

- a. El Volumen que ocupa el vapor en los tubos del condensador es: $V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$ (tomado de la sección B.2.3).
 - b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e2}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}$.
 - c. La densidad del vapor producido ρ_s^{cr} se calcula con la ecuación 2.23 evaluada en $T = T_s^{cr}$ y debido a que el vapor se encuentra saturado, la presión corresponde a la presión de saturación a T_s^{cr} y se calcula con la correlación 2.20.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.85 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
- a. El volumen ocupado por el vapor en en los tubos del condensador es: $V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$ (tomado de la sección B.2.3).
 - b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e2}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}$.
 - c. La densidad del vapor producido ρ_s^{cr} se calcula con la ecuación 2.23 evaluada en $T = T_s^{cr}$ y debido a que el vapor se encuentra saturado, la presión corresponde a la presión de saturación a $T = T_s^{cr}$ y se calcula con la correlación 2.20.
 - d. La entalpía del condensado $h_c^{cr}(T^{cr})$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^{cr} referida al parámetro C_p .
 - e. Q^{cr} se calcula mediante la ecuación 2.86, la cual requiere a su vez del área de transferencia de calor (A^{cr}), de la diferencia de temperatura promedio (ΔT^{cr}) y del coeficiente global de transferencia de calor (U^{cr}).

El área de transferencia de calor, calculada en la sección B.2.4 con la ecuación 2.31 es: $A^{cr} = 0,885422\text{m}^2$.

ΔT^{cr} se calcula con la ecuación 2.29.

U^{cr} se calcula con la ecuación 2.30, la cual requiere de los parámetros s_w , k_w , h_v^{cr} y h_L^{cr} . De la sección B.2: $s_w = 0,0046228\text{m}$ y $k = 26\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$.

Para calcular h_v^{cr} , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere:

- 1) El valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): ($T_K = T_w^{cr}$).
- 2) El valor de la longitud de los tubos es: $H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$ (de la sección B.2).
- 3) Se requiere también el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectiva-

mente, los cuales se evalúan a la temperatura media de la película $T = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$.

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

- 1) La evaluación de los parámetros C_p , η y k para el agua a la temperatura media de entrada y salida de esta: $\frac{T_{\text{Agua}}^e + T_{\text{Agua}}^s}{2}$, aplicando las ecuaciones 2.37, 2.38 y 2.39 para cada parámetro respectivamente.
 - 2) El diámetro equivalente de la coraza, calculado en la sección B.2 con la ecuación 2.139 es: $D_{eq} = 0,022771\text{m}^2$.
 - 3) El área transversal al flujo, calculada en la sección B.2 con la ecuación 2.140 es $a_s = 0,006947\text{m}^2$.
 - 4) El cálculo de Re con la ecuación 2.141.
 - 5) El cálculo de j_H con la ecuación 2.138.
- f. Se asume que que todo el calor perdido por el vapor es recibido por el flujo de agua que circula por la coraza debido a que el vapor fluye por los tubos; esto implica que se asume que la pérdida de calor L_s^{cr} es igual a cero.

Para la coraza del condensador:

- Se aplica la ecuación 2.87, en la cual se asume que no hay acumulación.
- Se aplica la ecuación 2.88, teniendo en cuenta la ecuación 2.87 y el siguiente proceso:
 - a. La entalpía del condensado $h_{\text{Agua}}^e(T^e)$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^e referida al parámetro C_p .
 - b. La entalpía del condensado $h_{\text{Agua}}^s(T^s)$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^s referida al parámetro C_p .
 - c. Para calcular el calor que cede el vapor al agua de enfriamiento (Q^{cr}):
 Q^{cr} se calcula mediante la ecuación 2.86, la cual requiere a su vez del área de transferencia de calor (A^{cr}), de la diferencia de temperatura promedio (ΔT^{cr}) y del coeficiente global de transferencia de calor (U^{cr}).
 El área de transferencia de calor, calculada en la sección B.2.4 con la ecuación 2.31 es:
 $A^{cr} = 0,885422\text{m}^2$.
 ΔT^{cr} se calcula con la ecuación 2.29.
 U^{cr} se calcula con la ecuación 2.30, la cual requiere de los parámetros s_w , k_w , h_v^{cr} y h_L^{cr} .
 De la sección B.2: $s_w = 0,0046228\text{m}$ y $k = 26\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$.
 Para calcular h_v^{cr} , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere:

- 1) El valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado), que es igual a la temperatura de las paredes de los tubos del condensador ($T_K = T_w^{cr}$).
- 2) El valor de la longitud de los tubos es: $H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$ (de la sección B.2).
- 3) Se requiere también el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, los cuales se evalúan a la temperatura media de la película $T = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$.

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

- 1) La evaluación de los parámetros C_p , η y k para el agua a la temperatura media de entrada y salida de esta: $\frac{T_{Agua}^e + T_{Agua}^s}{2}$, aplicando las ecuaciones 2.37, 2.38 y 2.39 para cada parámetro respectivamente.
- 2) El diámetro equivalente de la coraza, calculado en la sección B.2 con la ecuación 2.139 es: $D_{eq} = 0,022771\text{m}$.
- 3) El área transversal al flujo, calculada en la sección B.2 con la ecuación 2.140 es $a_s = 0,006947\text{m}^2$.
- 4) El cálculo de Re con la ecuación 2.141.
- 5) El cálculo de j_H con la ecuación 2.138.

Conjunto de Ecuaciones 2

Evaporación de Agua en 2 Efectos con Alimentación en Paralelo

Para el vapor en la Calandria (1° Efecto):

- Ecuación diferencial 2.62:

$$V_s^1 \frac{d\rho_s(T_S)}{dt} = S - S_c$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) \text{m}^3 = 2,2487E - 2\text{m}^3$$

- b. Para la densidad del vapor ($\rho_s(T_S)$):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln \left(\frac{P_S}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1.5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_s}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 \text{ K}$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L} / \text{gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_s}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1 k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_s = 1/v_S$$

$$P_S = \frac{RT_S(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

P_S es la presión del vapor vivo de caldera en la calandria del primer efecto.

- Ecuación diferencial 2.63:

$$V_s^1 \rho_s(T_S) \frac{dH_s(T_S)}{dt} = S_c(H_s(T_S) - h_c(T_S)) - Q_s^1 - L_s^1$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$$

- b. Las ecuaciones necesarias para calcular la densidad del vapor ($\rho_s(T_S)$) fueron mostradas con la ecuación 2.2.
- c. Para la entalpía del condensado $h_c(T_S)$:

$$h_c(T_S) = \int_{T_0}^{T_S} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

d. Para la entalpía del vapor vivo de caldera $H_s(T_S)$:

$$H_s(T_S) = \int_{T_0}^{T_S} C_p(T) dT + \lambda_v(T_S)$$

La expresión para calcular la capacidad calorífica ($C_p(T)$) es la misma que se utiliza para calcular la entalpía del condensado ($h_c(T_S)$).

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T_S)$

$$\lambda_v(T_S) = (v_S - v_L) T_S \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.62.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_S}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Para hallar la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), se deriva la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) y se evalúa en T_S :

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

e. Para el calor cedido por el vapor vivo de caldera Q_s^1 :

$$Q_s^1 = h_v^1 A_{vc}^1 (T_S - T_w^1)$$

Área de transferencia de calor en la zona del vapor condensante:

$$A_{vc} = 1,2795\text{m}^2.$$

Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^1 :

$$h_v^1 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^1) \cdot \rho_K^2(T_m^1) \cdot k_K^3(T_m^1) \cdot g}{\eta_K(T_m^1) \cdot H \cdot (T_S - T_w^1)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^1 = \frac{T_S + T_w^1}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^1)$:

$$\lambda_v(T_m^1) = (v_S - v_L)T_m^1 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

La ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) tiene dos funciones en este caso:

- El cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), a partir de la correlación 2.20 (correlación tomada de [18]), evaluada en T_m^1 (reemplazar T por T_m^1):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

- El cálculo de la presión de saturación a la temperatura T_m^1 (denotada como P_m^1), para reemplazar posteriormente estas dos variables en la correlación 2.23 (de Wang y Chen [22]).

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_m^1}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1 k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2 \Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1 \Omega_{bc} \Omega_{cc}}{k_2 \Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac} R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc} R T_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc} R T_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P_m^1 = \frac{RT_m^1(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_K(T_m^1)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^1) = v_K$$

Para $k_K(T_m^1)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^1) = A + BT_m^1 + C(T_m^1)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^1)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^1} + CT_m^1 + D(T_m^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

f. Pérdidas de calor:

$$L_s^1 = 0$$

Para las paredes de los tubos de la calandria (1° Efecto):

■ Se aplica la ecuación diferencial 2.65:

$$W_w^1 C_{pw}^1 \frac{dT_w^1}{dt} = Q_s^1 - Q^1 = h_v^1 A_{vc}^1 (T_s - T_w^1) - h_L^1 A_L^1 (T_w^1 - T^1)$$

a. La masa de los tubos calculada en la sección B.1.7:

$$W_w^1 = 3,0022E - 3 \text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2 \text{kg}$$

b. Área de transferencia en el lado de vapor:

$$A_{vc} = 1,2795 \text{m}^2$$

c. Área de transferencia en el lado del líquido:

$$A_L = 1,04057 \text{m}^2.$$

d. Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^1 :

$$h_v^1 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^1) \cdot \rho_K^2(T_m^1) \cdot k_K^3(T_m^1) \cdot g}{\eta_K(T_m^1) \cdot H \cdot (T_s - T_w^1)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350 \text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^1 = \frac{T_s + T_w^1}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^1)$:

$$\lambda_v(T_m^1) = (v_S - v_L)T_m^1 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

La ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) tiene dos funciones en este caso:

- El cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), a partir de la correlación 2.20 (correlación tomada de [18]), evaluada en T_m^1 (reemplazar T por T_m^1):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

- El cálculo de la presión de saturación a la temperatura T_m^1 (denotada como P_m^1), para reemplazar posteriormente estas dos variables en la correlación 2.23 (de Wang y Chen [22]).

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_m^1}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2 \Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1 \Omega_{bc} \Omega_{cc}}{k_2 \Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac} R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc} R T_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc} R T_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P_m^1 = \frac{RT_m^1(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_K(T_m^1)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^1) = v_K$$

Para $k_K(T_m^1)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^1) = A + BT_m^1 + C(T_m^1)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^1)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^1} + CT_m^1 + D(T_m^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K.

$$\begin{aligned} A &= -24,71 \\ B &= 4209 \\ C &= 0,04527 \\ D &= -3,376E - 05 \end{aligned}$$

e. Para calcular h_L^1 :

$$\frac{h_L^1 \cdot \sigma_L(T^1)}{k_L(T^1) \cdot P^1} = c \cdot \frac{(T_w^1 - T^1) \cdot C_{pL}(T^1)}{\lambda_v(T^1)} \left(\frac{\rho_L(T^1)}{10^3 \rho_v(T^1)} \right)^{0,5} \left(\frac{\eta_{H_2O}(T^1)}{\eta_L(T^1)} \right)^{0,25}$$

P^1 es la presión en el primer efecto.

T_{w^1} Temperatura de la pared de los tubos de la calandria del primer efecto.

Para $\sigma_L(T^1)$ (tensión superficial del líquido):

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$\chi = 0,0236$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$Q_p = 0,156 + 0,365\omega_w - 1,754\chi - 13,57\chi^2 - 0,506\omega_w^2 + 1,287\omega_w\chi$$

$$m = 1,21 + 0,5385\omega_w - 14,61\chi - 32,07\chi^2 - 1,656\omega_w^2 + 22,03\omega_w\chi$$

Ecuación de Van der Waals transformada por Hakim et al.:

$$\sigma_L = P_c^{2/3} T_c^{1/3} \left(\frac{1 - T_R}{0,4} \right)^m \frac{Q_p}{1000}$$

P_c en bar y σ en N/m.

Para $k_L(T^1)$ (conductividad térmica del líquido):

$$k_L(T^1) = A + BT^1 + C(T^1)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_L en $W/(m \cdot K)$ y T en K.

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

Para $\lambda_v(T^1)$ (Calor latente de vaporización):

$$\lambda_v(T^1) = (v_S - v_L)T^1 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3K$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$T^r = 373,15K$$

$$v^r = 0,0010437m^3/kg$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Con la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) se lleva a cabo el cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T) evaluada en T^1 (reemplazar T por T^1):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 \text{ K}$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c}\right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right)^2 + 5,2614\sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3\Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c}F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P^1 = \frac{RT^1(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_L(T^1)$ (densidad del líquido):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_L(T^1) = v_K$$

Para el factor c:

$$V_L^1 = \frac{W^1}{\rho_L(T^1)}$$

Para $0,217\text{m} \leq y^1 \leq 0,567\text{m}$:

$$y_p^1 = \frac{y^1 - 0,217}{0,567 - 0,217} \cdot 100 \%$$

Para $0\text{m} \leq y^1 \leq 0,217\text{m}$:

$$y_p^1 = 0 \%$$

Para $0,567\text{m} \leq y^1 \leq 1,502\text{m}$:

$$y_p^1 = 100 \%$$

$$c = 0,24 + \frac{0,37 - 0,24}{40 - 75}(y_p^1 - 75)$$

Sección	Rango de Nivel (m) y^1	Correlación de cálculo del volumen (m ³)
7	0-0.126	$V_L^1 = \pi(0,00006241y^1 + \frac{1}{2}0,01782(y^1)^2 + \frac{1}{3}1,2724(y^1)^3)$
6	0.126-0.217	$V_L^1 = 0,003135 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^1 - 0,126)$
5	0.217-0.567	$V_L^1 = 0,009565$ $+ \frac{\pi}{4} [(3,068 \cdot 0,0254)^2 + 60(0,493 \cdot 0,0254)^2] (y^1 - 0,217)$
4	0.567-0.616	$V_L^1 = 0,013815 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^1 - 0,567)$
3	0.616-0.716	$V_L^1 = 0,017275$ $+ \pi[0,0225(y^1 - 0,616)$ $+ \frac{1}{2}0,15(y^1 - 0,616)^2 + \frac{1}{3}0,25(y^1 - 0,616)^3]$
2	0.716-1.366	$V_L^1 = 0,026975 + \frac{\pi}{4}(0,4)^2(y^1 - 0,716)$
1	1.366-1.502	$V_L^1 = 0,10866$ $- 4 \cdot 0,07353\pi (\frac{1}{2}(y^1 - 1,366)^2 - 0,136(y^1 - 1,366))$

Para $\rho_v(T^1)$ (densidad del vapor en equilibrio con el líquido):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln \left(\frac{P^1}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1 k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2 \Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1 \Omega_{bc} \Omega_{cc}}{k_2 \Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac} R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc} R T_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc} R T_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_v^1 = 1/v_v^1$$

$$P^1 = \frac{RT^1(1 + k_1 b/v_v^1)}{v_v^1 - k_2 b} - \frac{a}{v_v^1(v_v^1 + c)}$$

Para $\eta_L(T^1)$ (viscosidad dinámica del líquido):

$$\ln \eta_L = A + \frac{B}{T^1} + CT^1 + D(T^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para $\eta_{H_2O}(T^1)$ (viscosidad dinámica del agua):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T^1} + CT^1 + D(T^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para la capacidad calorífica ($C_{pL}(T^1)$):

$$C_{pL}(T^1) = A + BT^1 + C(T^1)^2 + D(T^1)^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

Para la Columna de Líquido (1° Efecto):

■ Ecuación diferencial 2.66:

$$\frac{dW^1}{dt} = F^1 - B^1 - S^1$$

■ Ecuación diferencial 2.68:

$$W^1 \frac{dh^1(T^1)}{dt} = F^1 (h_F^1(T_F^1) - h^1(T^1)) + S^1 (h^1(T^1) - H^1(T^1)) + Q^1 + \phi^1 - L^1$$

a. Para la entalpía de la columna de líquido ($h^1(T^1)$):

$$h^1(T^1) = \int_{T_0}^{T^1} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

b. Para la entalpía de la alimentación ($h_F^1(T_F^1)$)

$$h_F^1(T_F^1) = \int_{T_0}^{T_F^1} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

c. Para la entalpía del vapor producido ($H^1(T^1)$):

$$H^1(T^1) = \int_{T_0}^{T^1} C_p(T) dT + \lambda_v(T^2)$$

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T_S)$

$$\lambda_v(T_S) = (v_S - v_L) T_S \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_S}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Para hallar la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), se deriva la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) y se evalúa en T_S :

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

- d. El cálculo de Q^1 se presentó en el conjunto de ecuaciones de *las Paredes de los Tubos de la Calandria (1° Efecto)*
- e. $\phi^1 = 0$
- f. $L^1 = 0$

Para el vapor en la Calandria (2° Efecto):

- Ecuación diferencial 2.72:

$$(V_s^{ep} + V_s^2) \frac{d\rho_s^{ca2}(T^{ca2})}{dt} = S^{ca2} - S_c^{ca2}$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$$

- b. Para la densidad del vapor ($\rho_s^{ca2}(T^{ca2})$):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P^{ca2}}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T^{ca2}}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^{ca2}}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c}\right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right)^2 + 5,2614\sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3\Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_s^{ca2} = 1/v_s^{ca2}$$

$$P^{ca2} = \frac{RT^{ca2}(1 + k_1b/v_s^{ca2})}{v_s^{ca2} - k_2b} - \frac{a}{v_s^{ca2}(v_s^{ca2} + c)}$$

P^{ca2} es la presión del vapor vivo de caldera en la calandria del segundo efecto.

