



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE CIENCIA NATURALES Y MATEMÁTICAS

EXAMEN DE MEJORAMIENTO DE TERMODINÁMICA QUÍMICA II

RÚBRICA

Resolver detalladamente cada uno de los siguientes problemas. Cada respuesta debe ser enmarcada con un cuadro e indicar a que literal corresponde.

Tema 1

100 kmol/hr de etileno se comprimen desde 1.2 bar y 300 K hasta 6 bar mediante un compresor impulsado por un motor eléctrico.

a) Determine el costo capital C de la unidad. Considere al etileno como un gas ideal con  $C_p=50.6 \text{ J/mol.K}$  constante. La eficiencia del compresor es del 70%. (20 puntos)

$$C(\text{compresor})/\$ = 3.040(\dot{W}_s/\text{kW})^{0.952}$$

donde  $\dot{W}_s \equiv$  potencia isentrópica que se requiere para el compresor.

$$C(\text{motor})/\$ = 380(|\dot{W}_e|/\text{kW})^{0.855}$$

donde  $\dot{W}_e \equiv$  potencia de eje *trasmitida* por el motor.

Rúbrica Tema : Balance de Energía Sistema Abierto				
Conductas y niveles de desempeño (Inicial/En desarrollo/Desarrollado/Excelente)				
Sobre 20 puntos				
NIVELES DE EJECUCIÓN	INICIAL	EN DESARROLLO	DESARROLLADO	ALTO DESARROLLO
El estudiante es capaz de relacionar el tipo de sistema con las ecuaciones correctas para la determinación del costo capital.	El estudiante plantea las ecuaciones a utilizar correspondientes al tipo de sistema a evaluar.	El estudiante determina la temperatura de salida.	El estudiante calcula el trabajo requerido por ambos equipos.	El estudiante determina correctamente el costo capital.
Puntaje	0 – 5.0 puntos	5.0- 10.0 puntos	10.0 – 15.0 puntos	15.0 – 20.0 puntos

7.57  $\dot{n} := 100 \frac{\text{kmol}}{\text{hr}}$      $P_1 := 1.2 \text{ bar}$      $T_1 := 300 \text{ K}$      $P_2 := 6 \text{ bar}$

$C_p := 50.6 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$      $\eta := 0.70$

Assume the compressor is adiabatic.

$$T_2 := \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{R}{C_p}} \cdot T_1 \quad (\text{Pg. 77}) \quad T_2 = 390.812 \text{ K}$$

$$\dot{W}_{dot_s} := \dot{n} \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad \dot{W}_{dot_s} = 127.641 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{dot_e} := \frac{\dot{W}_{dot_s}}{\eta} \quad \dot{W}_{dot_e} = 182.345 \text{ kW}$$

$$C_{\text{compresor}} := 3040 \text{ dollars} \cdot \left(\frac{\dot{W}_{dot_s}}{\text{kW}}\right)^{0.952} \quad C_{\text{compresor}} = 307452 \text{ dollars} \quad \text{Ans.}$$

$$C_{\text{motor}} := 380 \text{ dollars} \cdot \left(\frac{\dot{W}_{dot_e}}{\text{kW}}\right)^{0.855} \quad C_{\text{motor}} = 32572 \text{ dollars} \quad \text{Ans.}$$



## **Tema 2**

Una planta de Energía, que funciona con calor recuperado de los gases que se descargan de los motores de combustión interna, utiliza iso butano como el medio de trabajo en un ciclo Rankine modificado, en el que el nivel superior de la presión es mayor a la presión crítica del iso butano. De esta manera, el iso butano no experimenta un cambio de fase mientras absorbe calor antes de entrar en la turbina. EL vapor del iso butano se calienta en 14800 kPa a 260 °C y entra en la turbina como un fluido supercrítico en estas condiciones. La expansión iso entrópica en la turbina produce un vapor sobre calentado a 450kPa, que se enfría y condensa a presión constante. El líquido saturado resultante entra a la bomba para regresar al calentador. Si la potencia de salida del ciclo Rankine modificado es de 1000 kW. La presión del iso butano se da en la tabla B.2 del apéndice B.

