

Separación mediante membranas

II. Analogía entre destilación en columna y el permeado de gases en arreglo de etapas múltiples

J. Armijo C.¹

(Recibido: 15/10/2014 / Aceptado: 13/02/2015)

RESUMEN

En este trabajo se presenta la analogía entre la destilación en columna y el permeado de gases en arreglo de etapas múltiples. El método de McCabe-Thiele se aplica a los módulos de membrana y se obtienen las líneas de operación en la sección de enriquecimiento y la sección de "stripping". El método de cálculo delineado en este trabajo permite determinar los requerimientos del área de membrana por etapas y el área total.

Palabras clave: Permeado, destilación, etapas múltiples, método de McCabe-Thiele

Separation by membrane

II. Analogy between distillation column and gas permeate in arrangement of multi-stage

ABSTRACT

In this paper the analogy between the distillation column and the permeate gas in multistage arrangement is presented. The McCabe-Thiele method is applied to the membrane modules and the operating lines are obtained in the enriching section and the stripping section. The calculation method outlined in this paper to determine the membrane area requirements in stages and the total area.

Keywords: Permeate, distillation, multi-stage, McCabe-Thiele method

1. Departamento Académico de operaciones unitarias. Facultad de Químico e Ingeniería Química. UNMSM. jarmijocarranza@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La operación unitaria de destilación es un método que se usa para separar los componentes de una solución líquida mediante la vaporización parcial de esta. El grado de separación depende de la distribución de los componentes entre la fase vapor y la fase líquida.

La destilación se puede llevar a cabo en la práctica por medio de cualquiera de dos métodos principales. El primer método consiste en la producción de un vapor por ebullición de la mezcla líquida que se va a separar en una sola etapa. El vapor generado se recupera como condensado. En este método no se permite que parte del líquido condensado retorne al vaporizador. Un separador "flash" es ejemplo de este método. El segundo método consiste en retornar parte del condensado al vaporizador de la etapa en cuestión. Este método es denominado destilación con reflujo.

Comercialmente la destilación se conduce en grandes columnas verticales acondicionadas con un número determinado de etapas, donde el vapor se condensa y el líquido se evapora de forma simultánea. La figura N° 1 muestra el diagrama de una columna de destilación. La alimentación ingresa en un punto intermedio de la columna. La zona por encima de la alimentación se denomina zona de rectificación y la zona por debajo se le conoce como la zona de "stripping". En el interior de la columna el vapor circula de forma ascendente en tanto que el líquido desciende, ambos de una etapa a otra etapa. Por el tope de la columna los vapores que salen son condensados y parte de este es retornado a la columna como reflujo y otra parte se retira como producto destilado. En el fondo de la columna el líquido que sale es parcialmente vaporizado y retorna a la columna, el líquido no vaporizado se retira como producto residual o de fondo. De esta manera el componente más volátil se concentra en el destilado y el componente menos volátil se concentra en la corriente residual.

El método de McCabe-Thiele^[1,2] es un procedimiento gráfico para la determinación del número de etapas cuando deseamos separar mezclas binarias en columnas de etapas múltiples. El método supone que los flujos de vapor y líquido son constantes de etapa a etapa, en ambas zonas, rectificación y "stripping". Esta suposición hace que se obvие el balance de energía en el análisis y se demuestra que el balance de materia de los componentes de la mezcla se representa mediante una línea recta en el diagrama de equilibrio-composición.

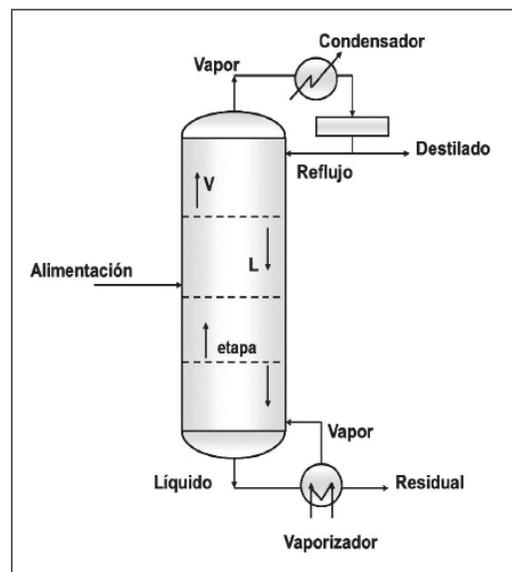


Figura N° 1: Diagrama de una columna de destilación de etapas múltiples que opera en condiciones estacionarias.