- Ecuación diferencial 2.73:

$$(V_s^{ep} + V_s^2)\rho_s^{ca2}(T^{ca2})\frac{dH^{ca2}(T^{ca2})}{dt} = S_c^{ca2}(H^{ca2}(T^{ca2}) - h_c^{ca2}(T^{ca2})) - Q_s^2 - L_s^{ca2}$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_s^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$$

- b. Las ecuaciones necesarias para calcular la densidad del vapor ($\rho_s^{ca2}(T^{ca2})$) fueron mostradas con la ecuación 2.72.
- c. Para la entalpía del condensado $h_c^{ca2}(T^{ca2})$:

$$h_c^{ca2}(T^{ca2}) = \int_{T_0}^{T^{ca2}} C_p(T)dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

d. Para la entalpía del vapor vivo de caldera $H^{ca2}(T^{ca2})$:

$$H^{ca2}(T^{ca2}) = \int_{T_0}^{T^{ca2}} C_p(T) dT + \lambda_v(T^{ca2})$$

La expresión para calcular la capacidad calorífica ($C_p(T)$) es la misma que se utiliza para calcular la entalpía del condensado ($h_c(T^{ca2})$).

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T^{ca2})$

$$\lambda_v(T^{ca2}) = (v_S - v_L) T^{CA2} \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^{CA2}}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Para hallar la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), se deriva la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) y se evalúa en T^{CA2} :

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

e. Para el calor cedido por el vapor vivo de caldera Q_s^2 :

$$Q_s^2 = h_v^2 A_{vc}^2 (T^{ca2} - T_w^2)$$

Área de transferencia de calor en la zona del vapor condensante:

$$A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2.$$

Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^2 :

$$h_v^2 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^2) \cdot \rho_K^2(T_m^2) \cdot k_K^3(T_m^2) \cdot g}{\eta_K(T_m^2) \cdot H \cdot (T_S - T_w^2)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^2 = \frac{T_c^2 + T_w^2}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^2)$:

$$\lambda_v(T_m^2) = (v_S - v_L) T_m^2 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

La ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) tiene dos funciones en este caso:

- El cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), a partir de la correlación 2.20 (correlación tomada de [18]), evaluada en T_m^2 (reemplazar T por T_m^2):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

- El cálculo de la presión de saturación a la temperatura T_m^1 (denotada como P_m^1), para reemplazar posteriormente estas dos variables en la correlación 2.23 (de Wang y Chen [22]).

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_m^1}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2 \Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1 \Omega_{bc} \Omega_{cc}}{k_2 \Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac} R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc} R T_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc} R T_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P_m^2 = \frac{RT_m^2(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_K(T_m^2)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^2) = v_K$$

Para $k_K(T_m^2)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^2) = A + BT_m^2 + C(T_m^2)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^2)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^2} + CT_m^2 + D(T_m^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

f. Pérdidas de calor:

$$L_s^2 = 0$$

g. Volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto):

$$V_s^{ep} = V_s^{e1}$$

$$V_s^{e1} = V_T^1 - \frac{W^1}{\rho_L^1} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^1}{\rho_L^1}.$$

Para las paredes de los tubos de la calandria (2° Efecto):

■ Se aplica la ecuación diferencial 2.65:

$$W_w^2 C_{pw}^2 \frac{dT_w^2}{dt} = Q_s^2 - Q^2 = h_v^2 A_{vc}^2 (T_s^{ca2} - T_w^2) - h_L^2 A_L^2 (T_w^2 - T^2)$$

a. La masa de los tubos calculada en la sección B.1.7:

$$W_w^2 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$$

b. Área de transferencia en el lado de vapor:

$$A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2$$

c. Área de transferencia en el lado del líquido:

$$A_L^2 = 1,04057\text{m}^2.$$

d. Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^2 :

$$h_v^2 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^2) \cdot \rho_K^2(T_m^2) \cdot k_K^3(T_m^2) \cdot g}{\eta_K(T_m^2) \cdot H \cdot (T^{ca2} - T_w^2)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^2 = \frac{T^{ca2} + T_w^2}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^2)$:

$$\lambda_v(T_m^2) = (v_S - v_L)T_M^2 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Para hallar la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), se deriva la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) y se evalúa en T_m^2 :

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln \left(\frac{P_v}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Para $\rho_K(T_m^2)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^2) = v_K$$

Para $k_K(T_m^2)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^2) = A + BT_m^2 + C(T_m^2)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^2)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^2} + CT_m^2 + D(T_m^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K .

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

e. Para calcular h_L^2 :

$$\frac{h_L^2 \cdot \sigma_L(T^2)}{k_L(T^2) \cdot P^2} = c \cdot \frac{(T_w^2 - T^2) \cdot C_{pL}(T^2)}{\lambda_v(T^2)} \left(\frac{\rho_L(T^2)}{10^3 \rho_v(T^2)} \right)^{0,5} \left(\frac{\eta_{H_2O}(T^2)}{\eta_L(T^2)} \right)^{0,25}$$

P^2 es la presión en el segundo efecto.

T_w^2 Temperatura de la pared de los tubos de la calandria del segundo efecto.

Para $\sigma_L(T^2)$ (tensión superficial del líquido):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$\chi = 0,0236$$

$$T_R = \frac{T^2}{T_c}$$

$$Q_p = 0,156 + 0,365\omega_w - 1,754\chi - 13,57\chi^2 - 0,506\omega_w^2 + 1,287\omega_w\chi$$

$$m = 1,21 + 0,5385\omega_w - 14,61\chi - 32,07\chi^2 - 1,656\omega_w^2 + 22,03\omega_w\chi$$

Ecuación de Van der Waals transformada por Hakim et al.:

$$\sigma_L = P_c^{2/3} T_c^{1/3} \left(\frac{1 - T_R}{0,4} \right)^m \frac{Q_p}{1000}$$

P_c en bar y σ en N/m.

Para $k_L(T^2)$ (conductividad térmica del líquido):

$$k_L(T^2) = A + BT^2 + C(T^2)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_L en W/(m · K) y T en K.

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

Para $\rho_L(T^2)$ (densidad del líquido):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T^2}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_L(T^2) = v_K$$

Para el factor c:

$$V_L^2 = \frac{W^2}{\rho_L(T^2)}$$

Para $0,217\text{m} \leq y^2 \leq 0,567\text{m}$:

$$y_p^2 = \frac{y^2 - 0,217}{0,567 - 0,217} \cdot 100\%$$

Para $0\text{m} \leq y^2 \leq 0,217\text{m}$:

$$y_p^2 = 0\%$$

Para $0,567\text{m} \leq y^2 \leq 1,502\text{m}$:

$$y_p^2 = 100\%$$

$$c = 0,24 + \frac{0,37 - 0,24}{40 - 75}(y_p^2 - 75)$$

Sección	Rango de Nivel (m) y^2	Correlación de cálculo del volumen (m^3)
7	0-0.126	$V_L^2 = \pi(0,00006241y^1 + \frac{1}{2}0,01782(y^2)^2 + \frac{1}{3}1,2724(y^2)^3)$
6	0.126-0.217	$V_L^2 = 0,003135 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^2 - 0,126)$
5	0.217-0.567	$V_L^2 = 0,009565$ $+ \frac{\pi}{4} [(3,068 \cdot 0,0254)^2 + 60(0,493 \cdot 0,0254)^2] (y^2 - 0,217)$
4	0.567-0.616	$V_L^2 = 0,013815 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^2 - 0,567)$
3	0.616-0.716	$V_L^2 = 0,017275$ $+ \pi[0,0225(y^2 - 0,616)$ $+ \frac{1}{2}0,15(y^2 - 0,616)^2 + \frac{1}{3}0,25(y^2 - 0,616)^3]$
2	0.716-1.366	$V_L^2 = 0,026975 + \frac{\pi}{4}(0,4)^2(y^2 - 0,716)$
1	1.366-1.502	$V_L^2 = 0,10866$ $- 4 \cdot 0,07353\pi (\frac{1}{2}(y^2 - 1,366)^2 - 0,136(y^2 - 1,366))$

Para $\rho_v(T^2)$ (densidad del vapor en equilibrio con el líquido):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$\ln \left(\frac{P^2}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T^2}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 \text{ K}$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_c}{T_b}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_v^2 = 1/v_v^2$$

$$P^2 = \frac{RT^2(1 + k_1b/v_v^2)}{v_v^2 - k_2b} - \frac{a}{v_v^2(v_v^2 + c)}$$

Para $\eta_L(T^2)$ (viscosidad dinámica del líquido):

$$\ln \eta_L = A + \frac{B}{T^2} + CT^2 + D(T^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para $\eta_{H_2O}(T^2)$ (viscosidad dinámica del agua):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T^2} + CT^2 + D(T^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para la capacidad calorífica ($C_{pL}(T^2)$):

$$C_{pL}(T^2) = A + BT^2 + C(T^2)^2 + D(T^2)^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

Para la Columna de Líquido (2° Efecto):

- Ecuación diferencial 2.76:

$$\frac{dW^2}{dt} = B^1 - B^2 - S^2$$

- Ecuación diferencial 2.78:

$$W^2 \frac{dh^2(T^2)}{dt} = B^1 (h^1(T^1) - h^2(T^2)) - S^2 (H^2(T^2) - h^2(T^2)) + Q^2 + \phi^2 - L^2$$

- Para la entalpía de la columna de líquido ($h^2(T^2)$):

$$h^2(T^2) = \int_{T_0}^{T^2} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

- Para la entalpía del líquido proveniente del primer efecto ($h^1(T^1)$)

$$h^1(T^1) = \int_{T_0}^{T^1} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

- Para la entalpía del vapor producido ($H^2(T^2)$):

$$H^2(T^2) = \int_{T_0}^{T^2} C_p(T) dT + \lambda_v(T^2)$$

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T^2)$

$$\lambda_v(T_m^2) = (v_S - v_L)T^2 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^2}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Para hallar la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), se deriva la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) y se evalúa en T^2 :

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln \left(\frac{P_v}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

d. Para calcular Q^2 :

$$Q^2 = h_L^2 A_L^2 (T_w^2 - T^2)$$

Donde:

- 1) El área de transferencia de calor es: $A_L^2 = 1,04057\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.6).
- 2) El cálculo de h_L^2 se presentó en el conjunto de ecuaciones de *las Paredes de los Tubos de la Calandria (2º Efecto)*.

e. $\phi^2 = 0$

f. $L^2 = 0$

Para el vapor en el condensador:

Conexiones entre unidades:

$$S^2 = S^{cr}$$

$$T^2 = T^{cr}$$

$$H^2(T^2) = H^{cr}(T^{cr})$$

$$\rho_v^2(T^2) = \rho_s^{cr}(T^{cr})$$

- Se aplica la ecuación diferencial 2.84:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \frac{d\rho_s^{cr}(T_s^{cr})}{dt} = S^{cr} - S_c^{cr}$$

a. El Volumen que ocupa el vapor en los tubos del condensador:

$$V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$$

b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1º Efecto):

$$V_s^{ep} = V_s^{e2}$$

$$V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}.$$

c. Para $\rho_s^2(T^2)$:

$$\rho_v^2(T^2) = \rho_s^{cr}(T_s^{cr})$$

- Ecuación diferencial 2.85:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \rho_s^{cr}(T_s^{cr}) \frac{dH_s^{cr}(T_s^{cr})}{dt} = S^{cr} (H_s^{cr}(T_s^{cr}) - h_c^{cr}(T_s^{cr})) - Q^{cr} - L_s^{cr}$$

a. El Volumen que ocupa el vapor en los tubos del condensador:

$$V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$$

b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1º Efecto):

$$V_s^{ep} = V_s^{e1}$$

$$V_s^{e1} = V_T^1 - \frac{W^1}{\rho_L^1} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^1}{\rho_L^1}.$$

c. Para $\rho_s^1(T^1)$:

$$\rho_v^1(T^1) = \rho_s^{cr}(T_s^{cr})$$

d. Para la entalpía del condensado $h_c^{cr}(T^{cr})$:

$$h_c^{cr}(T^{cr}) = \int_{T_0}^{T^{cr}} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

e. Para calcular Q^{cr} :

$$Q^{cr} = U^{cr} A^{cr} \Delta T^{cr}$$

El área de transferencia de calor:

$$A^{cr} = 0,885422\text{m}^2$$

$$\Delta T^{cr} = LMTD = \frac{T_{Agua}^s - T_{Agua}^e}{\ln \left[\frac{T^{cr} - T_{Agua}^e}{T^{cr} - T_{Agua}^s} \right]}$$

$$\frac{1}{U^{cr}} = \frac{1}{h_v^{cr}} + \frac{s_w}{k_w} + \frac{1}{h_L^{cr}}$$

$$s_w = 0,0046228\text{m}$$

$$k_w = 26\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$$

Para calcular h_v^{cr} :

$$T_m^{cr} = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$$

$$h_v^{cr} = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^{cr}) \cdot \rho_K^2(T_m^{cr}) \cdot k_K^3(T_m^{cr}) \cdot g}{\eta_K(T_m^{cr}) \cdot H \cdot (T^{cr} - T_w^{cr})}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

El valor de la longitud de los tubos es:

$$H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^{cr} = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^{cr})$:

$$\lambda_v(T_m^{cr}) = (v_S - v_L)T_m^{cr} \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T_m^{cr}}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Con la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) se lleva a cabo el cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T) evaluada en T_m^{cr} (reemplazar T por T_m^{cr}):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 \text{ K}$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_c^{cr}}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c}\right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right)^2 + 5,2614\sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3\Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c}F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P^{cr} = \frac{RT_m^{cr}(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_K(T_m^{cr})$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^{cr}}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^{cr}) = v_K$$

Para $k_K(T_m^{cr})$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^{cr}) = A + BT_m^{cr} + C(T_m^{cr})^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en W/(m · K) y T en K.

