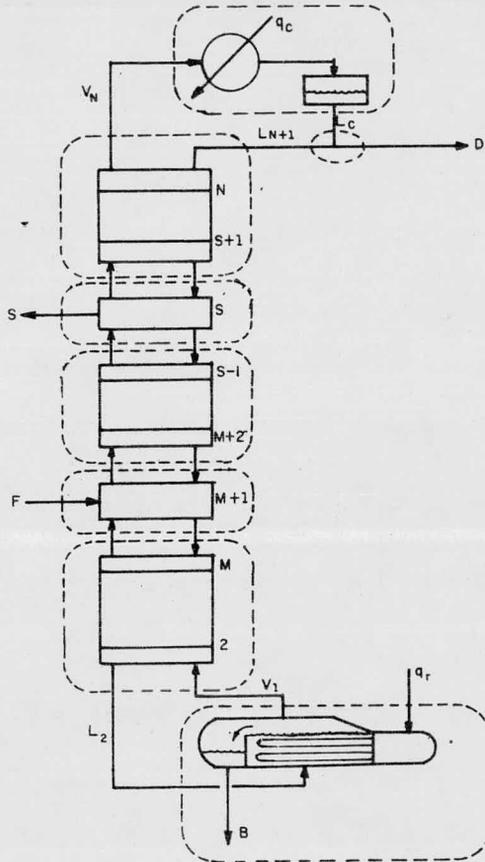


Figura No.17
COLUMNA DE DESTILACION CON UNA ALIMENTACION, UNA
CORRIENTE LATERAL, CONDENSADOR TOTAL Y REHE-
VIDOR PARCIAL.

FACULTAD DE QUIMICA	UNAM.
TESIS PROFESIONAL	
ROBERTO RODRIGUEZ COLLADO	1978

por diseñados
G.L. Fijados

7.- TABLA DE RESULTADOS

ELEMENTOS.	<i>N_v</i> N _i	<i>N_c</i> N _x	<i>N_e</i> N _a
-Corriente individual	c+2	0	0 <i>m-l</i>
-Divisor de Corriente	c+5	C+4	1
-Mezclador.	2c+6	2c+6	0
-Cambiador de calor.	2c+8	2c+7	1
-Bomba, calentadores y			
-Enfriadores.	c+4	C+3	1
-Condensador o reherbidor.			
-Total.	c+4	c+4	0
-Condensador o Reherbidor			
-Parcial.	c+4	c+4	0
-Etapa simple de Equilibrio.	2c+6	2c+6	0
ELEMENTOS COMPLEJOS.			
-Etapa de alimentación.	3c+8	3c+8	0
-Etapa con corriente lateral.	2c+7	2c+6	1
-Columna de Absorción o extrac-			
-ción.	2c+2N+5	2c+2N+4	1
-Condensador o Reherbidor total			
-con Reflujo.	c + 7	c+6	1
UNIDADES Y UNIDADES COMPLEJAS.			
-Còluma de Absorción o extrac-			
-ción.con dos alimentaciones.	3c+2N+8	3c+2N+6	2
-Columna de extracción con ex-			
-tractor de reflujo.	3c+2N+13	2c+2N+10	C+3
-Còlumnas de extracción con dos			
-alimentaciones y reflujo refi-			
-nado.	3c+2N+13	2c+2N+10	C+3

-Columna de Destilación con una alimentación, condensador, total y reherbido ^r Parcial.	$c+2N+9$	$c+2N+4$	5
-Columna de Destilación con una alimentación, un condensador parcial y un reherbido ^r total.	$c+2N+14$	$C+2N+8$	6
-Columna de destilación con una alimentación, una corriente lateral, condensador total y reherbido ^r total.	$c+2N+11$	$c+2N+4$	7

8.- N O M E N C L A T U R A.

A.- Designación de la corriente Principal.

La corriente A' es idéntica con A, en composición y velocidad pero diferente en temperatura y presión.

B.- Velocidad de producto de fondo extraído, moles, peso o volumen por unidad de tiempo.

B' referido al producto de fondo antes de que el reflujo extraído es removido pero después de la recuperación del solvente.

C.- Número de componentes.

Para los sistemas químicamente no reactivos discutidos en ésta tesis, C es idéntico con el número de constituyentes en el sistema.

D.- Domo o producto refinado; moles, peso o volumen por unidad de tiempo.

En extracción, D, se refiere al producto refinado después de que el reflujo refinado es removido pero antes de la recuperación del solvente.