En la parte primera^[3] presentamos la analogía entre el destilador "flash" y el módulo de mezcla completa para el permeado de gases, ambos son separadores de una sola etapa. Se desarrolló esquemas de cálculo para el punto de burbuja y de rocío, el cual nos permite construir en el diagrama composición la relación de "equilibrio" entre las corrientes de permeado y rechazo que abandonan el módulo de mezcla completa.

En esta segunda parte presentamos la analogía entre la destilación en columnas y las separaciones mediante membranas en un módulo de mezcla completa para el permeado de gases cuando ambos se llevan a cabo mediante etapas múltiples. La analogía

corresponde al desarrollo de las ecuaciones de McCabe-Thiele aplicado al permeado de gases de mezclas binarias.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La figura N° 2 muestra un módulo de mezcla completa que en el conjunto representa una etapa n cualquiera. Los flujos de las corrientes que abandonan las cámaras de permeado y rechazo son V y L, respectivamente. Así mismo, se muestra las composiciones del componente más selectivo en las corrientes expresadas como fracción molar y, x para el permeado y rechazo, respectivamente.

Las etapas se numeran de arriba hacia abajo. La corriente V que sale de la etapa n alimenta a la cámara de rechazo de la etapa superior n-1. La corriente L que sale de la etapa n alimenta a la cámara de rechazo de la etapa inferior n+1. Las presiones en las cámaras de permeado y rechazo son P_V y P_L , respectivamente. Debido a que la presión $P_L > P_V$ la corriente V debe ser comprimido de etapa en etapa hasta la presión P_L para que esta pueda ingresar a la cámara de rechazo de la etapa superior. Así mismo, la corriente L debe ser comprimida si las pérdidas por fricción son grandes.

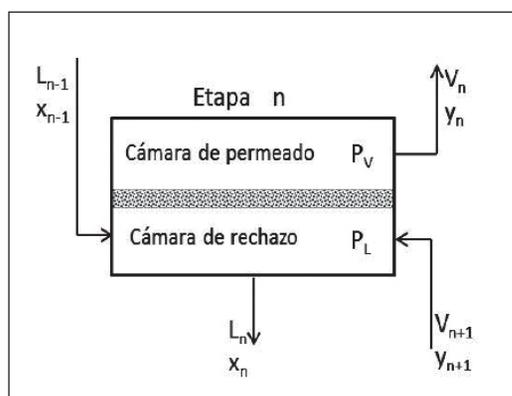


Figura N° 2: Módulo de mezcla completa que se muestra como una etapa con los flujos de permeado (V) y rechazo (L).

2.1. Permeado de mezclas binarias en un sistema de etapas múltiples.

La figura N° 3 muestra el conjunto de Np etapas, donde la alimentación (F) ocurre en la etapa intermedia f. En el “tope” se ubica la etapa 1, de donde parte de la corriente

permeada V_1 retorna a la misma etapa como reflujo (L_0) y la otra parte se retira como destilado (D). Por otro lado, en el “fondo” parte de la corriente de rechazo (L_{Np}) que sale de la etapa Np se retira como producto residual W y la parte remanente retorna a la misma etapa.

Considerando la mezcla binaria A, B donde el componente A es el más selectivo, escribimos las ecuaciones del balance materia para el conjunto de Np etapas alrededor de la zona marcada por la línea punteada de la figura N° 3.