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

Para $\eta_K(T_m^{cr})$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^{cr}} + CT_m^{cr} + D(T_m^{cr})^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Se asume que la temperatura de las paredes de los tubos es: $T_w^{cr} = T_m$.

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

$$h_L^{cr} = j_H \frac{k}{D_{eq}} \left(\frac{C_p \eta}{k} \right)^{1/3}$$

$$j_H = 10^{0,5066 \log(Re) - 0,2265}$$

Diámetro equivalente de la coraza:

$$D_{eq} = 0,022771 \text{m}^2$$

Área transversal al flujo:

$$a_s = 0,006947 \text{m}^2$$

$$Re = \frac{F_{Agua}^e}{a_s} \cdot \frac{D_{eq}}{\eta}$$

$$T_{m-Agua} = \frac{T_{Agua}^e + T_{Agua}^s}{2}$$

$$C_p = A + BT_{m-Agua} + CT_{m-Agua}^2 + DT_{m-Agua}^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K. Tomada de la tabla 6 de [26].

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T_{m-Agua}} + CT_{m-Agua} + DT_{m-Agua}^2$$

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

$$k = A + BT_{m-Agua} + CT_{m-Agua}^2$$

k en W/(m · K) y T en K. Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

f. $L_s^{cr} = 0$

Para la coraza del condensador:

- Ecuación 2.87:

$$F_{Agua}^e = F_{Agua}^s$$

- Ecuación 2.88:

$$F_{Agua}^e h_{Agua}^e(T^e) + Q^{cr} = F_{Agua}^s h_{Agua}^s(T^s)$$

- Para la entalpía del agua a la entrada:

$$h_{Agua}^e(T^e) = \int_{T_0}^{T^e} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

- Para la entalpía del agua a la salida:

$$h_{Agua}^s(T^s) = \int_{T_0}^{T^s} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

La capacidad calorífica se muestra en el punto anterior.

- Las expresiones necesarias para el cálculo de Q^{cr} se presentan entre las ecuaciones de cálculo para *el Vapor en el Condensador*.

2.2.5. Modelo General de Evaporación de Soluciones

Se presenta un modelo general de evaporación de soluciones constituidas por un único solvente y un soluto.

Para el Vapor en la Calandria (1° Efecto):

La temperatura en este subsistema se denota con T_S .

- Se toma la ecuación diferencial 2.62, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de P y T ; sin embargo, al tratarse de vapor saturado, se tiene que la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.

- Se toma la ecuación diferencial 2.63 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de la presión y la temperatura; sin embargo, como se trata de vapor saturado, la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
 - c. La entalpía del agua líquida $h_c(T_S)$, producto de la condensación del vapor vivo de caldera se calcula con la ecuación 2.21, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37.
 - d. La entalpía del vapor vivo de caldera ($H_s(T_S)$), se calcula con la ecuación 2.22, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37 y de la entalpía de vaporización (λ_v), parámetro que se calcula con la ecuación 2.26.
 - e. Q_s^1 se calcula con la ecuación 2.64, en esta ecuación se requiere la temperatura de la pared de la calandria T_w^1 , el área de transferencia en el lado de vapor: $A_{vc}^1 = 1,2795m^2$ (Tomada de la sección B.1.5) y el coeficiente convectivo (h_v^1). Para calcular h_v^1 , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere $T_x = T_S$; el valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): $T_K = T_w^1$; el valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350mm = 0,35m$ (de la sección B.1.3) y el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T_S + T_w^1}{2}$.
 - f. Se asume que la pérdida de calor L_s^1 es igual a cero gracias al aislamiento del equipo con lana de vidrio.

Para las paredes de los tubos de la Calandria (1° Efecto):

En este subsistema la temperatura de las paredes se denota como T_w^1 .

- Se aplica la ecuación diferencial 2.65, teniendo en cuenta:
 - a. La masa de los tubos, calculada en la sección B.1.7 es: $W_w^1 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$.
 - b. El área de transferencia en el lado de vapor y en el lado del líquido, calculadas en las secciones B.1.5 y B.1.6 respectivamente son: $A_{vc} = 1,2795\text{m}^2$ y $A_L = 1,04057\text{m}^2$.
 - c. Es necesario calcular el coeficiente convectivo del vapor condensante (h_v^1) mediante la ecuación 2.27. Para calcular h_v^1 se requiere:
 - 1) La temperatura de la película de las paredes de los tubos de la calandria (T_w^1).
 - 2) El valor de T_s que es igual a la temperatura del vapor en el subsistema (T_S).
 - 3) El valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3).
 - 4) El cálculo de los siguientes parámetros: λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T_S + T_w^1}{2}$.
 - d. También es necesario calcular h_L^1 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^1$, $T_L = T^1$, presión P^1 y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_K y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^1 y a la presión P^1 .

Para la Columna de Líquido (1° Efecto):

- Se aplica la ecuación diferencial 2.66, en la cual W^1 es la masa de líquido contenida en el evaporador.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.67, debido a que la concentración de soluto es igual a cero.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.68, teniendo en cuenta:
 - a. La entalpía de la columna de líquido ($h^1(T^1)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^1 (temperatura de la columna de líquido).
 - b. La entalpía de la alimentación ($h_F^1(T_F^1)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T_F^1 (temperatura de la alimentación).

- c. La entalpía del vapor producido ($H^1(T^1)$) se calcula con la ecuación 2.22, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^1 (temperatura de la columna de líquido), y del parámetro λ_v , que se calcula con la ecuación 2.26 evaluada en T^1 .
- d. Q^1 se calcula con la ecuación 2.69, en la cual se requiere:
- 1) El área de transferencia de calor: $A_L = 1,04057\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.6).
 - 2) El cálculo de h_L^1 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^1$, $T_L = T^1$, presión P^1 , y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_{H_2O} y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones mostradas en la tabla 2.3, evaluadas a la temperatura T^1 y a la presión P^1 .
- e. El calor de solución ϕ^1 es igual a cero debido a la ausencia de soluto.
- f. se asume que la pérdida de calor L^1 es igual a cero, gracias al aislamiento de lana de vidrio.

Para el vapor en la calandria del segundo efecto:

La temperatura en este subsistema se denota con T^{ca2} .

- Se toma la ecuación diferencial 2.72, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) \text{m}^3 = 2,2487E - 2\text{m}^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de P y T ; sin embargo, al tratarse de vapor saturado, se tiene que la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
- Se toma la ecuación diferencial 2.73 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) \text{m}^3 = 2,2487E - 2\text{m}^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de la presión y la temperatura; sin embargo, como se trata de vapor saturado, la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
 - c. La entalpía del agua líquida $h_c^{ca2}(T^{ca2})$, producto de la condensación del vapor vivo de caldera se calcula con la ecuación 2.21, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37.

- d. La entalpía del vapor vivo de caldera ($H^{ca2}(T^{ca2})$), se calcula con la ecuación 2.22, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37 y de la entalpía de vaporización (λ_v), parámetro que se calcula con la ecuación 2.26.
- e. Q_s^2 se calcula con la ecuación 2.74, en esta ecuación se requiere la temperatura de la pared de la calandria T_w^2 , el área de transferencia en el lado de vapor: $A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.5) y el coeficiente convectivo (h_v^2). Para calcular h_v^2 , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere $T_x = T^{ca2}$; el valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): $T_K = T_w^2$; el valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3) y el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T^{ca2} + T_w^2}{2}$.
- f. Se asume que la pérdida de calor L_s^2 es igual a cero gracias al aislamiento del equipo con lana de vidrio.
- g. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e1}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e1} = V_T^1 - \frac{W^1}{\rho_L^1} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^1}{\rho_L^1}$.

Para las paredes de los tubos de la calandria (2° Efecto):

En este subsistema la temperatura de las paredes se denota como T_w^2 .

- Se aplica la ecuación diferencial 2.75, teniendo en cuenta:
 - a. La masa de los tubos, calculada en la sección B.1.7 es: $W_w^2 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$.
 - b. El área de transferencia en el lado de vapor y en el lado del líquido, calculadas en las secciones B.1.5 y B.1.6 respectivamente son: $A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2$ y $A_L = 1,04057\text{m}^2$.
 - c. Es necesario calcular el coeficiente convectivo del vapor condensante (h_v^2) mediante la ecuación 2.27. Para calcular h_v^2 se requiere:
 - 1) La temperatura de la película de las paredes de los tubos de la calandria (T_w^2).
 - 2) El valor de T_s que es igual a la temperatura del vapor en el subsistema (T^{ca2}).
 - 3) El valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3).

- 4) El cálculo de los siguientes parámetros: λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T_{ca2} + T_w^2}{2}$.
- d. También es necesario calcular h_L^2 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^2$, $T_L = T^2$, presión P^2 y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_K y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^2 y a la presión P^2 .

Para la Columna de Líquido (2° Efecto):

- Se aplica la ecuación diferencial 2.76, en la cual W^2 es la masa de líquido contenida en el evaporador.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.77, debido a que la concentración de soluto es igual a cero.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.78, teniendo en cuenta:
 - a. La entalpía de la columna de líquido ($h^2(T^2)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^2 (temperatura de la columna de líquido).
 - b. La entalpía del líquido proveniente del primer efecto ($h^1(T^1)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^1 (temperatura del líquido).
 - c. La entalpía del vapor producido ($H^2(T^2)$) se calcula con la ecuación 2.22, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^2 (temperatura de la columna de líquido), y del parámetro λ_v , que se calcula con la ecuación 2.26 evaluada en T^2 .
 - d. Q^2 se calcula con la ecuación 2.79, en la cual se requiere:
 - 1) El área de transferencia de calor: $A_L^2 = 1,04057\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.6).
 - 2) El cálculo de h_L^2 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^2$, $T_L = T^2$, presión P^2 , y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_{H_2O} y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones mostradas en la tabla 2.3, evaluadas a la temperatura T^2 y a la presión P^2 .
 - e. El calor de solución ϕ^2 es igual a cero debido a la ausencia de soluto.
 - f. se asume que la pérdida de calor L^2 es igual a cero, gracias al aislamiento de lana de vidrio.

Para el vapor en el condensador:

Se deben tener en cuenta las conexiones entre unidades: 2.80, 2.81, 2.82 y 2.83.

- Se aplica la ecuación diferencial 2.84, considerando los siguientes aspectos:
 - a. El Volumen que ocupa el vapor en los tubos del condensador es: $V_s^{cr} = 2,979E - 3m^3$ (tomado de la sección B.2.3).
 - b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e2}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205m^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}$.
 - c. La densidad del vapor producido ρ_s^{cr} se calcula con la ecuación 2.23 evaluada en $T = T_s^{cr}$ y debido a que el vapor se encuentra saturado, la presión corresponde a la presión de saturación a T_s^{cr} y se calcula con la correlación 2.20.

- Se aplica la ecuación diferencial 2.85 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en en los tubos del condensador es: $V_s^{cr} = 2,979E - 3m^3$ (tomado de la sección B.2.3).
 - b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e2}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205m^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}$.
 - c. La densidad del vapor producido ρ_s^{cr} se calcula con la ecuación 2.23 evaluada en $T = T_s^{cr}$ y debido a que el vapor se encuentra saturado, la presión corresponde a la presión de saturación a $T = T_s^{cr}$ y se calcula con la correlación 2.20.
 - d. La entalpía del condensado $h_c^{cr}(T^{cr})$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^{cr} referida al parámetro C_p .
 - e. Q^{cr} se calcula mediante la ecuación 2.86, la cual requiere a su vez del área de transferencia de calor (A^{cr}), de la diferencia de temperatura promedio (ΔT^{cr}) y del coeficiente global de transferencia de calor (U^{cr}).
El área de transferencia de calor, calculada en la sección B.2.4 con la ecuación 2.31 es:
 $A^{cr} = 0,885422m^2$.
 ΔT^{cr} se calcula con la ecuación 2.29.
 U^{cr} se calcula con la ecuación 2.30, la cual requiere de los parámetros s_w , k_w , h_v^{cr} y h_L^{cr} .
De la sección B.2: $s_w = 0,0046228m$ y $k = 26Btu/ h \cdot ft \text{ } ^\circ F$.
Para calcular h_v^{cr} , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere:

- 1) El valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): ($T_K = T_w^{cr}$).
- 2) El valor de la longitud de los tubos es: $H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$ (de la sección B.2).
- 3) Se requiere también el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, los cuales se evalúan a la temperatura media de la película $T = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$.

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

- 1) La evaluación de los parámetros C_p , η y k para el agua a la temperatura media de entrada y salida de esta: $\frac{T_{Agua}^e + T_{Agua}^s}{2}$, aplicando las ecuaciones 2.37, 2.38 y 2.39 para cada parámetro respectivamente.
 - 2) El diámetro equivalente de la coraza, calculado en la sección B.2 con la ecuación 2.139 es: $D_{eq} = 0,022771\text{m}^2$.
 - 3) El área transversal al flujo, calculada en la sección B.2 con la ecuación 2.140 es $a_s = 0,006947\text{m}^2$.
 - 4) El cálculo de Re con la ecuación 2.141.
 - 5) El cálculo de j_H con la ecuación 2.138.
- f. Se asume que que todo el calor perdido por el vapor es recibido por el flujo de agua que circula por la coraza debido a que el vapor fluye por los tubos; esto implica que se asume que la pérdida de calor L_s^{cr} es igual a cero.

Para la coraza del condensador:

- Se aplica la ecuación 2.87, en la cual se asume que no hay acumulación.
- Se aplica la ecuación 2.88, teniendo en cuenta la ecuación 2.87 y el siguiente proceso:
 - a. La entalpía del condensado $h_{Agua}^e(T^e)$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^e referida al parámetro C_p .
 - b. La entalpía del condensado $h_{Agua}^s(T^s)$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^s referida al parámetro C_p .
 - c. Para calcular el calor que cede el vapor al agua de enfriamiento (Q^{cr}):
 Q^{cr} se calcula mediante la ecuación 2.86, la cual requiere a su vez del área de transferencia de calor (A^{cr}), de la diferencia de temperatura promedio (ΔT^{cr}) y del coeficiente global de transferencia de calor (U^{cr}).
 El área de transferencia de calor, calculada en la sección B.2.4 con la ecuación 2.31 es:
 $A^{cr} = 0,885422\text{m}^2$.

ΔT^{cr} se calcula con la ecuación 2.29.

U^{cr} se calcula con la ecuación 2.30, la cual requiere de los parámetros s_w , k_w , h_v^{cr} y h_L^{cr} .

De la sección B.2: $s_w = 0,0046228\text{m}$ y $k = 26\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$.

Para calcular h_v^{cr} , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere:

- 1) El valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado), que es igual a la temperatura de las paredes de los tubos del condensador ($T_K = T_w^{cr}$).
- 2) El valor de la longitud de los tubos es: $H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$ (de la sección B.2).
- 3) Se requiere también el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, los cuales se evalúan a la temperatura media de la película $T = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$.

