Tarea 2.1 | Absorción y arrastre, cálculo de etapas y altura de relleno

Esteban Richmond-Salazar

4/9/2017

Contents

1 Problema N° 1

Valor: 10 puntos

Referencia: Adaptado de problema 12.D8 Wankat (2008)

Se van a procesar 12 kmol/h de una solución acuosa concentrada de amoniaco en una columna de arrastre. La alimentación contiene 2 kmol/h de amoniaco y 10 kmol/h de agua. Se desea que la corriente de agua a la salida contenga una fracción molar de amonico de 0,010. El gas de arrastre es aire puro, con una tasa de flujo de 9 kmol/h. La operación es a 40 °C y a 100,66 kPa. Suponga que el aire es insoluble, que el agua es no volátil y que el separador de arrastre es isotérmico.

Pesos moleculares: Amoniaco = 17 u, agua = 18 u, aire = 29 u.Usando el método gráfico:

1. Calcule la cantidad de etapas de equilibrio necesarias, incluyendo la fracción.

2. Calcule la tasa mínima de flujo de aire.

```
# Datos de equilibrio
X_W     = [0.40,  0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.075, 0.05, 0.04, \
    0.03, 0.025, 0.020, 0.016, 0.012, 0.0] # kg/kg, relación masa
p_A     = [ 719,   454,  352,  260,  179,  110,  79.7,   51, 40.1, \
    29.6,  24.4,  19.3,  15.3,  11.5, 0.0] # mmHg


html('<h2>Solución</h2>')
```

```
# Datos del enunciado
L_entra      =  12      # kmol/h
L_NH3_entra  =   2      # kmol/h
L_s          =  10        # kmol/h
x_sale       =   0.010
Y_entra      =   0
G_s          =   9        # kmol/h
t            =  40        # °C
p_t          = 100.66     # kPa
M_NH3        =  17
M_H2O        =  18
M_aire       =  29

# Cálculo de relaciones mol
X_entra = L_NH3_entra/L_s
X_sale  = x_sale/(1-x_sale)

# Conversión de datos de equilibrio a relaciones molares
Xeq     = [X_W[i]*M_H2O/M_NH3 for i in range(len(X_W))]
Yeq     = [p_A[i]/(p_t*760/101.325 - p_A[i]) for i in range(len(p_A)\
    )]

# Descarto los datos correspondientes a concentraciones mucho \
    mayores a las de operación para ajustar mejor a un polinomio.
i       = 0
n_i     = 0
while i <= len(Xeq):
    if Xeq[i] <= X_entra:
        n_i=i-1
        i = len(Xeq)
    i += 1

datos_eq = zip([Xeq[i] for i in range(n_i, len(Xeq))],[Yeq[i] for i \
    in range(n_i, len(Yeq))])

print "Ajuste de los datos de equilibrio"
print "---------------------------------"
# Se definen estas variables para ajustar a un polinomio de 3er \
    grado
%var X, a1, a2, a3, m

modelo(X) = a1*X+a2*X^2+a3*X^3

ajuste    = find_fit(datos_eq, modelo, solution_dict = True)
Y_eq(X)   = modelo(a1=ajuste[a1], a2=ajuste[a2], a3=ajuste[a3])
show(r'$Y^* = %s$' %Y_eq(X))
```

```
print "Parte a): etapas de equilibrio"
print "------------------------------"

Y_op(X)    =  L_s/G_s*X - L_s/G_s*X_sale+Y_entra
Y_sale     =  Y_op(X_entra)

# Cálculo de las etapas ideales
XY_etapas =  [(X_sale, Y_entra)]          # Primer punto de la \
   escalera (X,Y)

forget()
Xi         =  X_sale
while Xi < X_entra:
    Yi     =  Y_eq(Xi)
    XY_etapas.append((Xi,Yi))             # Guarda el punto (X,Y*)
    Xi     =  solve(Y_op(X)==Y_eq(Xi), X, to_poly_solve = True)[0].\
   rhs()
    XY_etapas.append((Xi,Yi))             # Guarda el punto (X,Y)

N_p        = (len(XY_etapas)-3)/2 +(X_entra-XY_etapas[len(XY_etapas)\
   -2][0])/(XY_etapas[len(XY_etapas)-1][0]-XY_etapas[len(XY_etapas)\
   -2][0])

# Gráfica
plot (Y_eq, xmin=0, ymin=0, title = 'Relaciones mol', axes_labels = \
   ['$X_{NH_3}$', '$Y_{NH_3}$'], legend_label='Curva de equilibrio',\
    frame=True) \
    + plot(Y_op, (X_sale,X_entra), color='red', legend_label='Curva \
   de operac.') \
    + scatter_plot(datos_eq, xmax = X_entra, ymax = Y_eq(X_entra)) \
    + line([(X_sale, 0), (X_sale, Y_entra), (0, Y_entra)], color='\
   purple') \
    + line([(X_entra, 0), (X_entra, Y_eq(X_entra))], color='purple')\
    \
    + line(XY_etapas, color='green', legend_label='Etapas') \
    + text (r'$N_p = $ %s' %N_p.n(digits=3),((X_entra+X_sale)/1.5,(\
   Y_entra+Y_sale)/4))

print "Parte b): flujo mínimo de aire"
print "------------------------------"

assume(X>=X_sale); assume(X<=X_entra)              # Define los lí\
   mites de X dónde buscar la relación limitante

Y_op_lim(m, X) = m*X - m*X_sale+Y_entra            # Línea de \
   operación en términos de m = Ls/Gs
m_lim = solve(Y_op_lim(m, X)==Y_eq(X), m)[0].rhs()  # Como hay \
```