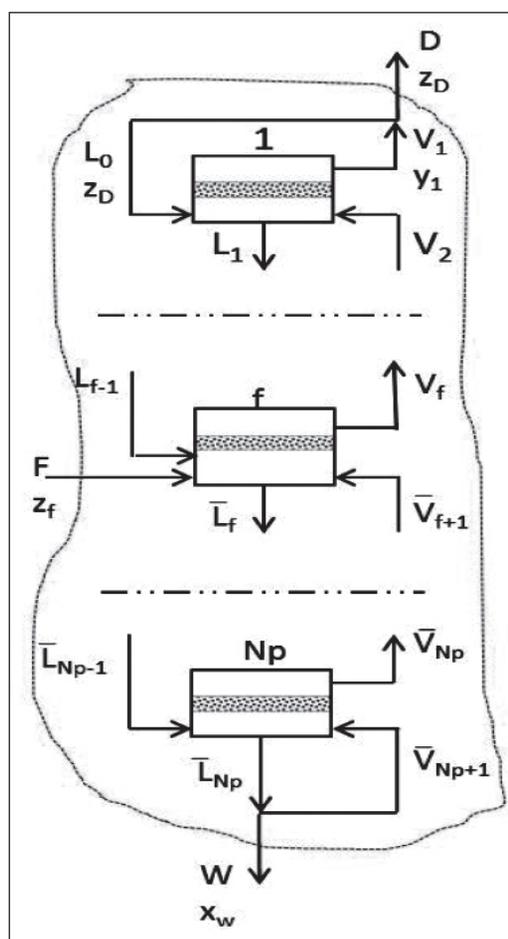


Figura N°3: Sistema de módulos de mezcla completa arreglados en múltiples etapas análogo a una columna de destilación.

Balance global:

$$F = D + W \quad (1)$$

$$z_F F = z_D D + x_W W \quad (2)$$

Combinando estas ecuaciones se demuestra:

$$D = F \left[\frac{z_F - x_W}{z_D - x_W} \right] \quad (3)$$

Balance de materia en el tope

En el “tope” las composiciones del reflujo y el destilado son iguales: $y_1 = z_D = x_0$. Por otro lado:

$$V_1 = D + L_0 \quad (4)$$

Balance de materia entre el tope y el punto de alimentación, zona de rectificación

La figura N° 4 muestra el conjunto de etapas entre el “tope” y una etapa n cualquiera por encima del punto de alimentación. En la figura los flujos de V y L se consideran diferentes, pero el método de McCabe-Thiele supone que son constantes, es decir $V_1 = V_2 = \dots = V_n$. Igualmente $L_1 = L_2 = \dots = L_{n-1}$. Las ecuaciones de balance alrededor de la zona marcada son:

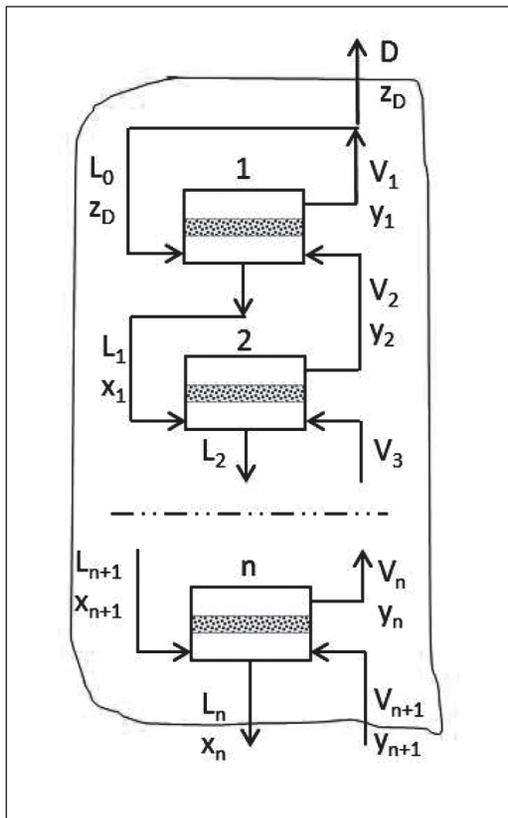


Figura N° 4: Esquema de la zona de rectificación para el conjunto de etapas múltiples.

$$V = D + L \quad (5)$$

Del balance para el componente A se deduce:

$$y_{n+1} = \frac{L}{V} x_n + \frac{Dz_D}{V} \quad (6)$$

La ecuación 6 representa una línea recta, dado que la pendiente (L/V) es constante.

Balance de materia por debajo del punto de alimentación y el fondo de la columna, zona de “stripping”

La figura N° 5 muestra el conjunto de etapas entre el fondo y una etapa m cualquiera por debajo del punto de alimentación. El método de McCabe-Thiele supone que son constantes los flujos V y L entre etapa y etapa, pero entre zona y zona estos son diferentes.

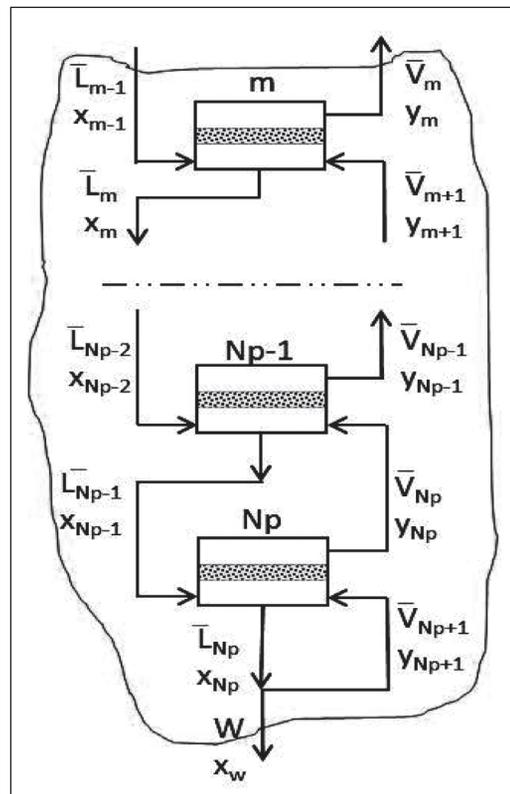


Figura N° 5: Esquema de la zona de “stripping” para el conjunto de etapas múltiples.

Las ecuaciones de balance alrededor de la zona marcada son:

$$\bar{L} = \bar{V} + W \quad (7)$$

Del balance del componente A se deduce:

$$y_{m+1} = \frac{\bar{L}}{V} x_m - \frac{W x_w}{V} \quad (8)$$

Balance alrededor de la etapa de alimentación

La figura N° 6 muestra la etapa de alimentación alrededor del cual hacemos el balance de materia.

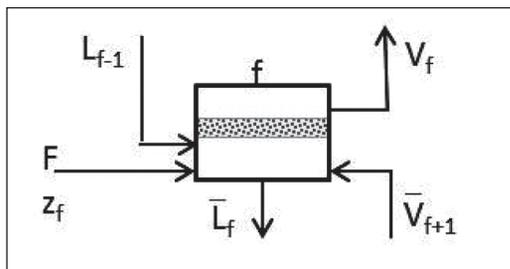


Figura N° 6: Etapa de alimentación para el conjunto de etapas múltiples.

La ecuación de balance es:

$$F + L + \bar{V} = V + \bar{L} \quad (9)$$

Si definimos:

$$q = \frac{\bar{L} - L}{F} \quad (10)$$

Y combinando las ecuaciones 9 y 10 se deduce:

$$\bar{L} = L + qF \quad (11)$$

$$\bar{V} = V - (1 - q)F \quad (12)$$

Las ecuaciones 11 y 12 relacionan los flujos entre las zonas de rectificación y "stripping".

Por otro lado, si las ecuaciones 6 y 8 se reescriben sin el respectivo subíndice tenemos:

$$\begin{aligned} Vy &= Lx + Dz_D \\ \bar{V}y &= \bar{L}x - Wx_w \end{aligned}$$

Restando la segunda ecuación de la primera y combinando con las ecuaciones 2, 11 y 12, se obtiene la línea "q":

$$y = \frac{q}{q-1} x - \frac{z_F}{q-1} \quad (13)$$

La línea "q" representa el lugar geométrico donde se puede hallar la intersección de las dos líneas de operación.

III. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Para determinar el número de etapas se procede de la siguiente manera:

1. Especificar las presiones de las cámaras de permeado y rechazo, P_v , P_L , respectivamente. Suponemos que para todas las etapas estas presiones son las mismas.
2. Especificar el espesor de membrana.
3. Determinar las composiciones de "equilibrio" correspondientes a las corrientes de permeado y rechazo mediante cálculos del punto de burbuja o de rocío, tal como está delineado en la parte primera^[3] de este trabajo.
4. Especificar las siguientes variables: F , z_F , z_D y x_w
5. Suponer la pendiente (L/V) de la línea de operación de la zona de rectificación dada por la ecuación 6. Así mismo suponer el valor de q definido por la ecuación 10. Estas suposiciones se validan cuando el punto de intersección de las líneas de operación se encuentra en la región comprendida entre la curva de "equilibrio" y la línea de 45° . Si se ubicara fuera, se descarta uno de ellos y se vuelve a suponer otros valores para ambos o uno de ellos.
6. Calcular D y W de la ecuación 3.
7. Calcular el flujo V de la ecuación 14:

$$V = \frac{D}{1 - (L/V)} \quad (14)$$
8. Calcular el flujo del reflujo (L_0) de la ecuación 4.
9. Calcular el flujo L de la ecuación 5.
10. Calcular los flujos de L y V en la zona de "stripping" mediante las ecuaciones 11 y 12.
11. Calcular la coordenada x del intercepto de las dos líneas de operación mediante la ecuación 15:

$$x_{\text{intercepto}} = \frac{z_F (1/q - 1) + Dz_D/V}{q(1/q - 1) - L/V} \quad (15)$$

Utiliza este valor para determinar el número de etapas en cada zona de rectificación y "stripping".

12. Grafica en el diagrama composición las líneas de operación de las zonas de rectificación y de "stripping".

13. Determina el número de etapas construyendo escalones mediante el trazado de líneas horizontales y verticales que se intersectan sobre la curva de "equilibrios".

14. Determina para cada etapa el área de membrana necesaria. El área total se calcula como sigue:

$$\text{Área total} = \left[\left(\frac{A_m}{V} \right) V \right]_{ZR} + \left[\left(\frac{A_m}{V} \right) \bar{V} \right]_{ZS} \quad (16)$$

Donde la relación (A_m/V) se determina de los cálculos de punto de burbuja o de rocío, y ZR y ZS se refiere a las zonas de rectificación y "stripping", respectivamente.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El procedimiento de cálculo de la sección anterior se muestra en el caso de la separación Oxígeno(A)-Nitrógeno (B).

TABLA N° 1: Datos de "equilibrio" para la mezcla O2(A)-N2(B)

A_m/V	x_A^*	y_A^*	K_A	K_B
61.1009	0	0	1.77424	1.00000
58.2353	0.05	0.08598	1.71960	0.96212
55.5462	0.10	0.16667	1.66670	0.92592
53.0248	0.15	0.24232	1.61550	0.89138
50.6623	0.20	0.31321	1.56600	0.85849
48.4495	0.25	0.37960	1.51840	0.82719
46.3774	0.30	0.44178	1.47260	0.79746
44.4368	0.35	0.50000	1.42859	0.76922
42.6193	0.40	0.55454	1.38635	0.74243
40.9163	0.45	0.60564	1.34587	0.71702
39.3199	0.50	0.65354	1.30708	0.69292
37.8225	0.55	0.69847	1.26994	0.67007
36.4169	0.60	0.74064	1.23440	0.64839
35.0967	0.65	0.78026	1.20039	0.62784
33.8555	0.70	0.81750	1.16785	0.60834
32.6875	0.75	0.85254	1.13672	0.58982
31.5875	0.80	0.88555	1.10694	0.57225
30.5504	0.85	0.91667	1.07843	0.55555
29.5717	0.90	0.94603	1.05115	0.53967
28.6473	0.95	0.97377	1.02502	0.52457
27.7731	1.00	1.00000	1.00000	0.51019

Espesor de membrana=0.0001 cms
 $P_L = 75.01$ cm Hg
 $P_V = 15$ cm Hg
 Selectividad A/B = 2.2

La tabla N° 1 muestra los resultados de los cálculos del punto de burbuja tal como detalla en la parte I de este trabajo.

La gráfica de y_A frente a x_A representa el diagrama de "equilibrio" para la mezcla Oxígeno-Nitrógeno.

La relación (A_m/V) tiene unidades de cm² por cada cm³/s medida a condiciones STP.

En adelante todos los flujos molares F, D, W, V, L y otros, se expresan de forma equivalente en cm³/s a STP.