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

- 1) La evaluación de los parámetros C_p , η y k para el agua a la temperatura media de entrada y salida de esta: $\frac{T_{Agua}^e + T_{Agua}^s}{2}$, aplicando las ecuaciones 2.37, 2.38 y 2.39 para cada parámetro respectivamente.
- 2) El diámetro equivalente de la coraza, calculado en la sección B.2 con la ecuación 2.139 es: $D_{eq} = 0,022771\text{m}^2$.
- 3) El área transversal al flujo, calculada en la sección B.2 con la ecuación 2.140 es $a_s = 0,006947\text{m}^2$.
- 4) El cálculo de Re con la ecuación 2.141.
- 5) El cálculo de j_H con la ecuación 2.138.

2.3. Evaporación en Múltiples Efectos con Alimentación en Contracorriente

En esta sección se presenta la descripción general del proceso de Evaporación en Múltiples Efectos con Alimentación en Contracorriente, las ecuaciones generales de acumulación de materia y energía, el modelo de evaporación de agua y un modelo general de evaporación de soluciones.

2.3.1. Descripción General del Proceso

Continuamente se alimenta al segundo efecto una solución almacenada en un tanque, que es impulsada gracias al efecto de la gravedad; dicha solución llega a la columna de líquido que se encuentra dentro de este evaporador.

La columna de líquido en este efecto recibe el calor latente del vapor producido en el primer

efecto, de manera tal que a la temperatura de ebullición se produce un flujo de vapor que entra al condensador, y un flujo de solución parcialmente concentrada pasa al siguiente evaporador con la ayuda de una bomba. La columna de líquido presente en el primer evaporador recibe calor de un flujo de vapor vivo de caldera (saturado) a un rango de presión entre 0psig hasta 50psig (esto implica un rango de temperatura de 365.97K a 418.75K) que pasa por fuera de los tubos de la calandria. El vapor vivo de caldera que se condensa sale del sistema.

Gracias al calor transferido por el vapor vivo de caldera, el solvente del líquido en el primer efecto se evapora y fluye a la calandria del segundo evaporador. El flujo de líquido retirado el primer evaporador se constituye como el producto, y contiene la porción del solvente no evaporado y el soluto presente.

El primer efecto puede trabajar a la presión de Manizales (585mmHg) y el segundo a una presión de vacío (hasta -30inHg).

En resumen, se trata de un proceso continuo que puede observarse en la figura 2.30 y en el diagrama de bloques de la figura 2.29.

2.3.2. Ecuaciones de Acumulación de Materia y Energía

En la figura 2.30 se muestran las corrientes del sistema.

Para el primer efecto:

Para el vapor en la Calandria (1° Efecto):

Balance de Materia en la zona de vapor vivo de caldera:

Teniendo en cuenta que la densidad del vapor saturado depende únicamente de una propiedad Presión o temperatura, tenemos: $\rho_s = f(T)$.

$$V_s^1 \frac{d\rho_s(T_S)}{dt} = S - S_c \quad (2.90)$$

La dependencia de la densidad con respecto a la temperatura se da en la ecuación 2.23.

Balance de Energía en la zona de vapor vivo de caldera:

$$V_s^1 \frac{d\rho_s(T_S)H_s(T_S)}{dt} = SH_s(T_S) - S_ch_c(T_S) - Q_s^1 - L_s^1$$

Por la regla de la cadena obtenemos:

$$V_s^1 \left(\rho_s(T_S) \frac{dH_s(T_S)}{dt} + H_s(T_S) \frac{d\rho_s(T_S)}{dt} \right) = SH_s(T_S) - S_ch_c(T_S) - Q_s^1 - L_s^1$$

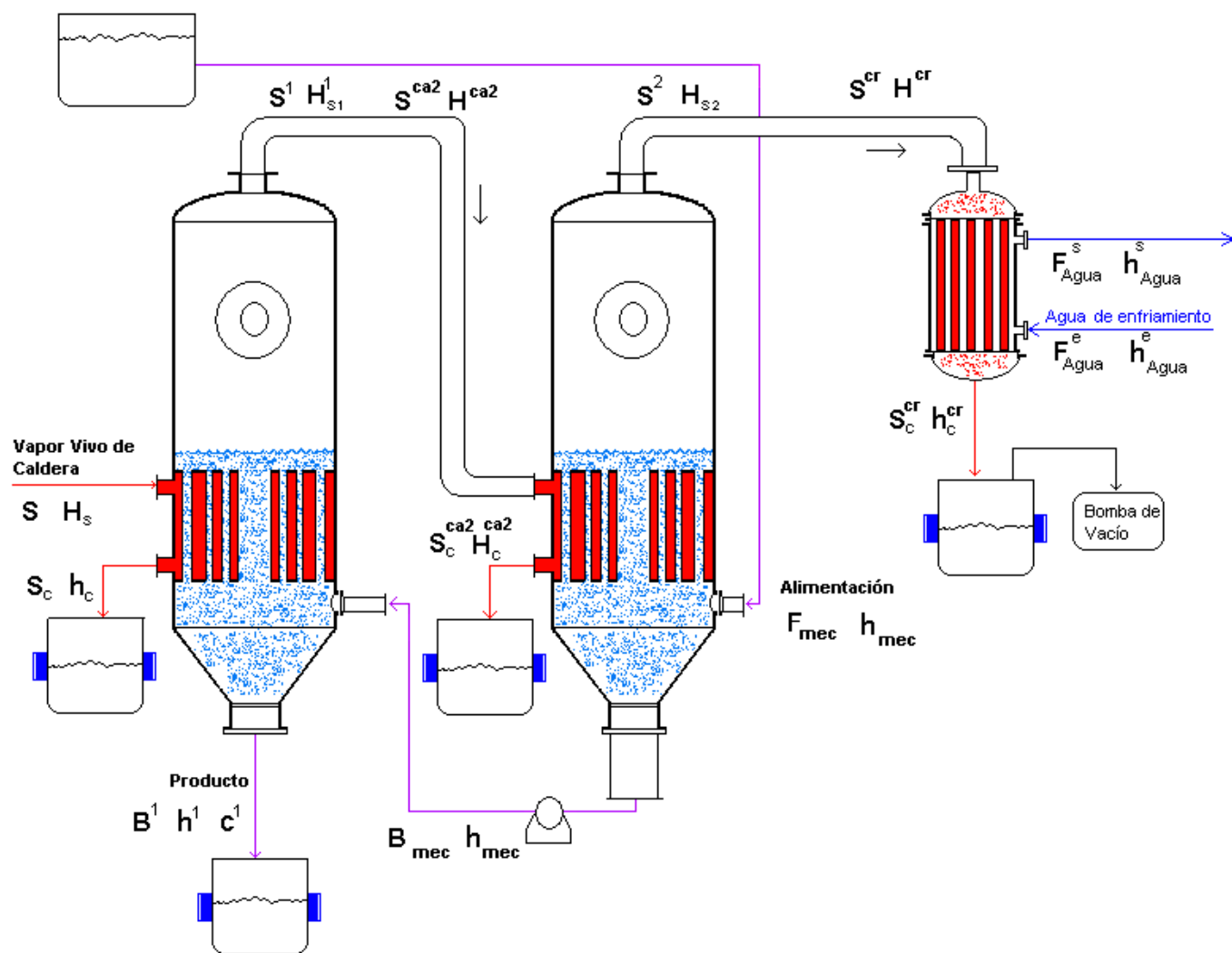


Figura 2.30: Evaporación en Múltiples Efectos con Alimentación en contracorriente

Al reemplazar 2.90 en la ecuación anterior obtenemos:

$$V_s^1 \rho_s(T_S) \frac{dH_s(T_S)}{dt} + H_s(T_S)(S - S_c) = SH_s(T_S) - S_c h_c(T_S) - Q_s^1 - L_s^1$$

$$V_s^1 \rho_s(T_S) \frac{dH_s(T_S)}{dt} = S_c(H_s(T_S) - h_c(T_S)) - Q_s^1 - L_s^1 \quad (2.91)$$

Q_s^1 es el calor cedido por el vapor vivo de caldera y se puede expresar como:

$$Q_s^1 = h_v^1 A_{vc}^1 (T_S - T_w^1) \quad (2.92)$$

Para las paredes de los tubos de la Calandria (1° Efecto):

Balance de Energía en las paredes de los tubos de la calandria:

$$W_w^1 C_{pw}^1 \frac{dT_w^1}{dt} = Q_s^1 - Q^1 = h_v^1 A_{vc}^1 (T_S - T_w^1) - h_L^1 A_L^1 (T_w^1 - T^1) \quad (2.93)$$

Para el acero $c_p = 0,12 \text{ cal/g} \cdot \text{K}$ (Tomado de [1]). En unidades del sistema internacional: $c_p = 0,5024 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

Para la Columna de Líquido (1° Efecto):

Balance de Materia Global en la columna de líquido hirviente:

$$\frac{dW^1}{dt} = B^{mec} - B^1 - S^1 \quad (2.94)$$

Donde:

B^{mec} : es el flujo de solución alimentado al primer efecto y proveniente del segundo.

Balance de Materia para el soluto en la columna de líquido hirviente:

$$\frac{dW^1 C^1}{dt} = B^{mec} C^{mec} - B^1 C^1$$

Donde:

C^{mec} : es la concentración del flujo de solución alimentado al primer efecto y proveniente del segundo.

Aplicando la regla de la cadena:

$$W^1 \frac{dC^1}{dt} + C^1 \frac{dW^1}{dt} = B^{mec} C^{mec} - B^1 C^1$$

Reemplazando la ecuación 2.94 en la anterior:

$$W^1 \frac{dC^1}{dt} + C^1(B^{mec} - B^1 - S^1) = B^{mec}C^{mec} - B^1C^1$$

$$W^1 \frac{dC^1}{dt} = B^{mec}(C^{mec} - C^1) + S^1C^1 \quad (2.95)$$

Balance de Energía en la columna de líquido hirviente:

$$\frac{dW^1 h^1(T^1)}{dt} = B^{mec} h^{mec}(T^2) - B^1 h^1(T^1) - S^1 H^1(T^1) + Q_s^1 + \phi^1 - L^1$$

Donde:

h^{mec} : es la entalpía del flujo de solución alimentado al primer efecto y proveniente del segundo.

Aplicando la regla de la cadena:

$$W^1 \frac{dh^1(T^1)}{dt} + h^1(T^1) \frac{dW^1}{dt} = B^{mec} h^{mec}(T^2) - B^1 h^1(T^1) - S^1 H^1(T^1) + Q_s^1 + \phi^1 - L^1$$

Reemplazando la ecuación 2.94 en la anterior:

$$W^1 \frac{dh^1(T^1)}{dt} + h^1(T^1)(B^{mec} - B^1 - S^1) = B^{mec} h^{mec}(T^2) - B^1 h^1(T^1) - S^1 H^1(T^1) + Q_s^1 + \phi^1 - L^1$$

$$W^1 \frac{dh^1(T^1)}{dt} = B^{mec}(h^{mec}(T^2) - h^1(T^1)) - S^1(H^1(T^1) - h^1(T^1)) + Q_s^1 + \phi^1 - L^1 \quad (2.96)$$

Donde ϕ^1 es el calor del efecto de solución y Q^1 es el calor recibido por el líquido, y puede expresarse como

$$Q^1 = h_L^1 A_L^1 (T_w^1 - T^1) \quad (2.97)$$

Se asume que el líquido y el vapor se encuentran en equilibrio todo el tiempo.

Conexiones entre unidades 1 y 2:

$$S^1 = S^{ca2} \quad (2.98)$$

$$H^1 = H^{ca2} \quad (2.99)$$

$$T^1 = T^{ca2} \quad (2.100)$$

$$C^{mec} = C^2 \quad (2.101)$$

$$h^{mec} = h^2 \quad (2.102)$$

$$T^{mec} = T^2 \quad (2.103)$$

Para el segundo efecto:

Para el Vapor en la Calandria (2° Efecto):

Balance de Materia en la zona de vapor de la segunda calandria:

$$(V_s^{ep} + V_s^2) \frac{d\rho_s^{ca2}(T^{ca2})}{dt} = S^{ca2} - S_c^{ca2} \quad (2.104)$$

Balance de Energía en la zona de vapor de la segunda calandria:

$$(V_s^{ep} + V_s^2) \frac{d\rho_s^{ca2}(T^{ca2})H^{ca2}(T^{ca2})}{dt} = S^{ca2}H^{ca2}(T^{ca2}) - S_c^{ca2}h_c^{ca2}(T^{ca2}) - Q_s^2 - L_s^2$$

Aplicando la regla de la cadena:

$$\begin{aligned} (V_s^{ep} + V_s^2) \left(\rho_s^{ca2}(T^{ca2}) \frac{dH^{ca2}(T^{ca2})}{dt} + H^{ca2}(T^{ca2}) \frac{d\rho_s^{ca2}(T^{ca2})}{dt} \right) \\ = S^{ca2}H^{ca2}(T^{ca2}) - S_c^{ca2}h_c^{ca2}(T^{ca2}) - Q_s^2 - L_s^2 \end{aligned}$$

Reemplazando la ecuación 2.104 en la anterior:

$$\begin{aligned} (V_s^{ep} + V_s^2) \rho_s^{ca2}(T^{ca2}) \frac{dH^{ca2}(T^{ca2})}{dt} + H^{ca2}(T^{ca2})(S^{ca2} - S_c^{ca2}) \\ = S^{ca2}H^{ca2}(T^{ca2}) - S_c^{ca2}h_c^{ca2}(T^{ca2}) - Q_s^2 - L_s^2 \end{aligned}$$

$$(V_s^{ep} + V_s^2) \rho_s^{ca2}(T^{ca2}) \frac{dH^{ca2}(T^{ca2})}{dt} = S_c^{ca2} (H^{ca2}(T^{ca2}) - h_c^{ca2}(T^{ca2})) - Q_s^2 - L_s^2 \quad (2.105)$$

Q_s^2 es el calor cedido por el vapor producido en el primer efecto a la columna de líquido del segundo efecto, se puede expresar como:

$$Q_s^2 = h_V^2 A_{vc}^2 (T^{ca2} - T_w^2)$$

Para las paredes de los tubos de la Calandria (2° Efecto):

Balance de Energía en las paredes de los tubos de la calandria del segundo efecto:

$$W_w^2 C_{pw}^2 \frac{dT_w^2}{dt} = h_V^2 A_{vc}^2 (T^{ca2} - T_w^2) - h_L^2 A_L^2 (T_w^2 - T^2) \quad (2.106)$$

Para la Columna de Líquido (2° Efecto):

Balance de Materia Global en la columna de líquido hirviente:

$$\frac{dW^2}{dt} = F^{mec} - B^{mec} - S^2 \quad (2.107)$$

Donde:

F_F^{mec} : es el flujo de solución alimentado al tren de evaporadores para este tipo de configuración, es alimentado al segundo efecto.

B^{mec} : es el flujo de solución que sale del segundo efecto y entra al primero.

Balance de Materia para el soluto en la columna de líquido hirviente:

$$\frac{dW^2 C^2}{dt} = F^{mec} C_F^{mec} - B^{mec} C^2$$

C_F^{mec} : es la concentración del flujo de solución alimentada al segundo efecto.