- a) ¿cuál es la relación de flujo del iso butano? (5 puntos)
- b) ¿Cuál es la rapidez de transferencia de calor en el calentador y condensador? (10 puntos)
- c) ¿Cuál es la eficiencia térmica del ciclo? (10 puntos)

<b>Rúbrica Tema : Ciclo de Potencia</b>				
Conductas y niveles de desempeño (Inicial/En desarrollo/Desarrollado/Excelente)				
Sobre 25 puntos				
<b>NIVELES DE EJECUCIÓN</b>	<b>INICIAL</b>	<b>EN DESARROLLO</b>	<b>DESARROLLADO</b>	<b>ALTO DESARROLLO</b>
El estudiante es capaz de plantear un Balance de energía considerando todos los componentes.	El estudiante plantea los diagramas del proceso correctamente.	El estudiante es capaz de determinar el flujo másico del isobutano.	El estudiante es capaz de determinar la rapidez de transferencia de calor.	El estudiante determina correctamente la eficiencia del ciclo.
Puntaje	0– 5.0 puntos	5.0- 12.0 puntos	12.0– 20.0 puntos	20– 30.0 puntos



8.10 Isobutane:  $T_c := 408.1 \text{ K}$   $P_c := 36.48 \text{ bar}$   $\omega := 0.181$

For isentropic expansion in the turbine, let the initial state be represented by symbols with subscript zero and the final state by symbols with no subscript. Then

$$T_0 := 533.15 \text{ K} \quad P_0 := 4800 \text{ kPa} \quad P := 450 \text{ kPa}$$

$$\Delta S := 0 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

For the heat capacity of isobutane:

$$A := 1.677 \quad B := \frac{37.853 \cdot 10^{-3}}{\text{K}} \quad C := \frac{-11.945 \cdot 10^{-6}}{\text{K}^2}$$

$$T_{r0} := \frac{T_0}{T_c} \quad T_{r0} = 1.3064 \quad P_{r0} := \frac{P_0}{P_c} \quad P_{r0} = 1.3158$$

$$P_r := \frac{P}{P_c} \quad P_r = 0.123$$

Use generalized second-virial correlation:

The entropy change is given by Eq. (6.92) combined with Eq. (5.15) with  $D = 0$ :

$$\tau := 0.8 \quad (\text{guess})$$

Given

$$\Delta S = R \left[ A \cdot \ln(\tau) + \left[ B \cdot T_0 + C \cdot T_0^2 \cdot \left( \frac{\tau + 1}{2} \right) \right] \cdot (\tau - 1) - \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \dots \right]$$

$$+ \text{SRB}\left(\frac{\tau \cdot T_0}{T_c}, \mathfrak{B}_r\right) - \text{SRB}(T_{r0}, \mathfrak{B}_{r0})$$

$$\tau := \text{Find}(\tau) \quad \tau = 0.852 \quad T := \tau \cdot T_0 \quad T = 454.49 \text{ K}$$

$$T_r := \frac{T}{T_c} \quad T_r = 1.114$$

The enthalpy change for this final temperature is given by Eq. (6.91), with HRB at the above T:

$$\Delta H_{ig} := R \cdot \text{ICPH}(T_0, T, 1.677, 37.853 \cdot 10^{-3}, -11.945 \cdot 10^{-6}, 0.0)$$

$$\Delta H_{ig} = -1.141 \times 10^4 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$\Delta H_{\text{turbine}} := \Delta H_{ig} + R \cdot T_c \cdot (\text{HRB}(T_r, \mathfrak{B}_r) - \text{HRB}(T_{r0}, \mathfrak{B}_{r0}))$$

$$\Delta H_{\text{turbine}} = -8850.6 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad W_{\text{turbine}} := \Delta H_{\text{turbine}}$$