$D_L = L_C - Ln + 1 =$ Velocidad de producto líquido; en moles, peso o Volumen por unidad de tiempo.

Si es un condensador total $= D_v = 0$ y $D_L = D$.

D_v = Velocidad de producto en fase vapor de un condensador parcial, en moles, peso o volumen por unidad de tiempo.

F - Velocidad de alimentación Principal, en moles, peso o volumen por unidad de tiempo.

F'' Velocidad de alimentación secundaria, en moles, peso o volumen por unidad de tiempo.

Si es usada solamente una alimentación, $F' = 0$ y $M = 0$.

$K_i = Y_i / X_i$ = Coeficiente de distribución de equilibrio para el componente i .

L_c .- Líquido constituyente del condensador; moles, peso o volumen por unidad de tiempo.

$L_{n+1} = R_D$ = Líquido o fase extraída, entrando a la etapa N ., moles, peso o volumen por unidad de tiempo.

M = Número de etapas teóricas localizadas abajo de la etapa de alimentación.

La etapa de alimentación es $M + 1$

N .- Índice suscrito, refiriéndose a cualquier etapa.

Puede tomar valores desde 1 hasta N .

N .- Número total de etapas teóricas, incluyendo el reherbador (si es una etapa teórica) y la etapa de alimentación, pero excluyendo el condensador

N_c .- Relaciones o condiciones de Restricción, independientes.

- Ni.- Grados de Libertad, Variancia, número de variables de diseñador puede especificar arbitrariamente.
- Np.- Número de fases presentes en un sistema que contiene muchas fases.
- Nr.- Número de Variables repetidas.
- Nv.- Número total de Variables que el diseñador debe considerar.
- Nx.- Grados de Libertad fijados por diseño del sistema, por el ingeniero diseñador.
- Na.- Grados de libertad especificados para completar el diseño del sistema por el ingeniero diseñador.
- Q, q.- Designación general para una corriente de calor, en BTU por unidad de tiempo. q_c se refiere al calor removido en un condensador y q_r para el calor suministrado a un reherbificador.
- R.- Relación de Reflujo en el domo o Refinado final de columna cantidad de reflujo o cantidad de producto.
- NF.- Grado (S) de libertad fijados normalmente para la alimentación (es).
- N.- Grado (S) de libertad fijados normalmente para la presión (es).
- NQ.- Grado (S) de libertad fijados normalmente para el intercambio de calor.
- R'.- Relación de reflujo en el fondo o extracto final de columna, cantidad de reflujo o can-

tividad de producto.

- S.- Relación de Solvente puro o velocidad de corrientes.
- NS.- Designación general para el número de corrientes involucradas en un sistema.
- S_E.- Solvente recobrado en el equipo de extracción y recuperación de solvente; en moles, peso o volumen por unidad de tiempo.
- .- Presión del Sistema.
- V.- = Fase ligera o relación de fase refinada, en moles, peso o volumen por unidad de tiempo.- Como Índice suscrito denota número de etapas.
- Vo.- Fase ligera o relación de fase refinada entrando a la etapa 1; en moles, peso o volumen por unidad de tiempo.
- P.- = Designación de plato teórico.
- W.- = Trabajo.
- X.- = Concentración de pesados o fase extraída, en unidades consistentes.
- Y. = Concentración de ligeros o fase refinada.

INDICES SOBRESCRITOS.

- c. = Denota un Elemento simple.
- E. = Designación general para un elemento-complejo.
- u. U= Designación de una unidad o unidad compleja.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES:

- 1.- En el aspecto de diseño, los grados de libertad sirven para conocer las interrelaciones, - funciones y resultados de las variables, cuando sus magnitudes son especificadas por el Ingeniero para encontrar una solución única al sistema diseñado.
- 2.- En el aspecto operacional, los grados de libertad sirven para determinar y controlar las manifestaciones que esas variables especificadas por el ingeniero, producen en los resultados - de la operación realizada en el sistema.
- 3.- En el aspecto económico, el diseño se modificará, si cualquier especificación arbitraria realizada por el Ingeniero diseñador es cambiada - y por consiguiente el costo de la unidad también se verá afectado, entonces cuando tales - selecciones arbitrarias están involucradas en una serie de diseño es obligatorio obtener la unidad más económica para la operación asignada.
- 4.- Los grados de libertad, se incrementan, cuando a una unidad original se le adiciona cualquier tipo de elemento o elemento complejo, debido a la necesidad de especificar el elemento adicionado en el análisis.
- 5.- El análisis de los grados de libertad, denotará si los datos de información son insuficien-

tes, exactamente suficientes o abundantes con respecto a la especificación de una solución-única.