Aplicando la regla de la cadena:

$$W^2 \frac{dC^2}{dt} + C^2 \frac{dW^2}{dt} = F^{mec} C_F^{mec} - B^{mec} C^2$$

Reemplazando la ecuación 2.107 en la anterior:

$$W^2 \frac{dC^2}{dt} + C^2 (F_F^{mec} - B^{mec} - S^2) = F^{mec} C_F^{mec} - B^{mec} C^2$$

$$W^2 \frac{dC^2}{dt} = F^{mec} (C_F^{mec} - C^2) + S^2 C^2 \quad (2.108)$$

Balance de Energía en la columna de líquido hirviente:

$$\frac{dW^2 h^2(T^2)}{dt} = F^{mec} h_F^{mec}(T^{F^{mec}}) - B^{mec} h^2(T^2) - S^2 H^2(T^2) + Q^2 + \phi^2 - L^2$$

h_F^{mec} : es la entalpía del flujo de solución alimentada al segundo efecto.

Aplicando la regla de la cadena:

$$W^2 \frac{dh^2(T^2)}{dt} + h^2(T^2) \frac{dW^2}{dt} = F^{mec} h_F^{mec}(T^{F^{mec}}) - B^{mec} h^2(T^2) - S^2 H^2(T^2) + Q^2 + \phi^2 - L^2$$

Reemplazando la ecuación 2.107 en la anterior:

$$W^2 \frac{dh^2(T^2)}{dt} + h^2(T^2) (F_F^{mec} - B^{mec} - S^2) = F^{mec} h_F^{mec}(T^{F^{mec}}) - B^{mec} h^2(T^2) - S^2 H^2(T^2) + Q^2 + \phi^2 - L^2$$

$$W^2 \frac{dh^2(T^2)}{dt} = F^{mec} (h_F^{mec}(T^{F^{mec}}) - h^2(T^2)) - S^2 (H^2(T^2) - h^2(T^2)) + Q^2 + \phi^2 - L^2 \quad (2.109)$$

Donde: ϕ^2 es el calor de solución y:

$$Q^2 = h_L^2 A_L^2 (T_w^2 - T^2) \quad (2.110)$$

Conexiones entre el segundo efecto y el condensador:

$$S^2 = S^{cr} \quad (2.111)$$

$$T^2 = T^{cr} \quad (2.112)$$

$$H^2(T^2) = H^{cr}(T^{cr}) \quad (2.113)$$

$$\rho_v^2(T^2) = \rho_s^{cr}(T^{cr}) \quad (2.114)$$

Para el condensador:

Para el Espacio de Vapor en el condensador:

Balance de Materia en la zona de vapor:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \frac{d\rho_s^{cr}(T^{cr})}{dt} = S^{cr} - S_c^{cr} \quad (2.115)$$

Se tiene en cuenta que el vapor producido ocupa el volumen del interior de los tubos del condensador (V_s^{cr}) y el volumen de la sección del evaporador libre de líquido (V_s^{ep}). En este caso: $V_s^{ep} = V_s^{e2}$.

Balance de Energía en la zona de vapor:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \frac{d\rho_s^{cr}(T^{cr}) H_s^{cr}(T^{cr})}{dt} = S^{cr} H_s^{cr}(T^{cr}) - S_c^{cr} h_c^{cr}(T^{cr}) - Q^{cr} - L_s^{cr}$$

Por la regla de la cadena obtenemos:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \left(\rho_s^{cr}(T^{cr}) \frac{dH_s^{cr}(T^{cr})}{dt} + H_s^{cr}(T^{cr}) \frac{d\rho_s^{cr}(T^{cr})}{dt} \right) = S^{cr} H_s^{cr}(T^{cr}) - S_c^{cr} h_c^{cr}(T^{cr}) - Q^{cr} - L_s^{cr}$$

Al reemplazar la ecuación 2.115 en la ecuación anterior, obtenemos:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \rho_s^{cr}(T^{cr}) \frac{dH_s^{cr}(T^{cr})}{dt} = S^{cr} (H_s^{cr}(T^{cr}) - h_c^{cr}(T^{cr})) - Q^{cr} - L_s^{cr} \quad (2.116)$$

Q^{cr} es el calor cedido por el vapor producido y se puede expresar como:

$$Q^{cr} = U^{cr} A^{cr} \Delta T^{cr} \quad (2.117)$$

Para la coraza del condensador:

Balance de Materia para el agua de enfriamiento:

$$F_{Agua}^e = F_{Agua}^s \quad (2.118)$$

Balance de Energía para el agua de enfriamiento:

$$F_{Agua}^e h_{Agua}^e(T^e) + Q_L^{cr} = F_{Agua}^s h_{Agua}^s(T^s) \quad (2.119)$$

2.3.3. Modelo de Evaporación de agua

A continuación se presenta una explicación del modelo de evaporación de agua en múltiples efectos con alimentación en contracorriente.

Para el Vapor en la Calandria (1° Efecto):

La temperatura en este subsistema se denota con T_S .

- Se toma la ecuación diferencial 2.90, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de P y T ; sin embargo, al tratarse de vapor saturado, se tiene que la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
- Se toma la ecuación diferencial 2.91 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de la presión y la temperatura; sin embargo, como se trata de vapor saturado, la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
 - c. La entalpía del agua líquida $h_c(T_S)$, producto de la condensación del vapor vivo de caldera se calcula con la ecuación 2.21, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37.

- d. La entalpía del vapor vivo de caldera ($H_s(T_S)$), se calcula con la ecuación 2.22, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37 y de la entalpía de vaporización (λ_v), parámetro que se calcula con la ecuación 2.26.
- e. Q_s^1 se calcula con la ecuación 2.92, en esta ecuación se requiere la temperatura de la pared de la calandria T_w^1 , el área de transferencia en el lado de vapor: $A_{vc} = 1,2795\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.5) y el coeficiente convectivo (h_v^1). Para calcular h_v^1 , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere $T_x = T_S$; el valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): $T_K = T_w^1$; el valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3) y el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T_S + T_w^1}{2}$.
- f. Se asume que la pérdida de calor L_s^1 es igual a cero gracias al aislamiento del equipo con lana de vidrio.

Para las paredes de los tubos de la Calandria (1° Efecto):

En este subsistema la temperatura de las paredes se denota como T_w^1 .

- Se aplica la ecuación diferencial 2.93, teniendo en cuenta:
 - a. La masa de los tubos, calculada en la sección B.1.7 es: $W_w^1 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$.
 - b. El área de transferencia en el lado de vapor y en el lado del líquido, calculadas en las secciones B.1.5 y B.1.6 respectivamente son: $A_{vc} = 1,2795\text{m}^2$ y $A_L = 1,04057\text{m}^2$.
 - c. Es necesario calcular el coeficiente convectivo del vapor condensante (h_v^1) mediante la ecuación 2.27. Para calcular h_v^1 se requiere:
 - 1) La temperatura de la película de las paredes de los tubos de la calandria (T_w^1).
 - 2) El valor de T_s que es igual a la temperatura del vapor en el subsistema (T_S).
 - 3) El valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3).
 - 4) El cálculo de los siguientes parámetros: λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T_S + T_w^1}{2}$.
 - d. También es necesario calcular h_L^1 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^1$, $T_L = T^1$, presión P^1 y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_K y C_{pL} , los cuales se

calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^1 y a la presión P^1 .

Para la Columna de Líquido (°1 Efecto):

- Se aplica la ecuación diferencial 2.94, en la cual W^1 es la masa de líquido contenida en el evaporador.
- No se tiene en cuenta la ecuación 2.95, debido a que la concentración de soluto es igual a cero.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.96, teniendo en cuenta:
 - a. La entalpía de la columna de líquido ($h^1(T^1)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación 2.37 evaluada en T^1 (temperatura de la columna de líquido).
 - b. La entalpía de la alimentación ($h^{mec}(T^2)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación 2.37 evaluada en T^2 (temperatura del líquido proveniente del segundo evaporador).
 - c. La entalpía del vapor producido ($H^1(T^1)$) se calcula con la ecuación 2.22, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación 2.37 evaluada en T^1 (temperatura de la columna de líquido), y del parámetro λ_v , que se calcula con la ecuación 2.26 evaluada en T^1 .
 - d. Q^1 se calcula con la ecuación 2.97, en la cual se requiere:
 - 1) El área de transferencia de calor: $A_L^1 = 1,04057\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.6).
 - 2) El cálculo de h_L^1 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^1$, $T_L = T^1$, presión P^1 , y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_{H_2O} y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^1 y a la presión P^1 .
 - e. El calor de solución ϕ^1 es igual a cero debido a la ausencia de soluto.
 - f. se asume que la pérdida de calor L^1 es igual a cero, gracias al aislamiento de lana de vidrio.

Para el vapor en la calandria (2° Efecto):

La temperatura en este subsistema se denota con T^{ca2} . Deben tenerse en cuenta las conexiones entre el primer y el segundo efecto: 2.98, 2.99 y 2.100.

- Se toma la ecuación diferencial 2.104, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de P y T ; sin embargo, al tratarse de vapor saturado, se tiene que la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
- Se toma la ecuación diferencial 2.105 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
- a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de la presión y la temperatura; sin embargo, como se trata de vapor saturado, la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
 - c. La entalpía del agua líquida $h_c^{ca2}(T^{ca2})$, producto de la condensación del vapor vivo de caldera se calcula con la ecuación 2.21, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37.
 - d. La entalpía del vapor vivo de caldera ($H^{ca2}(T^{ca2})$), se calcula con la ecuación 2.22, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37 y de la entalpía de vaporización (λ_v), parámetro que se calcula con la ecuación 2.26.
 - e. Q_s^2 se calcula con la ecuación 2.74, en esta ecuación se requiere la temperatura de la pared de la calandria T_w^2 , el área de transferencia en el lado de vapor: $A_{vc}^2 = 1,2795m^2$ (Tomada de la sección B.1.5) y el coeficiente convectivo (h_v^2). Para calcular h_v^2 , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere $T_x = T^{ca2}$; el valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): $T_K = T_w^2$; el valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350mm = 0,35m$ (de la sección B.1.3) y el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T^{ca2} + T_w^2}{2}$.
 - f. Se asume que la pérdida de calor L_s^2 es igual a cero gracias al aislamiento del equipo con lana de vidrio.
 - g. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e1}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e1} = V_T^1 - \frac{W^1}{\rho_L^1} = 0,117205m^3 - \frac{W^1}{\rho_L^1}$.

Para las paredes de los tubos de la calandria (°2 Efecto):

En este subsistema la temperatura de las paredes se denota como T_w^2 .

- Se aplica la ecuación diferencial 2.106, teniendo en cuenta:
 - a. La masa de los tubos, calculada en la sección B.1.7 es: $W_w^2 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$.
 - b. El área de transferencia en el lado de vapor y en el lado del líquido, calculadas en las secciones B.1.5 y B.1.6 respectivamente son: $A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2$ y $A_L = 1,04057\text{m}^2$.
 - c. Es necesario calcular el coeficiente convectivo del vapor condensante (h_v^2) mediante la ecuación 2.27. Para calcular h_v^2 se requiere:
 - 1) La temperatura de la película de las paredes de los tubos de la calandria (T_w^2).
 - 2) El valor de T_s que es igual a la temperatura del vapor en el subsistema (T^{ca2}).
 - 3) El valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3).
 - 4) El cálculo de los siguientes parámetros: λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T^{ca2} + T_w^2}{2}$.
 - d. También es necesario calcular h_L^2 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^2$, $T_L = T^2$, presión P^2 y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_K y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^2 y a la presión P^2 .

Para la Columna de Líquido (°2 Efecto):

En este subsistema la temperatura se denota como T^2 . Deben tenerse en cuenta las conexiones entre efectos: 2.101, 2.102 y 2.103.

- Se aplica la ecuación diferencial 2.107, en la cual W^2 es la masa de líquido contenida en el evaporador.
- No se tiene en cuenta la ecuación 2.108, debido a que la concentración de soluto es igual a cero.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.109, teniendo en cuenta:
 - a. La entalpía de la columna de líquido ($h^2(T^2)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación 2.37 evaluada en T^2 (temperatura de la columna de líquido).

- b. La entalpía de la alimentación al segundo efecto ($h_F^{mec}(T^{F^{mec}})$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación 2.37 evaluada en $T^{F^{mec}}$ (temperatura de la alimentación).
- c. La entalpía del vapor producido ($H^2(T^2)$) se calcula con la ecuación 2.22, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación 2.37 evaluada en T^2 (temperatura de la columna de líquido), y del parámetro λ_v , que se calcula con la ecuación 2.26 evaluada en T^2 .
- d. Q^2 se calcula con la ecuación 2.110, en la cual se requiere:
 - 1) El área de transferencia de calor: $A_L^2 = 1,04057\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.6).
 - 2) El cálculo de h_L^2 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^2$, $T_L = T^2$, presión P^2 , y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_{H_2O} y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^2 y a la presión P^2 .
- e. El calor de solución ϕ^2 es igual a cero debido a la ausencia de soluto.
- f. se asume que la pérdida de calor L^2 es igual a cero, gracias al aislamiento de lana de vidrio.

Para el vapor en el condensador:

Se deben tener en cuenta las conexiones entre unidades: 2.111, 2.112, 2.113 y 2.114.

- Se aplica la ecuación diferencial 2.115, considerando los siguientes aspectos:
 - a. El Volumen que ocupa el vapor en los tubos del condensador es: $V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$ (tomado de la sección B.2.3).
 - b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (2º Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e2}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}$.
 - c. La densidad del vapor producido ρ_s^{cr} se calcula con la ecuación 2.23 evaluada en $T = T_s^{cr}$ y debido a que el vapor se encuentra saturado, la presión corresponde a la presión de saturación a T_s^{cr} y se calcula con la correlación 2.20.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.116 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en en los tubos del condensador es: $V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$ (tomado de la sección B.2.3).

- b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e2}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}$.
- c. La densidad del vapor producido ρ_s^{cr} se calcula con la ecuación 2.23 evaluada en $T = T_s^{cr}$ y debido a que el vapor se encuentra saturado, la presión corresponde a la presión de saturación a $T = T_s^{cr}$ y se calcula con la correlación 2.20.
- d. La entalpía del condensado $h_c^{cr}(T^{cr})$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^{cr} referida al parámetro C_p .
- e. Q^{cr} se calcula mediante la ecuación 2.117, la cual requiere a su vez del área de transferencia de calor (A^{cr}), de la diferencia de temperatura promedio (ΔT^{cr}) y del coeficiente global de transferencia de calor (U^{cr}).

El área de transferencia de calor, calculada en la sección B.2.4 con la ecuación 2.31 es:

$$A^{cr} = 0,885422\text{m}^2.$$

ΔT^{cr} se calcula con la ecuación 2.29.

U^{cr} se calcula con la ecuación 2.30, la cual requiere de los parámetros s_w , k_w , h_v^{cr} y h_L^{cr} .

De la sección B.2: $s_w = 0,0046228\text{m}$ y $k = 26\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$.

Para calcular h_v^{cr} , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere:

- 1) El valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): ($T_K = T_w^{cr}$).
- 2) El valor de la longitud de los tubos es: $H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$ (de la sección B.2).
- 3) Se requiere también el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, los cuales se evalúan a la temperatura media de la película $T = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$.

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

- 1) La evaluación de los parámetros C_p , η y k para el agua a la temperatura media de entrada y salida de esta: $\frac{T_{Agua}^e + T_{Agua}^s}{2}$, aplicando las ecuaciones 2.37, 2.38 y 2.39 para cada parámetro respectivamente.
- 2) El diámetro equivalente de la coraza, calculado en la sección B.2 con la ecuación 2.139 es: $D_{eq} = 0,022771\text{m}^2$.
- 3) El área transversal al flujo, calculada en la sección B.2 con la ecuación 2.140 es $a_s = 0,006947\text{m}^2$.
- 4) El cálculo de Re con la ecuación 2.141.
- 5) El cálculo de j_H con la ecuación 2.138.