The work of the pump is given by Eq. (7.24), and for this we need an estimate of the molar volume of isobutane as a saturated liquid at 450 kPa. This is given by Eq. (3.72). The saturation temperature at 450 kPa is given by the Antoine equation solved for t degC:

$$VP := 450 \text{ kPa}$$

$$A_{vp} := 14.57100 \quad B_{vp} := 2606.775 \quad C_{vp} := 274.068$$

$$t_{\text{sat}} := \frac{B_{vp}}{A_{vp} - \ln\left(\frac{VP}{\text{kPa}}\right)} - C_{vp} \quad t_{\text{sat}} = 34 \quad T_{\text{sat}} := (t_{\text{sat}} + 273.15) \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{sat}} = 307.15 \text{ K}$$

$$V_c := 262.7 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \quad Z_c := 0.282 \quad T_{r\text{sat}} := \frac{T_{\text{sat}}}{T_c} \quad T_{r\text{sat}} = 0.753$$

$$V_{\text{liq}} := V_c Z_c \left[ (T - T_{r\text{sat}})^{\frac{2}{7}} \right]$$

$$V_{\text{liq}} = 112.362 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$



$$W_{\text{pump}} := V_{\text{liq}} \cdot (P_0 - P)$$

$$W_{\text{pump}} = 488.8 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

The flow rate of isobutane can now be found:

$$\dot{m} := \frac{1000 \cdot \text{kW}}{|W_{\text{turbine}} + W_{\text{pump}}|}$$

$$\dot{m} = 119.59 \frac{\text{mol}}{\text{sec}} \quad \text{Ans.}$$

The enthalpy change of the isobutane in the cooler/condenser is calculated in two steps:

- Cooling of the vapor from 454.48 to 307.15 K
- Condensation of the vapor at 307.15 K

Enthalpy change of cooling: HRB at the initial state has already been calculated.  
For saturated vapor at 307.15 K:

$$\Delta H_{\text{ig}} := R \cdot \text{ICPH}(T, T_{\text{sat}}, 1.677, 37.853 \cdot 10^{-3}, -11.945 \cdot 10^{-6}, 0.0)$$

$$\Delta H_{\text{b}} := -\Delta H_{\text{v}} \left( \frac{1 - T_{\text{sat}}}{1 - T_{\text{m}}} \right)^{0.7}$$

$$\Delta H_{\text{b}} = -18378 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

$$Q_{\text{dot}_{\text{out}}} := \dot{m} \cdot (\Delta H_{\text{a}} + \Delta H_{\text{b}})$$

$$Q_{\text{dot}_{\text{in}}} := |W_{\text{turbine}} + W_{\text{pump}}| \cdot \dot{m} + |Q_{\text{dot}_{\text{out}}}| \quad \eta := \frac{1000 \cdot \text{kW}}{Q_{\text{dot}_{\text{in}}}}$$

$$Q_{\text{dot}_{\text{out}}} = -4360 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{dot}_{\text{in}}} = 5360 \text{ kW}$$

$$\eta = 0.187 \quad \text{Ans.}$$



50 kmol/hr de tolueno líquido a 1.2 bar se enfrían de 100 a 20 °C. se utiliza un ciclo de refrigeración por compresión de vapor para ese propósito. EL amoniaco es el fluido de trabajo. La condensación en el ciclo se efectúa mediante un intercambiador e calor, que es enfriado por el alre de un ventilador de aspas para el cual se puede suponer que la temperatura del aire se mantiene esencialmente constate a 20°C. Determine:

a) Los niveles de presión tanto superior como inferior (en bar) en el ciclo de refrigeración. (10 puntos)

b) La rapidez de circulación del amoniaco (mol/s). (10 puntos)

Suponiendo 10 °C de aproximación mínima  $\Delta T_s$  para intercambio de calor. Datos para el amoniaco:

$$\Delta H_n^{lv} = 23.34 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\ln P^{\text{sat}} = 45.327 - \frac{4104.67}{T} - 5.146 \ln T + 615.0 \frac{P^{\text{sat}}}{T^2}$$

Donde  $P^{\text{sat}}$  está dado en bar y T en kelvin.