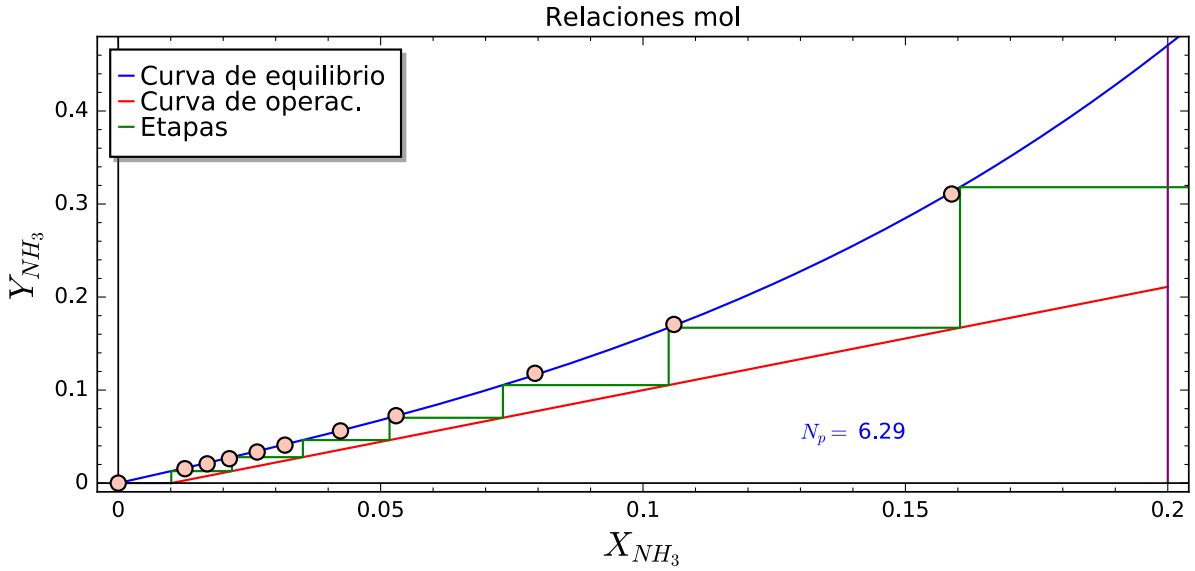
```
    varios puntos devuelve una función de X
forget()                                                    # Elimina los l\
    ímites de X puestos anteriormente

mX_lim = find_local_minimum(m_lim, X_sale, X_entra)  # Devuelve [m_m\
    ín, X(m_mín)]
Gs_min = numerical_approx(L_s/mX_lim[0], digits=3)

# Gráfica
plot (Y_eq, xmin=0, ymin=0, title = 'Flujo limitante', axes_labels =\
     ['$X_{NH_3}$', '$Y_{NH_3}$'], legend_label='Curva de equilibrio'\
    , frame=True) \
     + plot(Y_op_lim(mX_lim[0], X), (X_sale,X_entra), color='red', \
    legend_label='Curva de operac. limitante') \
     + scatter_plot(datos_eq, xmax = X_entra, ymax = Y_eq(X_entra)) \
     + line([(X_sale, 0), (X_sale, Y_entra), (0, Y_entra)], color='\
    purple') \
     + line([(X_entra, 0), (X_entra, Y_eq(X_entra))], color='purple')\
     \
     + text (r'$L_{s}/G_{s,min} = $ %s' %n(mX_lim[0], digits=3),((\
    X_entra+X_sale)/1.5,(Y_entra+Y_sale)/1.5)) \
     + text (r'$G_{s,min} = $ %s kmol/h' %Gs_min,((X_entra+X_sale)\
    /1.5,(Y_entra+Y_sale)/2))


# ***** Final del código *****
```

1.1 Solución

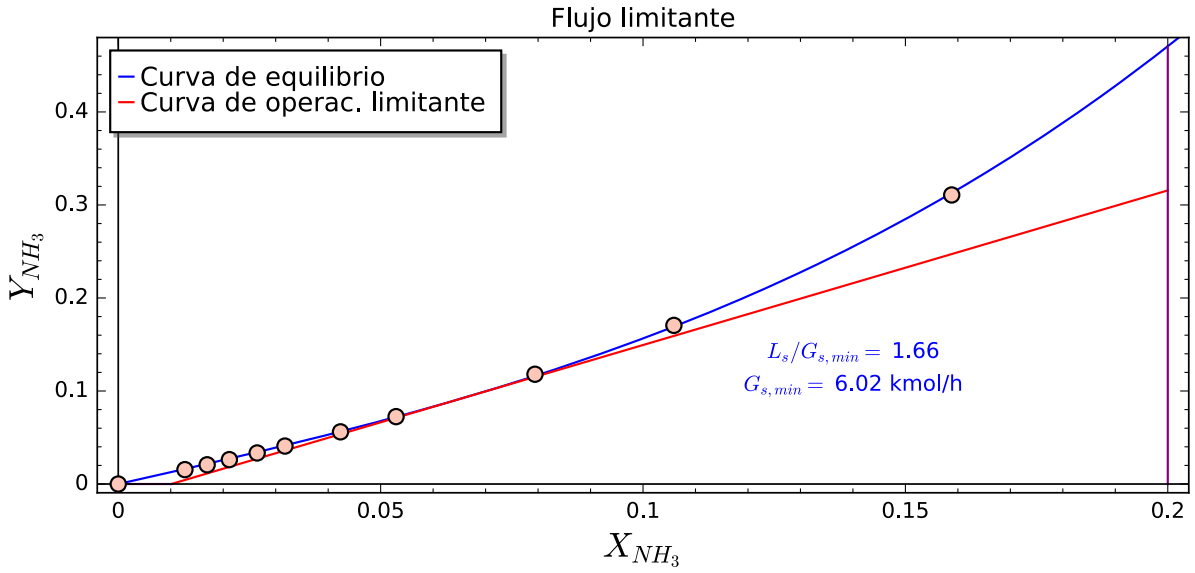
Ajuste de los datos de equilibrio

$$Y^* = 24.26071516681595 * X^3 + 0.5993742453936453 * X^2 + 1.2625176307039803 * X$$

Parte a): etapas de equilibrio



Parte b): flujo mínimo de aire



2 Problema N° 2

Valor: 15 puntos

Referencia: Problema 10.6-6 Geankoplis (1998)

Una corriente de gas contiene 4,0 % mol de NH3 y su contenido de amoniaco se reduce a 0,5 % mol en una torre de absorción rellena que opera a 293 K y 1,013*105 Pa. El flujo de agua pura de entrada es de 68,0 kmol/h y el flujo total de gas de entrada es de 57,8 kmol/h. El diámetro de la torre es 0,747 m. Los coeficientes de transferencia de masa de película son $F_G a$ = 0,0739 kmol/(s m3) y $F_L a$ = 0,169 kmol/(s m3). Determine lo siguiente por método gráfico:

1. Calcule la altura de la torre usando coeficientes individuales de transferencia de masa, $k_y a$

($F_G a$).