- f. Se asume que que todo el calor perdido por el vapor es recibido por el flujo de agua que circula por la coraza debido a que el vapor fluye por los tubos; esto implica que se asume que la pérdida de calor L_s^{cr} es igual a cero.

Para la coraza del condensador:

- Se aplica la ecuación 2.118, en la cual se asume que no hay acumulación.
- Se aplica la ecuación 2.119, teniendo en cuenta la ecuación 2.118 y el siguiente proceso:
 - a. La entalpía del condensado $h_{Agua}^e(T^e)$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^e referida al parámetro C_p .
 - b. La entalpía del condensado $h_{Agua}^s(T^s)$ se calcula mediante la ecuación 2.21, la cual requiere de la correlación 2.37 evaluada en T^s referida al parámetro C_p .
 - c. Para calcular el calor que cede el vapor al agua de enfriamiento (Q^{cr}):
 Q^{cr} se calcula mediante la ecuación 2.117, la cual requiere a su vez del área de transferencia de calor (A^{cr}), de la diferencia de temperatura promedio (ΔT^{cr}) y del coeficiente global de transferencia de calor (U^{cr}).

El área de transferencia de calor, calculada en la sección B.2.4 con la ecuación 2.31 es:

$$A^{cr} = 0,885422\text{m}^2.$$

ΔT^{cr} se calcula con la ecuación 2.29.

U^{cr} se calcula con la ecuación 2.30, la cual requiere de los parámetros s_w , k_w , h_v^{cr} y h_L^{cr} .

De la sección B.2: $s_w = 0,0046228\text{m}$ y $k = 26\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$.

Para calcular h_v^{cr} , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere:

- 1) El valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado), que es igual a la temperatura de las paredes de los tubos del condensador ($T_K = T_w^{cr}$).
- 2) El valor de la longitud de los tubos es: $H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$ (de la sección B.2).
- 3) Se requiere también el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, los cuales se evalúan a la temperatura media de la película $T = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$.

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

- 1) La evaluación de los parámetros C_p , η y k para el agua a la temperatura media de entrada y salida de esta: $\frac{T_{Agua}^e + T_{Agua}^s}{2}$, aplicando las ecuaciones 2.37, 2.38 y 2.39 para cada parámetro respectivamente.
- 2) El diámetro equivalente de la coraza, calculado en la sección B.2 con la ecuación 2.139 es: $D_{eq} = 0,022771\text{m}^2$.

- 3) El área transversal al flujo, calculada en la sección B.2 con la ecuación 2.140 es $a_s = 0,006947\text{m}^2$.
- 4) El cálculo de Re con la ecuación 2.141.
- 5) El cálculo de j_H con la ecuación 2.138.

Conjunto de Ecuaciones 3

Evaporación de Agua en 2 Efectos con Alimentación en Contracorriente

Para el vapor en la Calandria (1° Efecto):

- Ecuación diferencial 2.90:

$$V_s^1 \frac{d\rho_s(T_s)}{dt} = S - S_c$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_s^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) \text{m}^3 = 2,2487E - 2\text{m}^3$$

- b. Para la densidad del vapor ($\rho_s(T_s)$):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_s}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_s}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_S}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3\Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_s = 1/v_S$$

$$P_S = \frac{RT_S(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

P_S es la presión del vapor vivo de caldera en la calandria del primer efecto.

- Ecuación diferencial 2.91:

$$V_s^1 \rho_s(T_S) \frac{dH_s(T_S)}{dt} = S_c(H_s(T_S) - h_c(T_S)) - Q_s^1 - L_s^1$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$$

- b. Las ecuaciones necesarias para calcular la densidad del vapor ($\rho_s(T_S)$) fueron mostradas con la ecuación 2.90.
- c. Para la entalpía del condensado $h_c(T_S)$:

$$h_c(T_S) = \int_{T_0}^{T_S} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

d. Para la entalpía del vapor vivo de caldera $H_s(T_S)$:

$$H_s(T_S) = \int_{T_0}^{T_S} C_p(T) dT + \lambda_v(T_S)$$

La expresión para calcular la capacidad calorífica ($C_p(T)$) es la misma que se utiliza para calcular la entalpía del condensado ($h_c(T_S)$).

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T_S)$

$$\lambda_v(T_S) = (v_S - v_L) T_S \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.90.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_S}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Para hallar la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), se deriva la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) y se evalúa en T_S :

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

e. Para el calor cedido por el vapor vivo de caldera Q_s^1 :

$$Q_s^1 = h_v^1 A_{vc}^1 (T_S - T_w^1)$$

Área de transferencia de calor en la zona del vapor condensante:

$$A_{vc} = 1,2795\text{m}^2.$$

Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^1 :

$$h_v^1 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^1) \cdot \rho_K^2(T_m^1) \cdot k_K^3(T_m^1) \cdot g}{\eta_K(T_m^1) \cdot H \cdot (T_S - T_w^1)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^1 = \frac{T_S + T_w^1}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^1)$:

$$\lambda_v(T_m^1) = (v_S - v_L) T_m^1 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

La ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) tiene dos funciones en este caso:

- El cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), a partir de la correlación 2.20 (correlación tomada de [18]), evaluada en T_m^1 (reemplazar T por T_m^1):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln \left(\frac{P_v}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

- El cálculo de la presión de saturación a la temperatura T_m^1 (denotada como P_m^1), para reemplazar posteriormente estas dos variables en la correlación 2.23 (de Wang y Chen [22]).

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_m^1}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 \text{ K}$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L} / \text{gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c}\right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right)^2 + 5,2614\sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3\Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c}F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P_m^1 = \frac{RT_m^1(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_K(T_m^1)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^1) = v_K$$

Para $k_K(T_m^1)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^1) = A + BT_m^1 + C(T_m^1)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en W/(m · K) y T en K.

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

Para $\eta_K(T_m^1)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^1} + CT_m^1 + D(T_m^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

f. Pérdidas de calor:

$$L_s^1 = 0$$

Para las paredes de los tubos de la calandria (1° Efecto):

■ Se aplica la ecuación diferencial 2.93:

$$W_w^1 C_{pw}^1 \frac{dT_w^1}{dt} = Q_s^1 - Q^1 = h_v^1 A_{vc}^1 (T_s - T_w^1) - h_L^1 A_L^1 (T_w^1 - T^1)$$

a. La masa de los tubos calculada en la sección B.1.7:

$$W_w^1 = 3,0022E - 3 \text{ m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2 \text{ kg}$$

b. Área de transferencia en el lado de vapor:

$$A_{vc}^1 = 1,2795 \text{ m}^2$$

c. Área de transferencia en el lado del líquido:

$$A_L^1 = 1,04057\text{m}^2.$$

d. Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^1 :

$$h_v^1 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^1) \cdot \rho_K^2(T_m^1) \cdot k_K^3(T_m^1) \cdot g}{\eta_K(T_m^1) \cdot H \cdot (T_S - T_w^1)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^1 = \frac{T_S + T_w^1}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^1)$:

$$\lambda_v(T_m^1) = (v_S - v_L) T_m^1 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

La ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) tiene dos funciones en este caso:

- El cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), a partir de la correlación 2.20 (correlación tomada de [18]), evaluada en T_m^1 (reemplazar T por T_m^1):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

- El cálculo de la presión de saturación a la temperatura T_m^1 (denotada como P_m^1), para reemplazar posteriormente estas dos variables en la correlación 2.23 (de Wang y Chen [22]).

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_m^1}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2 \Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1 \Omega_{bc} \Omega_{cc}}{k_2 \Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac} R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc} R T_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc} R T_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P_m^1 = \frac{RT_m^1(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_K(T_m^1)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^1) = v_K$$

Para $k_K(T_m^1)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^1) = A + BT_m^1 + C(T_m^1)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^1)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^1} + CT_m^1 + D(T_m^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K.

$$\begin{aligned} A &= -24,71 \\ B &= 4209 \\ C &= 0,04527 \\ D &= -3,376E - 05 \end{aligned}$$

e. Para calcular h_L^1 :

$$\frac{h_L^1 \cdot \sigma_L(T^1)}{k_L(T^1) \cdot P^1} = c \cdot \frac{(T_w^1 - T^1) \cdot C_{pL}(T^1)}{\lambda_v(T^1)} \left(\frac{\rho_L(T^1)}{10^3 \rho_v(T^1)} \right)^{0,5} \left(\frac{\eta_{H_2O}(T^1)}{\eta_L(T^1)} \right)^{0,25}$$

P^1 es la presión en el primer efecto.

T_{w^1} Temperatura de la pared de los tubos de la calandria del primer efecto.

Para $\sigma_L(T^1)$ (tensión superficial del líquido):

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$\chi = 0,0236$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$Q_p = 0,156 + 0,365\omega_w - 1,754\chi - 13,57\chi^2 - 0,506\omega_w^2 + 1,287\omega_w\chi$$

$$m = 1,21 + 0,5385\omega_w - 14,61\chi - 32,07\chi^2 - 1,656\omega_w^2 + 22,03\omega_w\chi$$

Ecuación de Van der Waals transformada por Hakim et al.:

$$\sigma_L = P_c^{2/3} T_c^{1/3} \left(\frac{1 - T_R}{0,4} \right)^m \frac{Q_p}{1000}$$

P_c en bar y σ en N/m.

Para $k_L(T^1)$ (conductividad térmica del líquido):

$$k_L(T^1) = A + BT^1 + C(T^1)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_L en $W/(m \cdot K)$ y T en K.

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

Para $\lambda_v(T^1)$ (Calor latente de vaporización):

$$\lambda_v(T^1) = (v_S - v_L)T^1 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3K$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$T^r = 373,15K$$

$$v^r = 0,0010437m^3/kg$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

Con la ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) se lleva a cabo el cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T) evaluada en T^1 (reemplazar T por T^1):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 \text{ K}$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c}\right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b}\right)^2 + 5,2614\sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3\Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c}F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P^1 = \frac{RT^1(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_L(T^1)$ (densidad del líquido):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_L(T^1) = v_K$$

Para el factor c:

$$V_L^1 = \frac{W^1}{\rho_L(T^1)}$$

Para $0,217\text{m} \leq y^1 \leq 0,567\text{m}$:

$$y_p^1 = \frac{y^1 - 0,217}{0,567 - 0,217} \cdot 100 \%$$

Para $0\text{m} \leq y^1 \leq 0,217\text{m}$:

$$y_p^1 = 0 \%$$

Para $0,567\text{m} \leq y^1 \leq 1,502\text{m}$:

$$y_p^1 = 100 \%$$

$$c = 0,24 + \frac{0,37 - 0,24}{40 - 75} (y_p^1 - 75)$$

Sección	Rango de Nivel (m) y^1	Correlación de cálculo del volumen (m ³)
7	0-0.126	$V_L^1 = \pi(0,00006241y^1 + \frac{1}{2}0,01782(y^1)^2 + \frac{1}{3}1,2724(y^1)^3)$
6	0.126-0.217	$V_L^1 = 0,003135 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^1 - 0,126)$
5	0.217-0.567	$V_L^1 = 0,009565 + \frac{\pi}{4} [(3,068 \cdot 0,0254)^2 + 60(0,493 \cdot 0,0254)^2] (y^1 - 0,217)$
4	0.567-0.616	$V_L^1 = 0,013815 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^1 - 0,567)$
3	0.616-0.716	$V_L^1 = 0,017275 + \pi[0,0225(y^1 - 0,616) + \frac{1}{2}0,15(y^1 - 0,616)^2 + \frac{1}{3}0,25(y^1 - 0,616)^3]$
2	0.716-1.366	$V_L^1 = 0,026975 + \frac{\pi}{4}(0,4)^2(y^1 - 0,716)$
1	1.366-1.502	$V_L^1 = 0,10866 - 4 \cdot 0,07353\pi (\frac{1}{2}(y^1 - 1,366)^2 - 0,136(y^1 - 1,366))$

Para $\rho_v(T^1)$ (densidad del vapor en equilibrio con el líquido):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln \left(\frac{P^1}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^1}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1 k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2 \Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1 \Omega_{bc} \Omega_{cc}}{k_2 \Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac} R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc} R T_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc} R T_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_v^1 = 1/v_v^1$$

$$P^1 = \frac{RT^1(1 + k_1 b/v_v^1)}{v_v^1 - k_2 b} - \frac{a}{v_v^1(v_v^1 + c)}$$

Para $\eta_L(T^1)$ (viscosidad dinámica del líquido):

$$\ln \eta_L = A + \frac{B}{T^1} + CT^1 + D(T^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para $\eta_{H_2O}(T^1)$ (viscosidad dinámica del agua):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T^1} + CT^1 + D(T^1)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para la capacidad calorífica ($C_{pL}(T^1)$):

$$C_{pL}(T^1) = A + BT^1 + C(T^1)^2 + D(T^1)^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

Para la Columna de Líquido (°1 Efecto):

- Ecuación diferencial 2.94:

$$\frac{dW^1}{dt} = B^{mec} - B^1 - S^1$$

- Ecuación diferencial 2.96:

$$W^1 \frac{dh^1(T^1)}{dt} = B^{mec}(h^{mec}(T^2) - h^1(T^1)) - S^1(H^1(T^1) - h^1(T^1)) + Q_s^1 + \phi^1 - L^1$$

- Para la entalpía de la columna de líquido ($h^1(T^1)$):

$$h^1(T^1) = \int_{T_0}^{T^1} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

- b. Para la entalpía del líquido que alimenta al primer evaporador (en esta configuración) y proviene del segundo evaporador ($h^{mec}(T^2)$)

$$h^{mec}(T^2) = \int_{T_0}^{T^{mec}} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

- c. Para la entalpía del vapor producido ($H^1(T^1)$):

$$H^1(T^1) = \int_{T_0}^{T^1} C_p(T) dT + \lambda_v(T^2)$$

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T_S)$

Ecuación 2.26.

- d. Para Q^1 :

$$Q^1 = h_L^1 A_L^1 (T_w^1 - T^1)$$

Donde:

- 1) El área de transferencia de calor: $A_L^1 = 1,04057\text{m}^2$
 - 2) El procedimiento de cálculo de h_L^1 mediante la correlación 2.28, se presentó en el conjunto de ecuaciones de *las Paredes de los Tubos de la Calandria (1° Efecto)*.
- e. $\phi^1 = 0$
- f. $L^1 = 0$

Para el vapor en la Calandria (2° Efecto):

Conexiones entre el primer y el segundo efecto (2.98, 2.99 y 2.100):

$$S^1 = S^{ca2}$$

$$H^1 = H^{ca2}$$

$$T^1 = T^{ca2}$$

- Ecuación diferencial 2.104:

$$(V_s^{ep} + V_s^2) \frac{d\rho_s^{ca2}(T^{ca2})}{dt} = S^{ca2} - S_c^{ca2}$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$$

- b. Para la densidad del vapor ($\rho_s^{ca2}(T^{ca2})$):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$\ln\left(\frac{P^{ca2}}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T^{ca2}}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 K$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T^{ca2}}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c}\right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604 e^{\omega_w} + 1,4554 M M \omega_w^{3,063} - 21,395 \alpha (\zeta_c - Z_c) - 4,0692 Z_c \alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1 k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 \zeta_c) \Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1 \zeta_c - 3k_2 \zeta_c + 3k_2 \zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2 \Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1 \Omega_{bc} \Omega_{cc}}{k_2 \Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac} R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc} R T_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc} R T_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_s^{ca2} = 1/v_S^{ca2}$$

$$P^{ca2} = \frac{RT^{ca2}(1 + k_1 b/v_S^{ca2})}{v_S^{ca2} - k_2 b} - \frac{a}{v_S^{ca2}(v_S^{ca2} + c)}$$

P^{ca2} es la presión del vapor vivo de caldera en la calandria del segundo efecto.