<b>Rúbrica Tema : Ciclo de Refrigeración</b>				
Conductas y niveles de desempeño (Inicial/En desarrollo/Desarrollado/Excelente)				
Sobre 20 puntos				
<b>NIVELES DE EJECUCIÓN</b>	<b>INICIAL</b>	<b>EN DESARROLLO</b>	<b>DESARROLLADO</b>	<b>ALTO DESARROLLO</b>
El estudiante es capaz de plantear un Balance de energía considerando todos los componentes para un sistema reversible como para uno irreversible.	El estudiante plantea los diagramas del proceso correctamente.	El estudiante determina los niveles de presión en el ciclo de refrigeración.	El estudiante plantea el balance de masa para determinar el flujo de refrigerante.	El estudiante calcula la rapidez de circulación de amoniaco correctamente.
Puntaje	0 – 5.0 puntos	5.0- 10.0 puntos	10.0– 15.0 puntos	15.0– 20.0 puntos



9.23 Follow the notation from Fig. 9.1

With air at 20 C and the specification of a minimum approach  $\Delta T = 10$  C:

$$T_1 := (10 + 273.15)\text{K} \quad T_4 := (30 + 273.15)\text{K} \quad T_2 := T_1$$

Calculate the high and low operating pressures using the given vapor pressure equation

Guess:  $P_L := 1\text{bar}$   $P_H := 2\text{bar}$

$$\text{Given } \ln\left(\frac{P_L}{\text{bar}}\right) = 45.327 - \frac{4104.67}{\frac{T_1}{\text{K}}} - 5.146 \cdot \ln\left(\frac{T_1}{\text{K}}\right) + 615.0 \frac{\frac{P_L}{\text{bar}}}{\left(\frac{T_1}{\text{K}}\right)^2}$$

$$P_L := \text{Find}(P_L) \quad P_L = 6.196 \text{ bar}$$

$$\text{Given } \ln\left(\frac{P_H}{\text{bar}}\right) = 45.327 - \frac{4104.67}{\frac{T_4}{\text{K}}} - 5.146 \cdot \ln\left(\frac{T_4}{\text{K}}\right) + 615.0 \frac{\frac{P_H}{\text{bar}}}{\left(\frac{T_4}{\text{K}}\right)^2}$$

$$P_H := \text{Find}(P_H) \quad P_H = 11.703 \text{ bar}$$

Calculate the heat load

$$\dot{n}_{\text{toluene}} := 50 \frac{\text{kmol}}{\text{hr}} \quad T_1 := (100 + 273.15)\text{K} \quad T_2 := (20 + 273.15)\text{K}$$

Using values from Table C.3

$$Q_{\text{dot}C} := -\dot{n}_{\text{toluene}} \cdot R \cdot \text{ICPH}(T_1, T_2, 15.133, 6.79 \cdot 10^{-3}, 16.35 \cdot 10^{-6}, 0)$$

$$Q_{\text{dot}C} = 177.536 \text{ kW}$$

Since the throttling process is adiabatic:  $H_4 = H_1$

But:  $H_{\text{liq}4} = H_{\text{liq}1} + x_1 \cdot \Delta H_{\text{lv}1}$  so:  $H_{\text{liq}4} - H_{\text{liq}1} = x_1 \cdot \Delta H_{\text{lv}}$

and:  $H_{\text{liq}4} - H_{\text{liq}1} = V_{\text{liq}}(P_4 - P_1) + \int_{T_1}^{T_4} C_{\text{p,liq}}(T) dT$

Estimate  $V_{\text{liq}}$  using the Rackett Eqn.

$$\omega := 0.253 \quad T_c := 405.7\text{K} \quad P_c := 112.80\text{bar}$$

$$Z_c := 0.242 \quad V_c := 72.5 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \quad T_n := 239.7\text{K} \quad \Delta H_{\text{lvn}} := 23.34 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$T_r := \frac{(20 + 273.15)\text{K}}{T_c} \quad T_r = 0.723$$

$$V_{\text{liq}} := V_c Z_c \left(1 - T_r\right)^{\frac{2}{7}} \quad V_{\text{liq}} = 27.112 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$$