2. Calcule la altura de la torre usando coeficientes globales de transferencia de masa, $K_y a$ ($F_{OG} a$).

```
html('<h2>Solución</h2>')

y_entra      =    0.04
y_sale       =    0.005
T            =  293            # K
p_t          =    1.013*10^5   # Pa
L_s          =   68.0           # kmol/h
x_entra      =    0
G_entra      =   57.8           # kmol/h
D_c          =    0.747         # m
FGa          =    0.0739        # kmol/(s m³)
FLa          =    0.169         # kmol/(s m³)

# Datos de equilibrio
datos_x_eq  =  [0,  0.0208,  0.0258,  0.0309,  0.0405,  0.0503,  \
   0.0737,  0.096,   0.137,   0.175,   0.210,   0.241,   0.297]
datos_p_NH3 =  [0, 12.0   , 15.0,    18.2   , 24.9   , 31.7   , 50.0\
      , 69.6  , 114    , 166    , 227    , 298    , 470    ] # mmHg

# Conversión de presiones parciales a fracciones molares
datos_y_eq  =  [pA/(p_t*760/101325) for pA in datos_p_NH3]

# Datos de equilibrio en relaciones molares
datos_X_eq  =  [x/(1-x) for x in datos_x_eq]
datos_Y_eq  =  [pA/(p_t*760/101325-pA) for pA in datos_p_NH3]

Y_entra      =  y_entra/(1-y_entra)
Y_sale       =  y_sale/(1-y_sale)
X_entra      =  x_entra/(1-x_entra)

# Descarto los datos correspondientes a concentraciones mucho \
   mayores a las de operación para ajustar mejor a un polinomio.
i    =  0
n_i  =  len(datos_y_eq)
while i < n_i:      #len(datos_y_eq):
    if datos_y_eq[i] >= y_entra:
        n_i = i
        #i = len(datos_y_eq)
    i += 1

Datos_eq = zip([datos_X_eq[i] for i in range(n_i+1)],[datos_Y_eq[i] \
   for i in range(n_i+1)])
datos_eq = zip([datos_x_eq[i] for i in range(n_i+1)],[datos_y_eq[i] \
   for i in range(n_i+1)])
```

```
# Ajuste de datos de equilibrio a polinomio de 3er grado
%var x, X, xI, yI, a0, a1, a2, a3
modelo(x) = a1*x + a2*x^2 + a3*x^3

ajuste    = find_fit(datos_eq, modelo, solution_dict=True)       # \
   En fracciones molares
y_eq(x)   = modelo(a1=ajuste[a1], a2=ajuste[a2], a3=ajuste[a3])

ajuste    = find_fit(Datos_eq, modelo, solution_dict=True)       # \
   En relaciones molares
Y_eq(X)   = modelo(a1=ajuste[a1], a2=ajuste[a2], a3=ajuste[a3])
```

```
# Área de la columna
A_c       = pi/4 * D_c^2      # m²
show (r'$A_c = \frac{\pi}{4} D_c^2 = %s \text{ m}^2$' %(n(A_c, \
   digits=4)))

# Balance de masa
G_s       = G_entra*(1-y_entra)
G_sale    = G_s*(1+Y_sale)
Y_op(X)   = L_s/G_s * X -L_s/G_s * X_entra + Y_sale
y_op(x)   = Y_op(x/(1-x))/(1+Y_op(x/(1-x)))

X_sale    = numerical_approx(solve(Y_op(X)==Y_entra, X)[0].rhs())
x_sale    = X_sale/(1+X_sale)

# ***** Gráfica en relaciones molares *****
plot(Y_op(X), xmin=X_entra, ymin=Y_sale, xmax=X_sale, ymax=Y_entra, \
   legend_label='Curva de operac.', color = 'red') \
    + plot(Y_eq(X), xmin=0, ymin=0, xmax=datos_X_eq[n_i], ymax=\
   datos_Y_eq[n_i], title = 'Relaciones mol', axes_labels = ['$X_{\
   NH_3}$', '$Y_{NH_3}$'], legend_label='Curva de equilibrio') \
    + scatter_plot(Datos_eq, ymin=0)
```

```
# Cálculo de las composiciones en la interfase
x_BM(xI,xL) = ((1-xL)-(1-xI))/ln((1-xL)/(1-xI))
y_BM(yI,yG) = ((1-yG)-(1-yI))/ln((1-yG)/(1-yI))

kpxa(xI,xL) = FLa/x_BM(xI,xL)
kpya(yI,yG) = FGa/y_BM(yI,yG)

n_seg = 4          # Cantidad de segmentos para calcular Delta_y
#@interact
#def interactive_function(n_seg = slider(start = 3, stop = 20, step \
   = 1, default=10, label = "Cantidad de segmentos")):
```

```
Delta_y   =  (y_entra-y_sale)/n_seg
lista_y   =  [y_sale+Delta_y*i for i in range(n_seg+1)]
lista_x   =  [find_root(y_op == yop, x_entra, x_sale) for yop in \
   lista_y]

lista_xI  =  []
lista_yI  =  []

# Para cada par (x,y) calcula (xI,yI)
for i in range(n_seg+1):
    xop = lista_x[i]
    yop = lista_y[i]

    # Valor preliminar de xI, yI
    sol_I =  solve([yI == -FLa/FGa * xI + FLa/FGa * xop + yop, yI ==\
    y_eq(xI)], xI,yI, solution_dict = True)
    xI0   =  sol_I[0][xI]
    yI0   =  sol_I[0][yI]

    # Itera para encontrar un mejor estimado de xI, yI
    err_x =  1       # Error para x (primer valor es arbitrario)
    err_y =  1       # Error para y
    tol   =  1e-16   # Tolerancia deseada
    it    =  0       # Número de iteraciones

    while it < 10 and (err_x > tol or err_y > tol):
        it += 1
        sol_I = solve([yI == -kpxa(xI0,xop)/kpya(yI0,yop) * xI + \
   kpxa(xI0,xop)/kpya(yI0,yop) * xop + yop, yI == y_eq(xI)], xI,yI, \
   solution_dict = True)
        err_x = abs(xI0-sol_I[0][xI])
        err_y = abs(yI0-sol_I[0][yI])
        xI0   = sol_I[0][xI]
        yI0   = sol_I[0][yI]

    lista_xI.append(xI0)
    lista_yI.append(yI0)
    if(it==10): print "Excesivas iteraciones"


# Composiciones en los extremos
x_tope   =  x_entra
x_fondo  =  x_sale
xI_tope  =  lista_xI[0]
xI_fondo =  lista_xI[n_seg]
y_tope   =  y_sale
y_fondo  =  y_entra
```

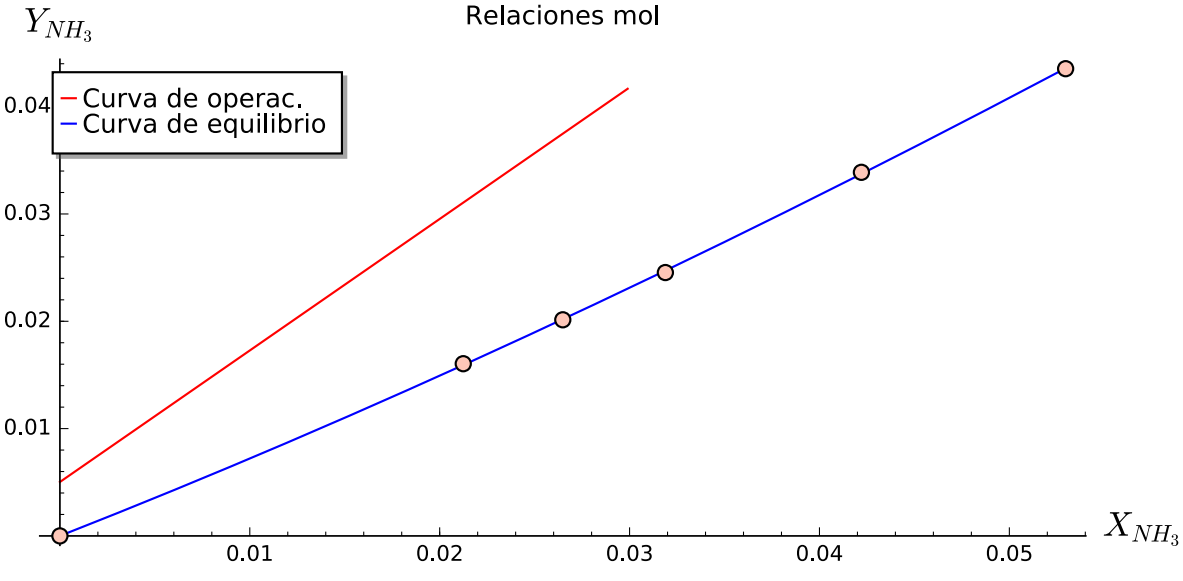
```
yI_tope  =  lista_yI[0]
yI_fondo =  lista_yI[n_seg]
yeq_tope =  y_eq(x_tope)
yeq_fondo =  y_eq(x_fondo)
xeq_tope  =  find_root(y_eq == y_tope, 0, 1)
xeq_fondo =  find_root(y_eq == y_fondo, 0, 1)


print "***** Parte (a), usando coeficientes individuales *****"
# ***** Gráfica en fracciones molares *****
# Líneas que muestran pendiente -k'x/k'y
lxyI  =  line([(lista_x[0], lista_y[0]), (lista_xI[0], lista_yI[0])\
   ], color = 'gray')
for i in range(n_seg):
    lxyI = lxyI + line([(lista_x[i+1], lista_y[i+1]), (lista_xI[i\
   +1], lista_yI[i+1])], color = 'gray')

show(plot(y_op(x), xmin=x_entra, ymin=y_sale, xmax=x_sale, ymax=\
   y_entra, legend_label='Curva de operac.', color = 'red') \
    + plot(y_eq(x), xmin=0, ymin=0, xmax=datos_x_eq[n_i], ymax=\
   datos_y_eq[n_i], title = 'Fracciones mol', axes_labels = ['$x_{\
   NH_3}$', '$y_{NH_3}$'], legend_label='Curva de equilibrio') \
    + scatter_plot(datos_eq, ymin=0) \
    + lxyI )

f = [1/(lista_y[i]-lista_yI[i]) for i in range(n_seg+1)]
datos_f    =  zip(lista_y, f)

f_int      =  spline(datos_f)
integral_f =  numerical_integral(f_int, y_sale, y_entra)
corr       =  1/2*ln((1-y_sale)/(1-y_entra))
N_tG       =  integral_f[0]+corr

show(plot(f_int, xmin=y_sale, xmax=y_entra, axes_labels = ['$y_{NH_3\
   }$', '$\\frac{1}{y_{NH_3}-y_{NH_3, I}}$'], fill = 'axis') \
    + scatter_plot(datos_f) )

show (r'$N_{tG} = \int_{y_{sale}}^{y_{entra}}{\frac{1}{y-y_I}} + \\
   frac{1}{2} \ln{\frac{1-y_{entra}}{1-y_{sale}}} = %s + %s = %s$' \
   %(n(integral_f[0], digits=4),n(corr, digits=2),n(N_tG, digits=4))\
   )

H_tG  =  (G_entra/(3600*kpya(x_fondo,xI_fondo)*A_c) + G_sale/(3600*\
   kpya(x_tope,xI_tope)*A_c))/2    # m
h_c   =  H_tG * N_tG    # m

show (r'$H_{tG,prom} = %s \text{ m}$' %(n(H_tG, digits=4)))
```

```
show (r'$h_{c} = H_{tG} N_{tG} = %s \text{ m}$' %(n(h_c, digits=3)))


print "***** Parte (b), usando coeficientes globales *****"
# ***** Gráfica en fracciones molares *****
# Líneas verticales
lxyI = line([(lista_x[0], lista_y[0]), (lista_x[0], y_eq(lista_x\
    [0]))], color = 'gray')
for i in range(n_seg):
    lxyI = lxyI + line([(lista_x[i+1], lista_y[i+1]), (lista_x[i+1],\