Fijamos las siguientes cantidades:

$$F = 100, z_F = 0.21$$

$$z_D = 0.90 \text{ y } x_W = 0.05$$

Suponemos:

$$L/V = 0.85 \text{ y } q=3$$

Calculamos:

$$\begin{aligned}
 D &= 18.823 & W &= 81.176 \\
 V &= 125.49 & L &= 106.666 & L_0 &= 106.666 \\
 \bar{V} &= 325.490 & \bar{L} &= 406.666
 \end{aligned}$$

Las ecuaciones de las líneas de operación son:

$$y_{n+1} = 0.85x_n + 0.135$$

$$y_{m+1} = 1.249x_m - 0.0125$$

El intercepto de estas dos líneas son las coordenadas

$$x=0.369 \text{ y } y=0.449$$

La figura N° 7 muestra en el diagrama composición la curva de "equilibrio", las líneas de operación de las zonas de rectificación y de "stripping" y el trazado de las etapas contadas desde el tope hacia el fondo. La línea q se muestra como línea punteada. La numeración de las etapas se ubica en el vértice de los escalones.

En total se requieren 12 etapas. La zona de rectificación y de "stripping" contiene 6 etapas cada una. La corriente de alimentación ingresa en la sexta etapa contada desde el tope.

La composición de la corriente L a la salida de la etapa número 12 debería corresponder al valor de x_w lo que normalmente no ocurre y por lo tanto deberíamos hacer correcciones a todos los cálculos con la nueva composición que en este caso es $x = 0.058$, el cual es cercano a $x_w=0.05$ y por lo tanto podemos despreciar sus efectos en el balance de materia. Si este valor fuese muy diferente, podría asignarse una etapa adicional al total de etapas.

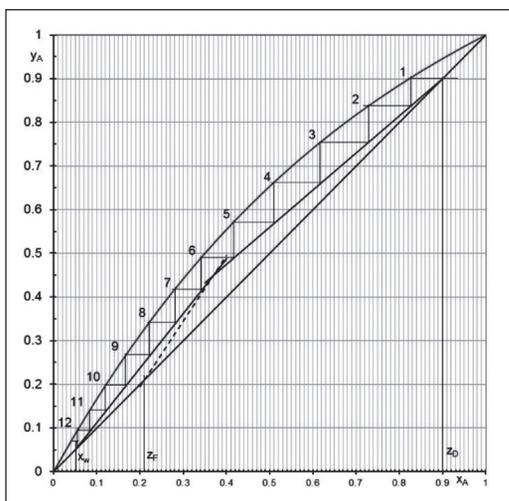


Figura N° 7: Determinación del número de etapas en el diagrama composición para la mezcla Oxígeno(A)-Nitrógeno (B). Selectividad A/B=2.2.

La Tabla N°2 muestra la relación área a flujo, A_m/V , para cada una de las etapas las cuales han sido leídas directamente de la figura N° 7.

TABLA N°2: Área de membrana por etapa			
Leído del grafico		A_m/V en $cm^2/cm^3/s$ STP	
Etapa	x_A	ZR	ZS
1	0.828	31.006724	
2	0.73	33.1547	
3	0.618	35.941628	
4	0.511	38.990472	
5	0.418	42.00622	
6	0.342	44.747296	
7	0.282		47.123356
8	0.222		49.688668
9	0.168		52.1743
10	0.12		54.53764
11	0.082		56.514276
12	0.058		57.664176
A_m/V por zona		225.84704	317.702416

El área total calculada de acuerdo a la ecuación 16 es de 13.18 m².

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los siguientes factores determinan el aumento del área total de membrana requerida:

- Al aumentar el número de etapas.
- Al disminuir la pendiente de la línea de rectificación (L/V).
- La baja selectividad de la membrana.
- La pureza del destilado (z_D) y la concentración del residuo (x_w).

Operacionalmente puede ser impráctico construir módulos de mezcla completa con diferentes áreas de membrana.

Se recomienda estudiar los efectos de variar los flujos V y L entre etapa y etapa con la finalidad de mantener el área de membrana constante.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Treybal R. E., Mass Transfer Operations. Edt. McGraw Hill Inc; 1980.
- [2] Wankat P. Ingeniería de procesos de separación. México: Pearson Educación; 2008.
- [3] Armijo C.J. Separación mediante membranas I Analogía entre destilación Flash y módulo de mezcla completa. Rev. Per. de Química e Ing. Química. 2012; 15: 36-48.