Estimate  $\Delta H_{\text{lv}}$  at 10C using Watson correlation

$$T_{rn} := \frac{T_n}{T_c} \quad T_{rn} = 0.591 \quad T_{r1} := \frac{T_1}{T_c} \quad T_{r1} = 0.698$$

$$\Delta H_{\text{lv}} := \Delta H_{\text{lvn}} \left(\frac{1 - T_{r1}}{1 - T_{rn}}\right)^{0.38} \quad \Delta H_{\text{lv}} = 20.798 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\dot{m}_{\text{q}41} := V_{\text{liq}}(P_H - P_L) + R \cdot \text{ICPH}(T_1, T_4, 22.626, -100.75 \cdot 10^{-3}, 192.71 \cdot 10^{-6}, 0)$$

$$\Delta H_{\text{liq}41} = 1.621 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \quad x_1 := \frac{\Delta H_{\text{liq}41}}{\Delta H_{\text{lv}}} \quad x_1 = 0.078$$

For the evaporator

$$\Delta H_{12} = H_2 - H_1 = H_{\text{vap}} - (H_{\text{liq}} + x_1 \cdot \Delta H_{\text{lv}}) = (1 - x_1) \cdot \Delta H_{\text{lv}}$$

$$\Delta H_{12} := (1 - x_1) \cdot \Delta H_{\text{lv}} \quad \Delta H_{12} = 19.177 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\dot{n}_{\text{dot}} := \frac{Q_{\text{dot}C}}{\Delta H_{12}} \quad \dot{n}_{\text{dot}} = 9.258 \frac{\text{mol}}{\text{sec}} \quad \text{Ans.}$$



Suponiendo que la ley de Raoult se aplica al sistema n-pentano(1)/n-heptano(2),

- ¿Cuáles son los valores de  $x_1$  y  $y_1$  a  $t=55\text{ °C}$  y  $P=0.5*(P_{1sat}+P_{2sat})$ ? (10 puntos)
- Para dichas condiciones grafique la fracción del sistema que es vapor  $V$  e función de la composición global  $z_1$ . (10 puntos)

Rúbrica Tema : Ciclo de potencia considerando Irreversibilidades				
Conductas y niveles de desempeño (Inicial/En desarrollo/Desarrollado/Excelente)				
Sobre 13 puntos				
NIVELES DE EJECUCIÓN	INICIAL	EN DESARROLLO	DESARROLLADO	ALTO DESARROLLO
El estudiante es capaz de plantear las relaciones correctas del equilibrio líquido vapor para llegar a la relación gráfica y las composiciones de ambas fases.	El estudiante plantea las ecuaciones correspondiente a la ley de Raoult.	El estudiante determina las composiciones molares de ambas fases.	El estudiante determina los puntos de para la gráfica $V$ vs $z_1$ .	El estudiante realiza correctamente la gráfica $V$ vs. $Z_1$ .
Puntaje	0 – 5.0 puntos	5.0- 10.0 puntos	10.0– 15.0 puntos	15.0– 20.0 puntos

### 10.3 Pressures in kPa; temperatures in degC

(a) Antoine coefficients: n-Pentane=1; n-Heptane=2

$$A_1 := 13.7667$$

$$B_1 := 2451.88$$

$$C_1 := 232.014$$

$$A_2 := 13.8622$$

$$B_2 := 2911.26$$

$$C_2 := 216.432$$

$$P_{sat1}(T) := \exp\left(A_1 - \frac{B_1}{T + C_1}\right)$$

$$P_{sat2}(T) := \exp\left(A_2 - \frac{B_2}{T + C_2}\right)$$

$$T := 55$$

$$P := \left(\frac{P_{sat1}(T) + P_{sat2}(T)}{2}\right)$$

$$P = 104.349$$

Since for Raoult's law  $P$  is linear in  $x$ , at the specified  $P$ ,  $x_1$  must be 0.5:

$$x_1 := 0.5$$

$$y_1 := \frac{x_1 \cdot P_{sat1}(T)}{P}$$

$$y_1 = 0.89$$

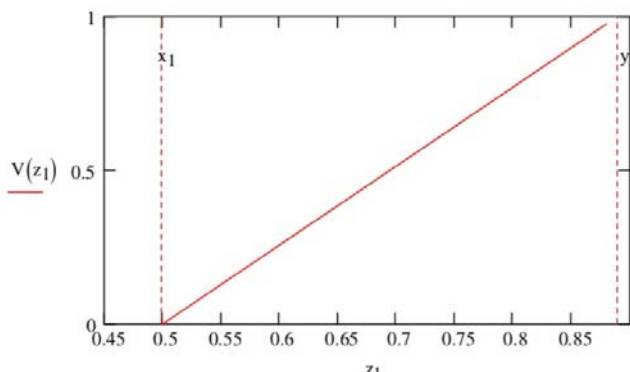
For a given pressure,  $z_1$  ranges from the liquid composition at the bubble point to the vapor composition at the dew point. Material balance:

$$z_1 = x_1 \cdot (1 - V) + y_1 \cdot V$$

$$z_1 := x_1, x_1 + 0.01 \dots y_1$$

$$V(z_1) := \frac{z_1 - x_1}{y_1 - x_1}$$

$V$  is obviously linear in  $z_1$ :





**Tema 5**

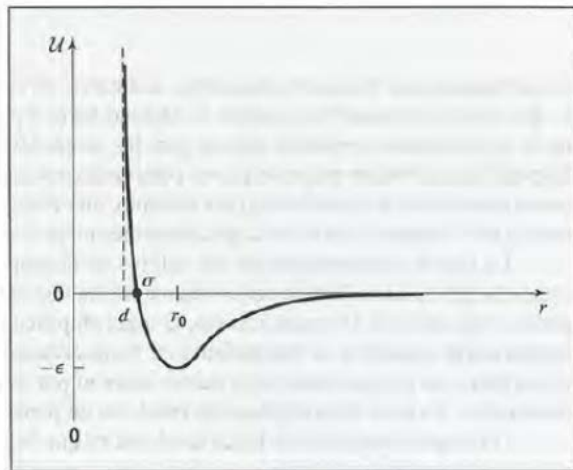
El siguiente gráfico representa la variación de una variable Y vs. X.

a) Indique que representa cada eje y su concepto. (3 puntos)

*U: energía potencial intermolecular*

*R: separación intermolecular (entre los centro de carga de cada molécula)*

b) Ubique las 4 variables claves que se pueden identificar gráficamente. (4 puntos)



c) Explique el significado de cada una de ellas. (8 puntos)

*D: diámetro de esfera dura es la medida de centro a centro donde U tiende al infinito.*

*σ: el diámetro de colisión se entiende el diámetro cuando U es cero.*

*R<sub>0</sub>: separación de equilibrio donde el valor de U es mínimo y la fuerza neta intermolecular es cero.*

*ε: es la profundidad de pozo es el valor absoluto del valor mínimo de U.*

<b>Rúbrica Tema : termodinámica estadística</b>				
Conductas y niveles de desempeño (Inicial/En desarrollo/Desarrollado/Excelente)				
Sobre 15 puntos				
<b>NIVELES DE EJECUCIÓN</b>	<b>INICIAL</b>	<b>EN DESARROLLO</b>	<b>DESARROLLADO</b>	<b>ALTO DESARROLLO</b>
El estudiante es capaz identificar la relación existe entre la energía potencial intermolecular y la distancia intermolecular.	El estudiante comprende la relación gráfica que existe entre U y r.	El estudiante identifica las variables que se puede obtener gráficamente.	El estudiante es capaz de definir parcialmente le concepto de dichas variables.	El estudiante es capaz de definir totalmente las variables que relacionan la energía potencial intermolecular con la distancia intermolecular..
Puntaje	0 – 3.0 puntos	3.0- 7.0 puntos	7.0 – 10.0 puntos	10.0 – 15.0 puntos