    y_eq(lista_x[i+1]))], color = 'gray')

show(plot(y_op, xmin=x_entra, ymin=y_sale, xmax=x_sale, ymax=y_entra\
    , legend_label='Curva de operac.', color = 'red') \
    + plot(y_eq(x), xmin=0, ymin=0, xmax=datos_x_eq[n_i], ymax=\
    datos_y_eq[n_i], title = 'Fracciones mol', axes_labels = ['$x_{\
    NH_3}$', '$y_{NH_3}$'], legend_label='Curva de equilibrio') \
    + scatter_plot(datos_eq, ymin=0) \
    + lxyI )

f = [1/(lista_y[i]-y_eq(lista_x[i])) for i in range(n_seg+1)]
datos_f = zip(lista_y, f)

f_int      = spline(datos_f)

integral_f = numerical_integral(f_int, y_sale, y_entra)
corr       = 1/2*ln((1-y_sale)/(1-y_entra))
N_tOG      = integral_f[0]+corr

show( plot(f_int, xmin=y_sale, xmax=y_entra, axes_labels = ['$y_{\
    NH_3}$', '$\\frac{1}{y_{NH_3}-y_{NH_3}^*}$'], fill = 'axis') \
    + scatter_plot(datos_f))

show (r'$N_{tOG} = \int_{y_{sale}}^{y_{entra}}{\frac{1}{y-y^*}} + \\
    frac{1}{2} \ln{\frac{1-y_{entra}}{1-y_{sale}}} = %s + %s = %s$' \
    %(n(integral_f[0], digits=4),n(corr, digits=2),n(N_tOG, digits=4)\
    ))

# Cálculo del coeficiente global
show(r'$\frac{1}{F_{OG}} = \frac{1}{F_G} \frac{(1-y_A)_{iM}}{(1-y_A)\
    _{*M}} + \frac{m\prime(1-x_A)_{iM}}{F_L (1-y_A)_{*M}}$')



m_tope   = (yI_tope  - yeq_tope) /(xI_tope  - x_tope )
m_fondo  = (yI_fondo - yeq_fondo)/(xI_fondo - x_fondo)
```

```
FOGa_tope  = 1/(1/FGa * y_BM(yI_tope, y_tope)/ y_BM(yeq_tope ,y_tope\
    ) + m_tope /FLa *x_BM(xI_tope, x_tope) /y_BM(yeq_tope, y_tope) )
FOGa_fondo = 1/(1/FGa * y_BM(yI_fondo,y_fondo)/y_BM(yeq_fondo,\
    y_fondo)+ m_fondo/FLa *x_BM(xI_fondo,x_fondo)/y_BM(yeq_fondo,\
    y_fondo))

show (r'$m\prime_{tope} = %s$' %(n(m_tope, digits=4)))
show (r'$(F_{OG}a)_{tope} = %s$ kmol/(s m³)' %(n(FOGa_tope, digits\
    =4)))
show (r'$m\prime_{fondo} = %s$' %n(m_fondo, digits=4))
show (r'$(F_{OG}a)_{fondo} = %s$ kmol/(s m³)' %n(FOGa_fondo, digits\
    =4))

H_tOG  =  (G_entra/(3600*FOGa_fondo*A_c) + G_sale/(3600*FOGa_tope*\
    A_c))/2  # m, promediando en los extremos
h_c    =  H_tOG * N_tOG # m

show (r'$H_{tOG,prom} = %s \text{ m}$' %(n(H_tOG, digits=4)))
show (r'$h_{c} = H_{tOG} N_{tOG} = %s \text{ m}$' %(n(h_c, digits=3)\
    ))

# ****** Final del código ******
```

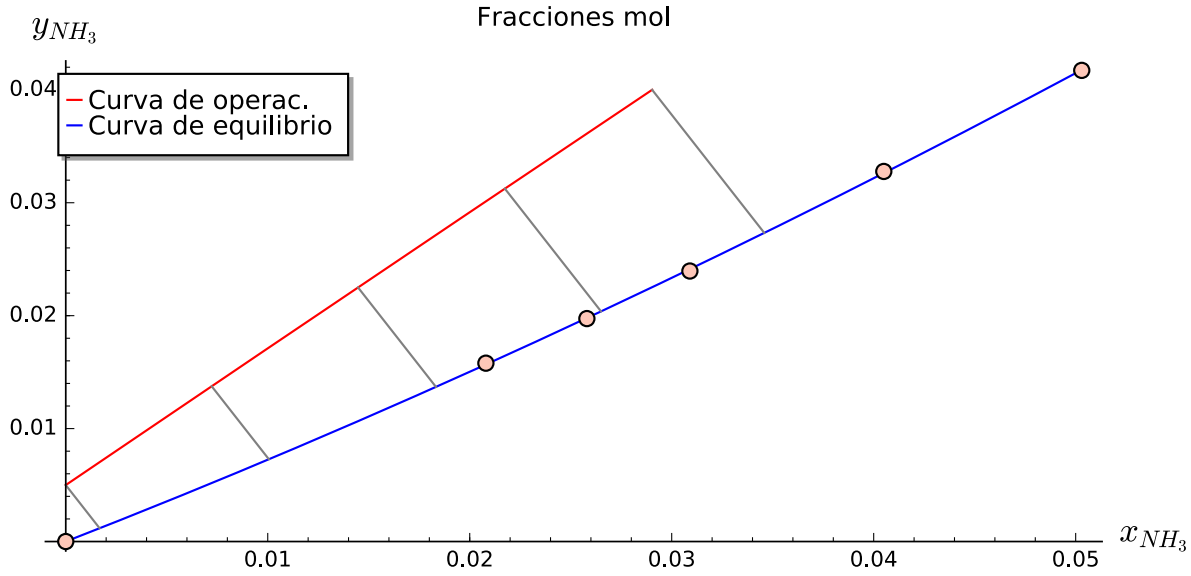
2.1 Solución

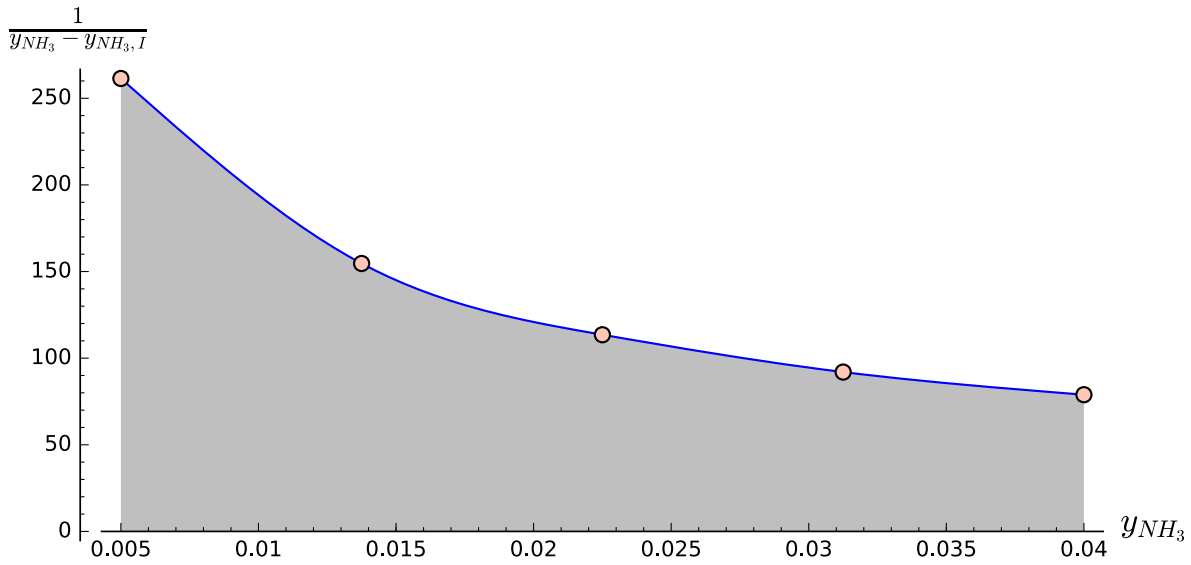
$A_c = \frac{\pi}{4} D_c^2 =$



0.4383 m^2

***** Parte (a), usando coeficientes individuales *****



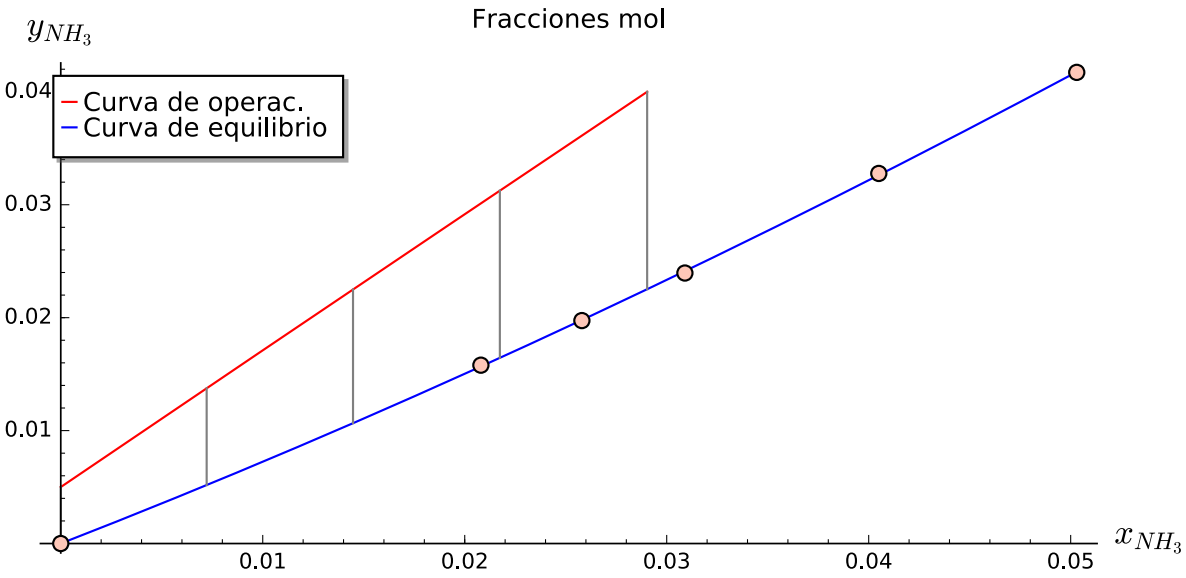


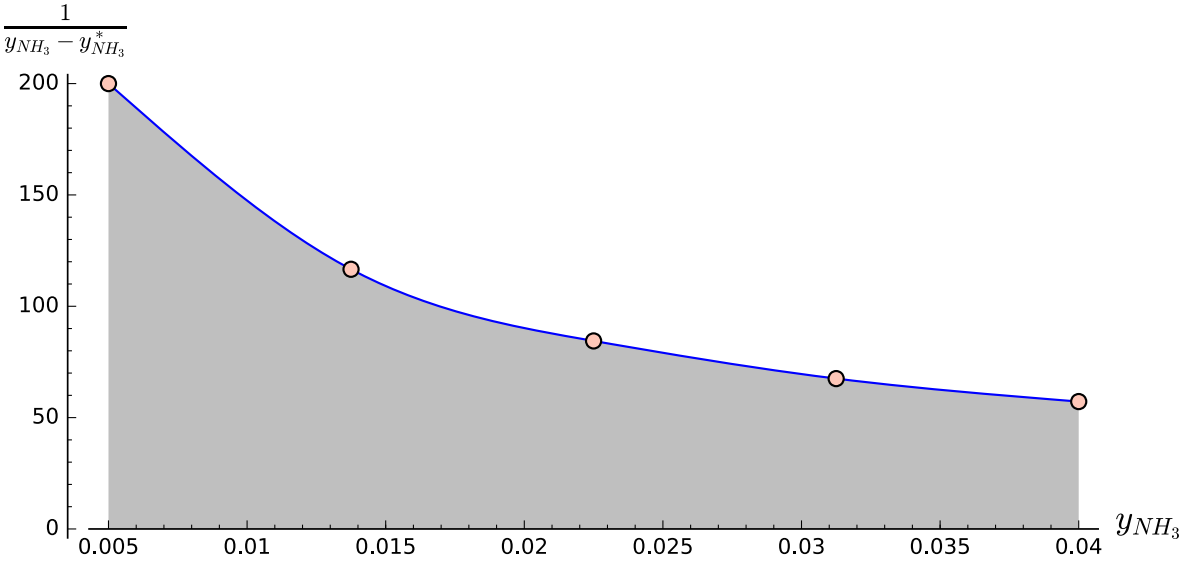
$N_{tG} = \int_{y_{sale}}^{y_{entra}} \frac{1}{y - y_I} + \frac{1}{2} \ln \frac{1 - y_{entra}}{1 - y_{sale}} = 4.558 + 0.018 = 4.576$

$H_{tG,prom} = 0.4789$ m

$h_c = H_{tG} N_{tG} = 2.19$ m

***** Parte (b), usando coeficientes globales *****





$N_{tOG} = \int_{y_{sale}}^{y_{entra}} \frac{1}{y-y^*} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-y_{entra}}{1-y_{sale}} = 3.411 + 0.018 = 3.429$

$\frac{1}{F_{OG}} = \frac{1}{F_G} \frac{(1-y_A)_{iM}}{(1-y_A)_{*M}} + \frac{m\prime(1-x_A)_{iM}}{F_L(1-y_A)_{*M}}$

$m\prime_{tope} = 0.7007$

$(F_{OG}a)_{tope} = 0.05657$ kmol/(s m^3)

$m\prime_{fondo} = 0.8663$

$(F_{OG}a)_{fondo} = 0.05370$ kmol/(s m^3)

$H_{tOG,prom} = 0.6535$ m

$h_c = H_{tOG} N_{tOG} = 2.24$ m