- 6.- Algunos elementos, como Válvulas compresores, etc., no fueron analizados, porque su funcionamiento es similar a muchos elementos analizados, ya que poseen dar corrientes de material y una de Energía debido a cambios de presiones.
- 7.- Los análisis realizados en ésta tesis, para el cálculo de los grados de libertad, están esencialmente referidos a los sistemas en los cuales no se verifica reacción química, es decir a sistemas químicamente no- reactivos.
- 8.- Si el número de grados de libertad es menor que el número de datos de información, no hay una solución única para cualquiera de los datos faltantes.
- 9.- El método de análisis propuesto, fue desarrollado completamente por KWAIK, y puede ser considerado como el más general y claro para el estudio de estos sistemas. También la nomenclatura utilizada es lo que KWAIK utilizó al formar las bases del método.
- 10.- Como cualquier otro método propuesto, las especificaciones realizadas en ésta tesis son arbitrarias, pero están encaminadas a cumplir con los fundamentos básicos del método propuesto. Así que es permitido cambiar cualquiera de esas especificaciones por otras si se -

persiguen los mismos objetivos mencionados an
teriormente.

CAPITULO V

B I B L I O G R A F I A .

- 1.- KWAUK MOOSON.
A I C H E JOURNAL.
A System for counting Variables en Separation
Processes.
Junio 1956.
- 2.- GILLILAND, E. R. AND C. E. REED.
INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY.
Degrees of freedom in multecomponent absorp--
tion and Rectification Columns.
Mayo, 1942.
- 3.- SMITH B. D.
DESIGN OF EQUILIBRIUM STAGE PROCESSES.
McGRAW - HILL BOOK COMPANY.
NEW YORK, 1963.
- 4.- PERRY, JOHN H.
CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK.
McGRAW - HILL BOOK COMPANY.
FIFTH EDITION.
- 5.- WHITWEL JOHN C AND RICHARD K TONEER.
Consevation of mass and Energy.
McGRAW - HILL BOOK COMPANY.
- 6.- C. J UDSON KING.
Separation Processes.
McGRAW - HILL BOOK COMPANY.

- 7.- SHERWOOD.
A Course of Process Desega.
McGRAW - HILL BOOK COMPANY.
- 8.- HENLEY AND ROSEN.
Material and Energy balance computations.
John Wiley and Sons 1 Ne.
NEW YORK.
- 9.- E. R. GILLILAND.
New Design Calculation for multicomponent
Rectification.
Industrial and engineering Chemistry.
Marzo, 1935.
- 10.- PARK L. MORSE.
Degrees of Freedom for Steady State flow
Systems.
Industrial and Engineering chemistry.
Vol. 43, No. 8 (1951).
- 11.- WOORYOUNG LEE, H. H. AND DALE F. RUDD.
Design Variable Selection to simplify
Process Calculations.
A. I. CH. E. JOURNAL.
NOVIEMBRE. 1966.
- 12.- L. BERTRAND AND L. B. JONES.
Controlleng Destillation Columns.
Chemical Engeneering.
Febrero 1961.

- 13.- W. K. LEWIS. JR.
Rectification of Benary Mixtures.
Industrial and Engineering Chemistry.
Abril 1936.
- 14.- A. E. RQVICZ. AND R. L. NORMAN.
Heat and mass balancing an a digital computer
Chemical Engeneering Progress.
Mayo 1964.
- 15.- E. M. ROSEN.
A Machine computation methad for performing
material balances.
Chemical Engeneering Progress.
Octubre 1962.
- 16.- DALE F. RUDD.
The Synthesis of system Designs.
A. I. CH. H. JOURNAL.
Vol. 14 No. 2 (1968)
- 17.- HIMMELBLAU. D.
Process Analysins and Simulation determinis--
tis System.
Reverte 1966.
- 18.- BARNES Y GIRAL.
Ingeniería de Procesos.
U N A M.
- 19.- VILBRANDT Y DRYDEN.
Ingeniería de diseño de plantar industriales
Mc-GRAW - HILL BOOK COMPANY INC 1966.

- 20.- RUDD, D. F. AND C. C. WATSON.
Strategy en Process Engineering
Wiley New York.



TESIS "CLASICAS"

PASEO DE LAS FACULTADES 32-D
FRACC. COPILCO UNIVERSIDAD
CIUDAD UNIVERSITARIA 20, D. F.