- Ecuación diferencial 2.105:

$$(V_s^{ep} + V_s^2) \rho_s^{ca2}(T^{ca2}) \frac{dH^{ca2}(T^{ca2})}{dt} = S_c^{ca2}(H^{ca2}(T^{ca2}) - h_c^{ca2}(T^{ca2})) - Q_s^2 - L_s^{ca2}$$

- a. Volumen ocupado por el vapor en la calandria:

$$V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4} \right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$$

- b. Las ecuaciones necesarias para calcular la densidad del vapor ($\rho_s^{ca2}(T^{ca2})$) fueron mostradas con la ecuación 2.104.
- c. Para la entalpía del condensado $h_c^{ca2}(T^{ca2})$:

$$h_c^{ca2}(T^{ca2}) = \int_{T_0}^{T^{ca2}} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

- d. Para la entalpía del vapor vivo de caldera $H^{ca2}(T^{ca2})$:

$$H^{ca2}(T^{ca2}) = \int_{T_0}^{T^{ca2}} C_p(T) dT + \lambda_v(T^{ca2})$$

La expresión para calcular la capacidad calorífica ($C_p(T)$) es la misma que se utiliza para calcular la entalpía del condensado ($h_c(T^{ca2})$).

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T^{ca2})$

: Ecuación 2.26.

- e. Para el calor cedido por el vapor vivo de caldera Q_s^2 :

$$Q_s^2 = h_v^2 A_{vc}^2 (T^{ca2} - T_w^2)$$

Área de transferencia de calor en la zona del vapor condensante:

$$A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2.$$

Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^2 :

$$h_v^2 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^2) \cdot \rho_K^2(T_m^2) \cdot k_K^3(T_m^2) \cdot g}{\eta_K(T_m^2) \cdot H \cdot (T_S - T_w^2)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^2 = \frac{T_c^2 + T_w^2}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^2)$:

$$\lambda_v(T_m^2) = (v_S - v_L) T_m^2 \frac{dP_v}{dT}$$

El cálculo de v_S se desarrolla dentro del conjunto de parámetros de la ecuación 2.2.

El cálculo del volumen molar del líquido saturado (v_L) se lleva a cabo aplicando la ecuación de Rackett (tomada de [18]):

Se aplica la ecuación 2.25:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$T^r = 373,15\text{K}$$

$$v^r = 0,0010437\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r (Z_{RA})^\phi$$

La ecuación 2.20 (correlación tomada de [18]) tiene dos funciones en este caso:

- El cálculo de la derivada de la presión de vapor (P_v) con respecto a la temperatura (T), a partir de la correlación 2.20 (correlación tomada de [18]), evaluada en T_m^2 (reemplazar T por T_m^2):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_v}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

- El cálculo de la presión de saturación a la temperatura T_m^1 (denotada como P_m^1), para reemplazar posteriormente estas dos variables en la correlación 2.23 (de Wang y Chen [22]).

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\ln\left(\frac{P_m^1}{P_c}\right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T_m^1}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

Aplicación de la ecuación 2.23:

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15\text{ K}$$

$$MM = 18\text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144\text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha \cdot T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$P_m^2 = \frac{RT_m^2(1 + k_1b/v_S)}{v_S - k_2b} - \frac{a}{v_S(v_S + c)}$$

Para $\rho_K(T_m^2)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^2) = v_K$$

Para $k_K(T_m^2)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^2) = A + BT_m^2 + C(T_m^2)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^2)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^2} + CT_m^2 + D(T_m^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

f. Pérdidas de calor:

$$L_s^2 = 0$$

g. Volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto):

$$V_s^{ep} = V_s^{e1}$$

$$V_s^{e1} = V_T^1 - \frac{W^1}{\rho_L^1} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^1}{\rho_L^1}.$$

Para las paredes de los tubos de la calandria del segundo efecto:

■ Se aplica la ecuación diferencial 2.65:

$$W_w^1 C_{pw}^1 \frac{dT_w^1}{dt} = Q_s^1 - Q^1 = h_v^1 A_{vc}^1 (T_s - T_w^1) - h_L^1 A_L^1 (T_w^1 - T^1)$$

a. La masa de los tubos calculada en la sección B.1.7:

$$W_w^2 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$$

b. Área de transferencia en el lado de vapor:

$$A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2$$

c. Área de transferencia en el lado del líquido:

$$A_L^2 = 1,04057\text{m}^2.$$

d. Para el coeficiente convectivo en la zona del vapor condensante del primer efecto h_v^2 :

$$h_v^2 = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^2) \cdot \rho_K^2(T_m^2) \cdot k_K^3(T_m^2) \cdot g}{\eta_K(T_m^2) \cdot H \cdot (T^{ca2} - T_w^2)}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

$$H = 0,350\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^2 = \frac{T^{ca2} + T_w^2}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^2)$:

Ecuación 2.26.

Para $\rho_K(T_m^2)$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^2}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^2) = v_K$$

Para $k_K(T_m^2)$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^2) = A + BT_m^2 + C(T_m^2)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^2)$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^2} + CT_m^2 + D(T_m^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K .

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

e. Para calcular h_L^2 :

$$\frac{h_L^2 \cdot \sigma_L(T^2)}{k_L(T^2) \cdot P^2} = c \cdot \frac{(T_w^2 - T^2) \cdot C_{pL}(T^2)}{\lambda_v(T^2)} \left(\frac{\rho_L(T^2)}{10^3 \rho_v(T^2)} \right)^{0,5} \left(\frac{\eta_{H_2O}(T^2)}{\eta_L(T^2)} \right)^{0,25}$$

P^2 es la presión en el segundo efecto.

T_w^2 Temperatura de la pared de los tubos de la calandria del segundo efecto.

Para $\sigma_L(T^2)$ (tensión superficial del líquido):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$\chi = 0,0236$$

$$T_R = \frac{T^2}{T_c}$$

$$Q_p = 0,156 + 0,365\omega_w - 1,754\chi - 13,57\chi^2 - 0,506\omega_w^2 + 1,287\omega_w\chi$$

$$m = 1,21 + 0,5385\omega_w - 14,61\chi - 32,07\chi^2 - 1,656\omega_w^2 + 22,03\omega_w\chi$$

Ecuación de Van der Waals transformada por Hakim et al.:

$$\sigma_L = P_c^{2/3} T_c^{1/3} \left(\frac{1 - T_R}{0,4} \right)^m \frac{Q_p}{1000}$$

P_c en bar y σ en N/m.

Para $k_L(T^2)$ (conductividad térmica del líquido):

$$k_L(T^2) = A + BT^2 + C(T^2)^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_L en W/(m · K) y T en K.

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

Para λ_v (Calor latente de vaporización):

Ecuación 2.26.

Para $\rho_L(T^2)$ (densidad del líquido):

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T^2}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_L = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_L(T^2) = v_K$$

Para el factor c:

$$V_L^2 = \frac{W^2}{\rho_L(T^2)}$$

Para $0,217\text{m} \leq y^2 \leq 0,567\text{m}$:

$$y_p^2 = \frac{y^2 - 0,217}{0,567 - 0,217} \cdot 100\%$$

Para $0\text{m} \leq y^2 \leq 0,217\text{m}$:

$$y_p^2 = 0\%$$

Para $0,567\text{m} \leq y^2 \leq 1,502\text{m}$:

$$y_p^2 = 100\%$$

$$c = 0,24 + \frac{0,37 - 0,24}{40 - 75}(y_p^2 - 75)$$

Sección	Rango de Nivel (m) y^2	Correlación de cálculo del volumen (m^3)
7	0-0.126	$V_L^2 = \pi(0,00006241y^1 + \frac{1}{2}0,01782(y^2)^2 + \frac{1}{3}1,2724(y^2)^3)$
6	0.126-0.217	$V_L^2 = 0,003135 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^2 - 0,126)$
5	0.217-0.567	$V_L^2 = 0,009565$ $+ \frac{\pi}{4} [(3,068 \cdot 0,0254)^2 + 60(0,493 \cdot 0,0254)^2] (y^2 - 0,217)$
4	0.567-0.616	$V_L^2 = 0,013815 + \frac{\pi}{4}(0,3)^2(y^2 - 0,567)$
3	0.616-0.716	$V_L^2 = 0,017275$ $+ \pi[0,0225(y^2 - 0,616)$ $+ \frac{1}{2}0,15(y^2 - 0,616)^2 + \frac{1}{3}0,25(y^2 - 0,616)^3]$
2	0.716-1.366	$V_L^2 = 0,026975 + \frac{\pi}{4}(0,4)^2(y^2 - 0,716)$
1	1.366-1.502	$V_L^2 = 0,10866$ $- 4 \cdot 0,07353\pi (\frac{1}{2}(y^2 - 1,366)^2 - 0,136(y^2 - 1,366))$

Para $\rho_v(T^2)$ (densidad del vapor en equilibrio con el líquido):

Primero es necesario calcular la presión del vapor saturado:

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$\ln \left(\frac{P^2}{P_c} \right) = \frac{1}{1-x} (A x + B x^{1,5} + C x^3 + D x^6)$$

$$x = 1 - \frac{T^2}{T_c}$$

$$A = -7,76451$$

$$B = 1,45838$$

$$C = -2,77580$$

$$D = -1,23303$$

$$C_1 = 0,28111$$

$$C_4 = 2,18987$$

$$C_3 = -2,03823$$

$$T_c = 647,3K$$

$$P_c = 221,2bar$$

$$Z_c = 0,284$$

$$T_b = 373,15 \text{ K}$$

$$MM = 18 \text{ g/gmol H}_2\text{O}$$

$$\omega_w = 0,344$$

$$R = 0,083144 \text{ bar}\cdot\text{L /gmol}\cdot\text{K}$$

$$T_R = \frac{T_c}{T_b}$$

$$M = \frac{MM \cdot \omega_w}{39,948}$$

$$\alpha = 1,0003 - 0,2719M + 3,7311M^2 - 1,0827M^3 + 0,1144M^4 - 4,1276E - 3M^5$$

$$\zeta_c = 0,2974 + 0,1123\omega_w - 0,9585\omega_w Z_c + 7,7731E - 4\omega_w MM \left(\frac{T_b}{T_c} \right)$$

$$C_2 = -1,4671 + 3,6889 \left(\frac{T_c}{\alpha T_b} \right) - 2,0005 \left(\frac{T_c}{\alpha T_b} \right)^2 + 5,2614 \sqrt{\omega_w \cdot Z_c}$$

$$C_5 = 7,9885 - 4,3604e^{\omega_w} + 1,4554MM\omega_w^{3,063} - 21,395\alpha(\zeta_c - Z_c) - 4,0692Z_c\alpha^{1,667}$$

$$F_1 = (1 + C_1(1 - \sqrt{T_R}) + C_2(1 - T_R))^2$$

$$F_2 = (1 + C_3(1 - T_R^{2/3}) + C_4(1 - T_R^{2/3})^2 + C_5(1 - T_R^{2/3})^3)^2$$

$$k_1 = 4,8319\alpha - 1,5515$$

$$k_2 = 1,8177 - 0,1778\alpha^{-1,3686}$$

$$k_2^3 \Omega_{bc}^3 + (2k_1k_2 + 2k_2^2 - 3k_2^2 - 3k_2^2\zeta_c)\Omega_{bc}^2 + (k_1 + k_2 - 3k_1\zeta_c - 3k_2\zeta_c + 3k_2\zeta_c^2) - 3\zeta_c = 0$$

Para la ecuación anterior se toma la mayor raíz real positiva del polinomio en Ω_{bc} .

$$\Omega_{cc} = 1 + k_2\Omega_{bc} - 3\zeta_c$$

$$\Omega_{ac} = \frac{\zeta_c^3 - k_1\Omega_{bc}\Omega_{cc}}{k_2\Omega_{bc}}$$

$$a = \frac{\Omega_{ac}R^2T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{\Omega_{bc}RT_c}{P_c} F_2$$

$$c = \frac{\Omega_{cc}RT_c}{P_c}$$

Ecuación Cúbica (Principal):

$$\rho_v^2 = 1/v_v^2$$

$$P^2 = \frac{RT^2(1 + k_1b/v_v^2)}{v_v^2 - k_2b} - \frac{a}{v_v^2(v_v^2 + c)}$$

Para $\eta_L(T^2)$ (viscosidad dinámica del líquido):

$$\ln \eta_L = A + \frac{B}{T^2} + CT^2 + D(T^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para $\eta_{H_2O}(T^2)$ (viscosidad dinámica del agua):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T^2} + CT^2 + D(T^2)^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C.

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para la capacidad calorífica ($C_{pL}(T^2)$):

$$C_{pL}(T^2) = A + BT^2 + C(T^2)^2 + D(T^2)^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

Para la Columna de Líquido (°2 Efecto):

- Ecuación diferencial 2.107:

$$\frac{dW^2}{dt} = F_F^{mec} - B^{mec} - S^2$$

- Ecuación diferencial 2.109:

$$W^2 \frac{dh^2(T^2)}{dt} = F^{mec} (h_F^{mec}(T^{F^{mec}}) - h^2(T^2)) - S^2 (H^2(T^2) - h^2(T^2)) + Q^2 + \phi^2 - L^2$$

- Para la entalpía de la columna de líquido ($h^2(T^2)$):

$$h^2(T^2) = \int_{T_0}^{T^2} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

- Para la entalpía de la alimentación al segundo efecto ($h_F^{mec}(T^{F^{mec}})$):

$$h_F^{mec}(T^{F^{mec}}) = \int_{T_0}^{T^{F^{mec}}} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

- Para la entalpía del vapor producido ($H^2(T^2)$):

$$H^2(T^2) = \int_{T_0}^{T^2} C_p(T) dT + \lambda_v(T^2)$$

Para el calor de vaporización $\lambda_v(T^2)$

Ecuación 2.26.

d. Para calcular Q^2 :

$$Q^2 = h_L^2 A_L^2 (T_w^2 - T^2)$$

Donde:

- 1) El área de transferencia de calor es: $A_L^2 = 1,04057\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.6).
- 2) El cálculo de h_L^2 se presentó en el conjunto de ecuaciones de *las Paredes de los Tubos de la Calandria (2º Efecto)*.

e. $\phi^2 = 0$

f. $L^2 = 0$

Para el vapor en el condensador:

Conexiones entre unidades:

$$S^2 = S^{cr}$$

$$T^2 = T^{cr}$$

$$H^2(T^2) = H^{cr}(T^{cr})$$

$$\rho_v^2(T^2) = \rho_s^{cr}(T^{cr})$$

- Se aplica la ecuación diferencial 2.115:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \frac{d\rho_s^{cr}(T_s^{cr})}{dt} = S^{cr} - S_c^{cr}$$

a. El Volumen que ocupa el vapor en los tubos del condensador:

$$V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$$

b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1º Efecto):

$$V_s^{ep} = V_s^{e2}$$

$$V_s^{e2} = V_T^2 - \frac{W^2}{\rho_L^2} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^2}{\rho_L^2}.$$

c. Para $\rho_s^2(T^2)$:

$$\rho_v^2(T^2) = \rho_s^{cr}(T_s^{cr})$$

- Ecuación diferencial 2.116:

$$(V_s^{ep} + V_s^{cr}) \rho_s^{cr}(T_s^{cr}) \frac{dH_s^{cr}(T_s^{cr})}{dt} = S^{cr} (H_s^{cr}(T_s^{cr}) - h_c^{cr}(T_s^{cr})) - Q^{cr} - L_s^{cr}$$

a. El Volumen que ocupa el vapor en los tubos del condensador:

$$V_s^{cr} = 2,979E - 3\text{m}^3$$

b. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1º Efecto):

$$V_s^{ep} = V_s^{e1}$$

$$V_s^{e1} = V_T^1 - \frac{W^1}{\rho_L^1} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^1}{\rho_L^1}.$$

c. Para $\rho_s^1(T^1)$:

$$\rho_v^1(T^1) = \rho_s^{cr}(T_s^{cr})$$

d. Para la entalpía del condensado $h_c^{cr}(T^{cr})$:

$$h_c^{cr}(T^{cr}) = \int_{T_0}^{T^{cr}} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15\text{K}$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

e. Para calcular Q^{cr} :

$$Q^{cr} = U^{cr} A^{cr} \Delta T^{cr}$$

El área de transferencia de calor:

$$A^{cr} = 0,885422\text{m}^2$$

$$\Delta T^{cr} = LMTD = \frac{T_{Agua}^s - T_{Agua}^e}{\ln \left[\frac{T^{cr} - T_{Agua}^e}{T^{cr} - T_{Agua}^s} \right]}$$

$$\frac{1}{U^{cr}} = \frac{1}{h_v^{cr}} + \frac{s_w}{k_w} + \frac{1}{h_L^{cr}}$$

$$s_w = 0,0046228\text{m}$$

$$k_w = 26\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F}$$

Para calcular h_v^{cr} :

$$T_m^{cr} = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$$

$$h_v^{cr} = K \sqrt[4]{\frac{\lambda_v(T_m^{cr}) \cdot \rho_K^2(T_m^{cr}) \cdot k_K^3(T_m^{cr}) \cdot g}{\eta_K(T_m^{cr}) \cdot H \cdot (T^{cr} - T_w^{cr})}}$$

Donde:

$$K = 0,943$$

El valor de la longitud de los tubos es:

$$H = 1000\text{mm} = 1\text{m}$$

Los parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K son evaluados a la temperatura media de la película:

$$T_m^{cr} = \frac{T^{cr} + T_w^{cr}}{2}$$

Para $\lambda_v(T_m^{cr})$:

Ecuación 2.26.

Para $\rho_K(T_m^{cr})$:

$$T_c = 647,3\text{K}$$

$$P_c = 221,2\text{bar}$$

$$T_R = \frac{T_m^{cr}}{T_c}$$

$$T^r = 212^\circ\text{F}$$

$$v^r = 0,016719\text{ft}^3/\text{lb}$$

$$T_R^r = \frac{T^r}{T_c}$$

$$Z_{RA} = 0,2338.$$

$$\phi = (1 - T_R)^{2/7} - (1 - T_R^r)^{2/7}$$

$$v_K = v^r Z_{RA}^\phi$$

$$\rho_K(T_m^{cr}) = v_K$$

Para $k_K(T_m^{cr})$ (conductividad térmica del agua líquida):

$$k_K(T_m^{cr}) = A + BT_m^{cr} + C(T_m^{cr})^2$$

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

k_K en $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ y T en K .

Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K .

Para $\eta_K(T_m^{cr})$ (viscosidad dinámica de la película de condensado):

$$\ln \eta_K = A + \frac{B}{T_m^{cr}} + CT_m^{cr} + D(T_m^{cr})^2$$

Para temperaturas entre 0°C y 370°C .

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

Para calcular h_L^{cr} se aplica la ecuación 2.32, que requiere:

$$h_L^{cr} = j_H \frac{k}{D_{eq}} \left(\frac{C_p \eta}{k} \right)^{1/3}$$

$$j_H = 10^{0,5066 \log(Re) - 0,2265}$$

Diámetro equivalente de la coraza:

$$D_{eq} = 0,022771 \text{m}^2$$

Área transversal al flujo:

$$a_s = 0,006947 \text{m}^2$$

$$Re = \frac{F_{Agua}^e}{a_s} \cdot \frac{D_{eq}}{\eta}$$

$$T_{m-Agua} = \frac{T_{Agua}^e + T_{Agua}^s}{2}$$

$$C_p = A + BT_{m-Agua} + CT_{m-Agua}^2 + DT_{m-Agua}^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K. Tomada de la tabla 6 de [26].

$$\ln \eta = A + \frac{B}{T_{m-Agua}} + CT_{m-Agua} + DT_{m-Agua}^2$$

Con η en cP y T en K.

$$A = -24,71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0,04527$$

$$D = -3,376E - 05$$

$$k = A + BT_{m-Agua} + CT_{m-Agua}^2$$

k en W/(m · K) y T en K. Válida para intervalos de temperatura de 273K a 623K.

$$A = -3,838E - 1$$

$$B = 5,254E - 3$$

$$C = -6,369E - 6$$

f. $L_s^{cr} = 0$

Para la coraza del condensador:

- Ecuación 2.118:

$$F_{Agua}^e = F_{Agua}^s$$

- Ecuación 2.119:

$$F_{Agua}^e h_{Agua}^e(T^e) + Q^{cr} = F_{Agua}^s h_{Agua}^s(T^s)$$

- a. Para la entalpía del agua a la entrada:

$$h_{Agua}^e(T^e) = \int_{T_0}^{T^e} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

Para la capacidad calorífica:

$$C_p(T) = A + BT + CT^2 + DT^3$$

$$A = 18,2964$$

$$B = 4,72118E - 1$$

$$C = -1,33878E - 3$$

$$D = 1,31424E - 6$$

C_p en J/(gmol · K) y T en K

- b. Para la entalpía del agua a la salida:

$$h_{Agua}^s(T^s) = \int_{T_0}^{T^s} C_p(T) dT$$

Donde: T se da en K y $T_0 = 273,15K$.

La capacidad calorífica se muestra en el punto anterior.

- c. Las expresiones necesarias para el cálculo de Q^{cr} se presentan entre las ecuaciones de cálculo para *el Vapor en el Condensador*.

2.3.4. Modelo General de Evaporación de soluciones

A continuación se presenta una explicación del modelo de evaporación de soluciones en múltiples efectos con alimentación en contracorriente.

Para el Vapor en la Calandria (1° Efecto):

La temperatura en este subsistema se denota con T_S .

- Se toma la ecuación diferencial 2.90, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de P y T ; sin embargo, al tratarse de vapor saturado, se tiene que la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
- Se toma la ecuación diferencial 2.91 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^1 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de la presión y la temperatura; sin embargo, como se trata de vapor saturado, la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.

- c. La entalpía del agua líquida $h_c(T_S)$, producto de la condensación del vapor vivo de caldera se calcula con la ecuación 2.21, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37.
- d. La entalpía del vapor vivo de caldera ($H_s(T_S)$), se calcula con la ecuación 2.22, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37 y de la entalpía de vaporización (λ_v), parámetro que se calcula con la ecuación 2.26.
- e. Q_s^1 se calcula con la ecuación 2.92, en esta ecuación se requiere la temperatura de la pared de la calandria T_w^1 , el área de transferencia en el lado de vapor: $A_{vc} = 1,2795\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.5) y el coeficiente convectivo (h_v^1). Para calcular h_v^1 , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere $T_x = T_S$; el valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): $T_K = T_w^1$; el valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3) y el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T_S + T_w^1}{2}$.
- f. Se asume que la pérdida de calor L_s^1 es igual a cero gracias al aislamiento del equipo con lana de vidrio.

Para las paredes de los tubos de la Calandria (1° Efecto):

En este subsistema la temperatura de las paredes se denota como T_w^1 .

- Se aplica la ecuación diferencial 2.93, teniendo en cuenta:
 - a. La masa de los tubos, calculada en la sección B.1.7 es: $W_w^1 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$.
 - b. El área de transferencia en el lado de vapor y en el lado del líquido, calculadas en las secciones B.1.5 y B.1.6 respectivamente son: $A_{vc} = 1,2795\text{m}^2$ y $A_L = 1,04057\text{m}^2$.
 - c. Es necesario calcular el coeficiente convectivo del vapor condensante (h_v^1) mediante la ecuación 2.27. Para calcular h_v^1 se requiere:
 - 1) La temperatura de la película de las paredes de los tubos de la calandria (T_w^1).
 - 2) El valor de T_s que es igual a la temperatura del vapor en el subsistema (T_S).
 - 3) El valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3).

- 4) El cálculo de los siguientes parámetros: λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T_S + T_w^1}{2}$.
- d. También es necesario calcular h_L^1 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^1$, $T_L = T^1$, presión P^1 y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_K y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^1 y a la presión P^1 .

Para la Columna de Líquido (°1 Efecto):

- Se aplica la ecuación diferencial 2.94, en la cual W^1 es la masa de líquido contenida en el evaporador.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.95.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.96, teniendo en cuenta:
 - a. La entalpía de la columna de líquido ($h^1(T^1)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^1 (temperatura de la columna de líquido).
 - b. La entalpía de la alimentación ($h^{mec}(T^2)$) se calcula con la ecuación 2.21, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^2 (temperatura del líquido proveniente del segundo evaporador).
 - c. La entalpía del vapor producido ($H^1(T^1)$) se calcula con la ecuación 2.22, la cual requiere del parámetro C_p , que se calcula con la ecuación mostrada en la tabla 2.3 evaluada en T^1 (temperatura de la columna de líquido), y del parámetro λ_v , que se calcula con la ecuación 2.26 evaluada en T^1 .
 - d. Q^1 se calcula con la ecuación 2.97, en la cual se requiere:
 - 1) El área de transferencia de calor: $A_L^1 = 1,04057\text{m}^2$ (Tomada de la sección B.1.6).
 - 2) El cálculo de h_L^1 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^1$, $T_L = T^1$, presión P^1 , y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_{H_2O} y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones mostradas en la tabla 2.3, evaluadas a la temperatura T^1 y a la presión P^1 .
 - e. se asume que la pérdida de calor L^1 es igual a cero, gracias al aislamiento de lana de vidrio.

Para el vapor en la calandria (2° Efecto):

La temperatura en este subsistema se denota con T^{ca2} . Deben tenerse en cuenta las conexiones entre el primer y el segundo efecto: 2.98, 2.99 y 2.100.

- Se toma la ecuación diferencial 2.104, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de P y T ; sin embargo, al tratarse de vapor saturado, se tiene que la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
- Se toma la ecuación diferencial 2.105 teniendo en cuenta los siguientes aspectos:
 - a. El volumen ocupado por el vapor en la calandria se muestra en la sección B.1.4: $V_S^2 = 2,8631E - 2 \left(\frac{\pi}{4}\right) m^3 = 2,2487E - 2m^3$.
 - b. La densidad se calcula con la ecuación 2.23 (Teniendo $\rho = 1/v$), la cual es función de la presión y la temperatura; sin embargo, como se trata de vapor saturado, la presión es función de la temperatura y se calcula con la ecuación 2.20.
 - c. La entalpía del agua líquida $h_c^{ca2}(T^{ca2})$, producto de la condensación del vapor vivo de caldera se calcula con la ecuación 2.21, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37.
 - d. La entalpía del vapor vivo de caldera ($H^{ca2}(T^{ca2})$), se calcula con la ecuación 2.22, la cual a su vez está expresada en función de la capacidad calorífica (C_p) de la sustancia (agua líquida), parámetro que se calcula con la ecuación 2.37 y de la entalpía de vaporización (λ_v), parámetro que se calcula con la ecuación 2.26.
 - e. Q_s^2 se calcula con la ecuación 2.74, en esta ecuación se requiere la temperatura de la pared de la calandria T_w^2 , el área de transferencia en el lado de vapor: $A_{vc}^2 = 1,2795m^2$ (Tomada de la sección B.1.5) y el coeficiente convectivo (h_v^2). Para calcular h_v^2 , se aplica la ecuación 2.27, la cual requiere $T_x = T^{ca2}$; el valor de T_K (temperatura de la pared sobre la que se forma la película de condensado): $T_K = T_w^2$; el valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350mm = 0,35m$ (de la sección B.1.3) y el cálculo de los siguientes parámetros λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T^{ca2} + T_w^2}{2}$.
 - f. Se asume que la pérdida de calor L_s^2 es igual a cero gracias al aislamiento del equipo con lana de vidrio.

- g. El volumen que ocupa el vapor en el efecto precedente (1° Efecto) ($V_s^{ep} = V_s^{e1}$) depende de la cantidad de líquido retenido, es la diferencia entre el volumen total del evaporador (calculado en la sección 2.1.5) y el volumen de líquido retenido: $V_s^{e1} = V_T^1 - \frac{W^1}{\rho_L^1} = 0,117205\text{m}^3 - \frac{W^1}{\rho_L^1}$.

Para las paredes de los tubos de la calandria (°2 Efecto):

En este subsistema la temperatura de las paredes se denota como T_w^2 .

- Se aplica la ecuación diferencial 2.106, teniendo en cuenta:
 - a. La masa de los tubos, calculada en la sección B.1.7 es: $W_w^2 = 3,0022E - 3\text{m}^3 \cdot 7,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2,357E - 2\text{kg}$.
 - b. El área de transferencia en el lado de vapor y en el lado del líquido, calculadas en las secciones B.1.5 y B.1.6 respectivamente son: $A_{vc}^2 = 1,2795\text{m}^2$ y $A_L = 1,04057\text{m}^2$.
 - c. Es necesario calcular el coeficiente convectivo del vapor condensante (h_v^2) mediante la ecuación 2.27. Para calcular h_v^2 se requiere:
 - 1) La temperatura de la película de las paredes de los tubos de la calandria (T_w^2).
 - 2) El valor de T_s que es igual a la temperatura del vapor en el subsistema (T^{ca2}).
 - 3) El valor de la longitud de los tubos sobre los cuales ocurre la condensación: $H = 350\text{mm} = 0,35\text{m}$ (de la sección B.1.3).
 - 4) El cálculo de los siguientes parámetros: λ_v , ρ_K , k_K y η_K , los cuales se calculan utilizando las correlaciones 2.26, 2.25, 2.39 y 2.38 respectivamente, evaluados a la temperatura media de la película: $T = \frac{T^{ca2} + T_w^2}{2}$.
 - d. También es necesario calcular h_L^2 mediante la correlación 2.28, la cual requiere los datos de $T_w = T_w^2$, $T_L = T^2$, presión P^2 y los parámetros σ_L , ρ_L , ρ_v , k_L , η_K y C_{pL} , los cuales se calculan utilizando las correlaciones: 2.40, 2.25, 2.23, 2.39, 2.38 y 2.37 respectivamente, evaluadas a la temperatura T^2 y a la presión P^2 .

Para la Columna de Líquido (°2 Efecto):

En este subsistema la temperatura se denota como T^2 . Deben tenerse en cuenta las conexiones entre efectos: 2.101, 2.102 y 2.103.

- Se aplica la ecuación diferencial 2.107, en la cual W^2 es la masa de líquido contenida en el evaporador.
- Se aplica la ecuación 2.108.
- Se aplica la ecuación diferencial 2.109, teniendo en cuenta: