

REUTILIZACIÓN Y REDUCCIÓN DEL EFLUENTE LÍQUIDO PROVENIENTE DEL PROCESO POSTCOSECHA DE GYPSOPHILA

Salazar Fernando, Montenegro Lucía

Laboratorio de Transferencia de Calor, Departamento de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253, Quito, Ecuador. Teléfono: (005932)2507144 (ext.2460).

Recibido:

Aceptado:

Resumen

En el presente proyecto se realizó el estudio para la reutilización del azúcar y concentración del efluente del proceso de apertura de Gypsophila en la empresa Hilsea Investments Limited. Se determinó la cantidad de azúcar absorbida por la flor en su apertura mediante un ensayo controlado, el mismo que permitió conocer que se absorbe 0,16 g de azúcar por cada gramo de flor cosechada, además se determinó que es necesaria la adición de 0,8 l por día de solución de relleno, la concentración de azúcar en el efluente es aproximadamente 57 g/l que representa una pérdida de 0,13 dólares por copa procesada. Se analizó la posibilidad de reutilizar el efluente como solución de relleno para lo cual se requirió análisis de aerobios totales, concentración de azúcar e inspección visual de la flor luego de cada reutilización, se obtuvo que se puede reutilizar el efluente por 2 ocasiones, además se dimensionó un sistema para reducir el volumen del efluente cuyo principal componente es un evaporador de tubos de humo que opera con diesel 2, el dimensionamiento del evaporador se basó en análisis térmico y mecánico, para facilitar estos análisis a diferentes condiciones se desarrolló un programa computacional denominado DETH. Para el análisis térmico se realizaron balances de energía en el hogar y banco de tubos que permitieron establecer una resistencia al ensuciamiento adecuada, el análisis mecánico se realizó con la finalidad de obtener el espesor de los materiales utilizados mediante la utilización del código ASME 2004 para calderos y recipientes a presión. De los análisis térmico y mecánico se obtuvo que se necesita que el hogar de 0,52 m de diámetro, 48 tubos de 2 plg y 1,5 m de longitud distribuidos en 2 pasos, una chimenea de 0,15 m de diámetro y un quemador que posea un soplador con una potencia mínima de 0,2 HP. Finalmente se realizó un análisis financiero de la reutilización del efluente como relleno en el cual se obtendría un ahorro aproximado mensual de 533 dólares, para reducir el efluente se gastaría 518 dólares mensuales.

Palabras claves: Gypsophila, Postcosecha, Evaporación, Caldero, Sacarosa, Reutilización de efluentes.

Abstract

This project is a study for the reuse of sugar and concentration of the gypsophila postharvest effluent in Hilsea Investments Limited Company. It was determined the amount of sucrose absorbed by the flower in its opening by a controlled assay, the flower absorbed 0.16 g of sugar per gram of harvested flower also determined that it needed the addition of 0.8 l per day of filling solution, the sugar concentration in the effluent is approximately 57 g/l which represents a loss of \$ 0.13 per bouquet. It was analyzed the viability of reusing the effluent as filling solution, we required analysis of total aerobic, sugar concentration and visual inspection of the flower after each reuse, it was found that the effluent can be reused for two times, also it was sized a system to reduce the volume of effluent, the principal component is a fire tube evaporator which operates with diesel 2, the dimensioning of the evaporator is based on thermal and mechanical analysis, to facilitate this analysis to different conditions developed a computer program called DETH. For thermal analysis, energy balances were realized in the combustion chamber and in bank of tubes its allowed to establish an adequate fouling factor, the mechanical analysis was performed in order to obtain the thickness of materials used by using the 2004 ASME Boiler and Pressure Vessels Code. Of mechanical and thermal analysis it was found that it requires a combustion chamber diameter of 0.52 m, 48 pipes of 2 in. and 1.5 m length distributed in two steps, a stack of 0.15 m in diameter and burner having a blower with a minimum of 0.2 HP. Finally it was made a financial analysis of the effluent reuse as fill in which would save approximately \$ 533 monthly to reduce the effluent would spend \$ 518 a month.

Key words: Gypsophila, Postharvest, Evaporation, Boiler, Sucrose, Effluent reuse.

1. Introducción

La industria florícola ecuatoriana ha generado una cantidad importante de recursos en los últimos 20 años que la han colocado por detrás de productos tradicionales como el petróleo y banano (Pacheco, 2007).

La *Gypsophila* es una planta perenne perteneciente a la familia *Caryophyllaceae*, conocida como Baby's Breath, originaria del este europeo y Asia. Es utilizada en la elaboración de ramos de novia, como relleno en combinación con otras flores como las rosas (Hartman, 1993; Tregua, 2003).

Las etapas de procesamiento de la flor son: cosecha, tratamiento de postcosecha, clasificación, empaçado, almacenamiento y transporte, los sistemas de postcosecha dependen de la variedad de flor a tratar los mismos que buscan maximizar la vida posterior de la flor, en el caso de la *Gypsophila* se utilizan una solución nutritiva cuyo principal componente es el azúcar que se encarga de proveer el alimento necesario para el desarrollo de la flor una vez cortada cuando se tiene el 5% de flores abiertas (Kader, 2002).

El proceso de apertura de los capullos de *Gypsophila* dura aproximadamente 7 días, transcurrido este tiempo la solución sobrante es desechada, dicha solución aún contiene sacarosa en su composición por esto la materia orgánica presente es elevada, por lo que se debería reutilizar o reciclar la sacarosa presente en el efluente o realizar un tratamiento para eliminarla. (HILSEA, 2008).

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó sacarosa grado alimenticio, además productos propios para postcosecha de flores de verano como Everflor universal, Cloroflor (dióxido de cloro), Everflor STS, ácido giberílico y ácido cítrico, así como recipientes plásticos con sus respectivos soportes metálicos (HILSEA, 2008).

2.2. Métodos

2.2.1 Determinación de la cantidad de azúcar absorbida por la flor *Gypsophila* variedad Doble time

La empresa Hilsea Investments Limited ha determinado que la concentración apropiada para el tratamiento de apertura de la *Gypsophila* es de 50 g/l de azúcar, sin embargo no se ha establecido la cantidad absorbida por la flor.

Para la determinación de la cantidad de azúcar absorbida se formó 6 copas que poseían 75 tallos de flor cada una, a continuación se colocó en una solución de concentración 10 ml/l de tiosulfato de plata (STS) por 2 horas transcurrido este tiempo se colocó cada copa en un tacho que contenía 5 litros de solución nutritiva cuyo principal componente es la sacarosa con una concentración de 50 g/l, en el transcurso del ensayo el nivel del líquido disminuye por lo que fue necesaria la adición de un volumen extra de solución nutritiva, la flor permaneció por 7 días en esta solución, una vez cumplido este tiempo se midió el volumen de solución que aún permanecía en cada tacho y se tomó una muestra para realizar el análisis de azúcares totales en el laboratorio.

2.2.2 Reutilización del efluente proveniente del proceso de apertura

Como se mencionó es necesario rellenar los tachos en la apertura de la *Gypsophila* con la finalidad de mantener la base de los tallos sumergidos y proveer el alimento para su desarrollo, la solución sobrante de procesos anteriores contiene azúcar que puede ser reutilizada como relleno.

Para determinar el número de ocasiones que se puede reutilizar la solución sobrante se desarrolló un ensayo que consistió en escoger 6 copas de *Gypsophila* que ya fueron tratadas con STS, se tamizó el efluente necesario con la finalidad de eliminar hojas y pétalos presentes, a partir del segundo día se agregó la cantidad necesaria de solución sobrante, transcurridos los 7 días de proceso se retiró las copas de los tachos y se envió una muestra al laboratorio para el análisis de aerobios totales y concentración de azúcar, al momento de retirar las copas se realizó una inspección visual con

la finalidad de determinar si la reutilización del efluente tuvo algún efecto sobre la flor como cambio en la coloración de los tallos.

2.2.3 Dimensionamiento del evaporador de tubos de humo

Con la finalidad de concentrar el efluente proveniente de la reutilización como solución de relleno en la apertura de la Gypsophila y eliminar la posible presencia de aerobios mediante el tratamiento térmico fue necesario el dimensionamiento de un evaporador de tubos de humo.

El dimensionamiento consistió en determinar la cantidad de combustible y aire necesario para la combustión, potencia del soplador, número y longitud de los tubos, dimensiones de la chimenea, espesor de los materiales, evaluar los coeficientes de transferencia de calor y realizar los planos del evaporador.

2.2.3.1. Cantidad de efluente y balance de masa

La descarga del efluente proveniente de la apertura de la Gypsophila se realiza de forma manual lo que imposibilitó la medida del flujo de forma directa por lo que se lo calculó en base a las exportaciones de Gypsophila de la empresa en el año 2008, para lo cual se relacionó estos datos con el volumen de efluente y el número de tallos colocados en cada tacho.

Para determinar la cantidad de agua que se requiere eliminar del efluente se realizó un balance de masa en el evaporador en el cual se consideró la concentración inicial presente en el efluente y la deseada en la solución concentrada (60%) (Norrish, 1967).

2.2.3.2. Calor intercambiado

Debido a que la solución problema se encuentra a temperatura ambiente es necesario calentarla hasta la temperatura de ebullición para luego evaporar la cantidad de agua requerida.

2.2.3.3. Combustible y aire necesario para la combustión

Para el cálculo del combustible necesario en el proceso se consideró: el calor total requerido, poder calorífico (P_c) del diesel 2 (9912,1 kcal/kg combustible), rendimiento térmico del evaporador (80%) (REE, 2009; Brumbaugh, 2004).

La cantidad de aire estequiométrica necesaria para la combustión del diesel 2 es $16.39 \text{ kg}_{\text{aire}} / \text{kg}_{\text{diesel}}$, los combustibles comerciales pueden ser quemados satisfactoriamente si la cantidad de aire suministrado excede la cantidad teórica, este exceso para el combustible seleccionado es del 15% (Heselton, 2005).

De acuerdo al principio de conservación de masa un kilogramo de combustible producirá la misma cantidad de gases de combustión, si a este valor se le adiciona la masa de aire necesaria se obtendrá la cantidad total de gases producidos.

Con las reacciones de combustión basadas en la composición del combustible es posible la obtención de la composición de los gases de combustión así como de su peso molecular.

2.2.3.4. Temperatura de combustión y salida de los gases

La temperatura de combustión (T_c) se la obtuvo del balance de energía en el hogar, en el cual la energía que proporciona el combustible por la combustión es igual al cambio de energía de los gases de combustión, se consideró que el rendimiento del hogar (R_H) es del 95%.

$$W_g \cdot C_p \cdot (T_c - T_o) = R_H \cdot P_c \quad [1]$$

La temperatura de salida de los gases (T_{gs}) se la obtuvo del balance de energía en el cual el calor total requerido es igual al calor sensible cedido por los gases de combustión desde la temperatura de combustión hasta su salida.

$$Q = W_g \cdot W_c \cdot C_p \cdot (T_c - T_{gs}) \quad [2]$$

2.2.3.5. Resistencia al ensuciamiento (R_D)

Se conoce como resistencia al ensuciamiento a la acumulación de depósitos indeseados en la superficie de transferencia de calor, estos

depósitos provocan una disminución en el coeficiente de transferencia de calor y está definida por la diferencia del inverso de los coeficientes sucio y limpio como se lo observa en la ecuación 3 (Kakac, 1991).

$$R_D = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_L} \quad [3]$$

En los siguientes pasos se indica la forma de cálculo de los coeficientes sucio y limpio

2.2.3.6. Coeficiente global de transferencia de calor sucio (U_D)

La transferencia de calor en el evaporador se define por la ecuación 4

$$Q_{total} = U_D \cdot A_{ex} \cdot LMTD_{BALANCEADO} \quad [4]$$

El área de transferencia exterior (A_{ex}) se la asumió, como primera aproximación se tomó el área basada en la experiencia de los constructores de equipos similares que sugiere al menos 0,46 m² por cada 8436 kcal/h (Thornock y Mitchell, 2007).

2.2.3.7. Coeficiente global de transferencia de calor limpio (U_L)

Este coeficiente se lo calculó en el hogar y en el banco de tubos para su cálculo se consideró las resistencias por radiación, convección, conducción, ebullición- evaporación las que se sintetizan en las ecuaciones 5 y 6 (Shah y Sekulic, 2003).

$$\frac{1}{U_h} = \frac{1}{h_r + h_c} + \frac{d_{eh}}{2 \cdot k} \ln\left(\frac{d_{eh}}{d_{ih}}\right) + \frac{1}{h_{eb}} \quad [5]$$

$$\frac{1}{U_t} = \frac{1}{(h_c + h_r) \left(\frac{d_{it}}{d_{et}}\right)} + \frac{d_{et}}{2k} \ln\left(\frac{d_{et}}{d_{it}}\right) + \frac{1}{h_{eb}} \quad [6]$$

Conocidos los coeficientes de transferencia de calor en el hogar y banco de tubos se obtuvo el coeficiente limpio del equipo mediante la ecuación 7.

$$U_L \cdot A_T \cdot LMTD_T = U_h \cdot A_h \cdot LMTD_h + U_t \cdot A_t \cdot LMTD_t \quad [7]$$

Conocidos todos los datos se calculó la resistencia al ensuciamiento y se comparó con el valor bibliográfico sugerido 0,0041 hm²C/kcal.

2.2.3.8. Cálculo de la potencia del soplador, chimenea

Para el cálculo de la potencia del soplador necesaria para la impulsión de los gases de combustión se tomó en cuenta: las caídas de presión en el hogar, banco de tubos y chimenea, el aire necesario para la combustión, eficiencia operativa del soplador (60%) (Perry, 2008).

La caída de presión en tuberías que transportan gases se la calculó mediante la ecuación 8

$$\Delta P_g = 93 \times 10^{-6} \cdot f \cdot W^2 \cdot \frac{L}{\rho \cdot d_i^5} \quad [8]$$

La chimenea fue dimensionada mediante la regla empírica de Rankine que es función de la cantidad de combustible utilizado y está representada por la ecuación 9.

$$A_{ch} = 0,004 \cdot W_c \quad [9]$$

La altura de la chimenea se la determinó mediante un criterio orientativo del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria que sugiere una altura de 10 diámetros (Ministerio del Ambiente, 2002). En la chimenea además de la caída de presión en el conducto central se producen pérdidas por accesorios como entrada, salida y válvula de mariposa.

2.2.3.9. Espesor de los materiales

El espesor de la pared del hogar y tubos se lo realizó con la utilización del procedimiento HG-312.3 del código ASME 2004 para recipientes a presión y calderos, mientras que el espesor de la coraza con la regla HG-301 y las puertas de acceso mediante la regla HF-301.1 del mismo código.

2.2.4 Análisis financiero del proceso de reutilización y reducción del efluente

Para el análisis de costos para la reutilización con el promedio de copas que produce la empresa se determinó la cantidad de copas que pueden ser procesadas si se utiliza únicamente solución virgen en la totalidad del proceso y la cantidad de solución utilizada cuando se reutiliza el efluente como solución de relleno, para los costos de reducción del efluente se

cotizó el evaporador en empresas encargadas en la construcción de este tipo de equipos.

3. Resultados y discusión

3.1. Determinación de la cantidad de azúcar absorbida por la flor *Gypsophila* variedad Doble Time

Los resultados promedio del ensayo desarrollado se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados promedio de la determinación de la cantidad de azúcar absorbida por la *Gypsophila*

Peso copa (g)	Volumen efluente (ml)	Concentración azúcar en el efluente (g/l)	Peso de azúcar absorbida /peso de flor (g/g)
1 722,00	3 120,00	57,27	0,16

Como se observa en la Tabla 1 el efluente presenta una concentración de azúcar más elevada que la alimentada (50 g/l) debido a que se produce evaporación de agua al medio ambiente.

En el transcurso de los 7 días de duración del ensayo se requirió la adición de 4 litros de solución nutritiva como relleno para mantener las bases de los tallos sumergidos, en total se necesitó 9 litros de solución con un contenido total de 450 g de azúcar por copa de los cuales se absorbió el 60,3% que representa una pérdida de 0,13 dólares por copa producida.

Los 4 litros utilizados como relleno en la apertura de la *Gypsophila* nos indican que es necesaria la adición de 0,8 litros diarios a partir del segundo hasta el sexto día.

3.2. Reutilización del efluente proveniente del proceso de apertura

En el ensayo desarrollado para determinar el número de ocasiones que se puede reutilizar el efluente como solución de relleno se encontró que luego de la primera reutilización la concentración de azúcar fue de 49,36 g/l con ausencia de aerobios totales y en la inspección visual no se observó cambios en la coloración

de los tallos, similares características se presentaron en la segunda reutilización.

En la tercera reutilización se observó un cambio de coloración (amarillamiento) en los tallos de la *Gypsophila* lo que indica la presencia de bacterias en los mismos por lo que se decidió terminar el ensayo.

3.3. Dimensionamiento del evaporador de tubos de humo

En los siguientes numerales se presentan los resultados que se obtuvieron en el dimensionamiento del evaporador de tubos de humo.

3.3.1. Cantidad de efluente y balance de masa

Con base en las exportaciones de *Gypsophila* se obtuvo el efluente generado en la Unidad de Negocios La Mora, se determinó que el efluente generado no es constante, para el dimensionamiento no es posible utilizar el flujo máximo o el mínimo ya que nos presentaría una idea equivocada del equipo requerido por lo que se utilizó el promedio 5,2 m³/semana.

En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos para el balance de masa en el evaporador para concentrar la solución desde 5,42 hasta 60%.

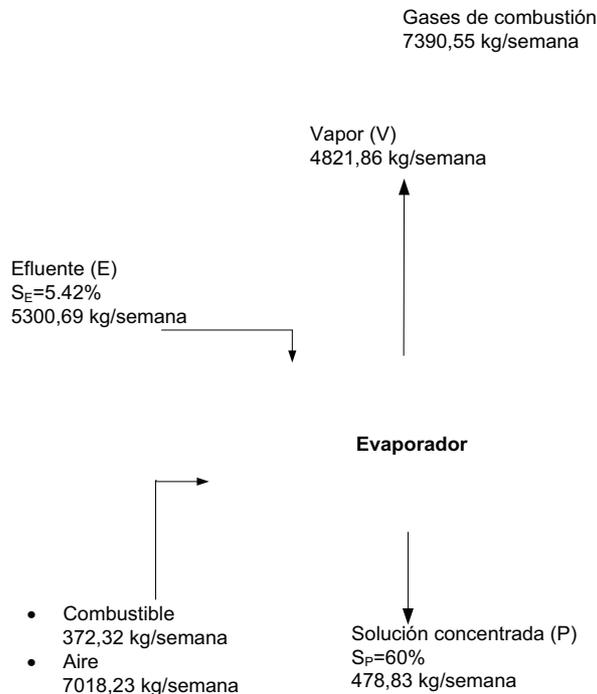


Figura 1. Balance de masa en el evaporador

3.3.2. Calor intercambiado

La temperatura de ebullición de una solución azucarada se incrementa con la concentración así una solución que contiene 60% en peso de azúcar tiene una temperatura de ebullición de 95,4 °C. Para el dimensionamiento del evaporador se tomó una temperatura media de ebullición de 93,9 °C,

El evaporador operará 2 días por semana con un total de 16 horas, por lo que se determinó que se debe calentar 331,29 kg/h desde 20 a 93,95 °C y evaporar 301,37 kg/h de agua.

El calor necesario para calentar la solución es de 20273,04 kcal/h y en la evaporación 164268,34 kcal/h.

3.3.3. Combustible y aire necesario para la combustión

La cantidad de diesel 2 necesario para el calentamiento y la evaporación fue de 7,15 gal/h.

De acuerdo a la experiencia en equipos que utilizan diesel es necesario un exceso de aire del 15% para asegurar una combustión completa, este parámetro es de gran importancia debido a que un déficit de oxígeno provocaría una combustión incompleta con pérdida de combustible por la presencia de inquemados, con el exceso señalado se requiere 18,85 kg de aire por kg de combustible, al considerar la ley de conservación de masa se obtuvo que se obtendrán 19,85 kg de gases de combustión por cada kg de combustible quemado.

La composición de los gases de combustión calculada en base a la composición del combustible, la cantidad de aire requerida y las relaciones estequiométricas de las reacciones de oxidación se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición de los gases de combustión

Componente	Moles	Fracción molar
mol CO ₂ /kg _{combustible}	0,07	0,11
mol H ₂ O /kg _{combustible}	0,06	0,09
mol N ₂ /kg _{combustible}	0,52	0,77
mol O ₂ /kg _{combustible}	0,02	0,03
Total	0,67	1,00

El gas de combustión resultante posee un peso molecular de 28,9 kg/kgmol.

3.3.4. Temperatura de combustión y salida de los gases

La temperatura de combustión depende de varios factores como la cantidad de aire necesaria, tipo de combustible, temperatura de ingreso del combustible, en el caso del diesel no se requiere precalentamiento.

La temperatura de combustión se la calculó por el método iterativo de la ecuación 1 debido a que la capacidad calorífica de los gases de combustión depende directamente de esta temperatura, se obtuvo un valor de 1533,9 °C.

La temperatura de salida de los gases de combustión (T_{gs}) debe ser lo más baja posible a fin de evitar pérdidas de energía a través de la chimenea pero debe ser superior a la temperatura de rocío del ácido sulfúrico (130 °C) (Ganapathy, 2003).

De la iteración de la ecuación 2 se obtuvo que $T_{gs} = 272,5$ °C.

3.3.5. Coeficiente global de transferencia de calor sucio (U_D)

Con la finalidad de determinar el LMTD balanceado se requirió determinar T_i con un valor de 433,9 °C, esta es la temperatura de los gases de combustión cuando la solución alcanza la temperatura de ebullición, dicha temperatura se la obtuvo del balance de energía en la zona de calor sensible representado por la ecuación 10, con este valor se determinó que el LMTD balanceado es igual a 648,6 °C.

$$T_i = T_{gs} + \frac{Q_{sensible}}{W_g \cdot W_c \cdot C_p} \quad [10]$$

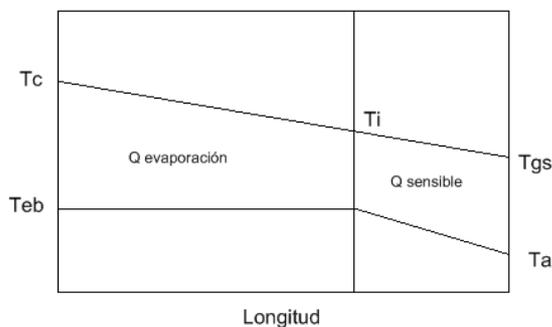


Figura 2. Diagrama temperatura vs longitud

Con un área asumida de 13,95 m² el coeficiente global de transferencia de calor sucio tiene un valor de 20,4 kcal/hm²°C.

3.3.6. Coeficiente global de transferencia de calor limpio (U_L) y resistencia al ensuciamiento (R_D)

3.3.6.1. Coeficiente Global de Transferencia de Calor en el Hogar (U_h)

• Dimensionamiento del hogar

El hogar también es conocido como horno, es el lugar en cual se produce la combustión, el hogar dimensionado corresponde al tipo conocido como enfriado por agua, el mismo que se encuentra ubicado en el interior de una coraza y está en contacto con el fluido a tratar.

Para este tipo de equipos con la capacidad que se desea dimensionar se requiere una coraza con diámetro interior de 1,06 m, la relación entre esta dimensión y el diámetro exterior del hogar es aproximadamente 2,1 por lo que el diámetro del hogar de 0,52 m (Hurst, 2009).

El calor liberado en este tipo de hogares tiene un valor promedio aproximado de 885 kW/m³, dato con el cual se determinó el volumen del hogar necesario (0,3 m³) y una longitud de 1,5 m (Kakac, 1991).

• Coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_r)

El intercambio calórico por radiación entre los gases de combustión y la pared interna del hogar se la define por la ecuación 11

$$Q_r = 4.96E - 08 \cdot \left(\frac{(T_{gmh} + 273)^4}{-(T_{pi} + 273)^4} \right) \cdot F_e \cdot F_A \quad [11]$$

F_e es el factor de emisividad que es necesario calcularlo ya que los cuerpos en el hogar no son negros, para el hogar dimensionado presenta un valor de 0,37

F_A es el factor de área y se lo define como el producto del factor de forma que para este tipo de hogar es 1 y el área de transferencia en el hogar.

• Coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c)

El calor transferido por convección desde los gases de combustión hacia la pared del hogar (Holman, 1999).

$$Q_c = h_c \cdot A_{pi} \cdot (T_{gmh} - T_{pi}) \quad [12]$$

Donde el coeficiente por convección se lo calcula mediante la utilización de números adimensionales.

Como la temperatura media de los gases en el hogar (T_{gmh}) y la temperatura interior de pared (T_{pi}) son desconocidas se requirió un proceso iterativo donde el calor total transferido por los gases de combustión en el hogar debe ser igual al calor conducido por la pared del hogar.

Del proceso iterativo se encontró que:
 $T_{gmh} = 1060,9 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{pi} = 101,4 \text{ } ^\circ\text{C}$,
 $h_r = 60,27 \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $h_c = 3,47 \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

El coeficiente de calor por ebullición- evaporación es igual al calor total transferido al fluido por unidad de área dividido para el incremento de temperatura de ebullición del fluido con respecto al agua $h_{eb} = 34107,04 \text{ kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

El coeficiente global de transferencia de calor en el hogar presentó un valor de $63,11 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

3.3.6.2. Coeficiente Global de Transferencia de Calor en los tubos (U_t)

El área de transferencia disponible para el banco de tubos es de $11,5 \text{ m}^2$, el número de tubos necesario para alcanzar esta área fue de 48, con un diámetro de 2 plg (14 B.W.G.) y 1,5 m de longitud, el número de pasos utilizado fue de 2 como se observa en la Figura 3 (Ganapathy, 2003).

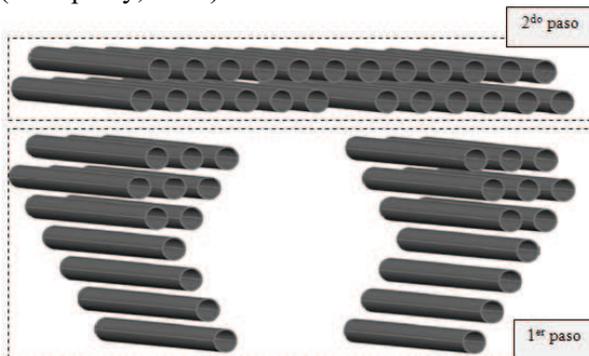


Figura 3. Banco de tubos del evaporador

Con la utilización de números adimensionales el coeficiente por convección presentó un valor de $16,73 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Los únicos gases que absorben una cantidad apreciable son aquellos que tienen tres o más átomos como el CO_2 , H_2O y SO_2 , con la

utilización de nomogramas fue posible obtener el coeficiente de transferencia de calor por radiación con un valor de $4,28 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Trinks *et al*, 2004).

El coeficiente de ebullición en el banco de tubos tuvo un valor de $2005,38 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, conocidos los coeficientes por convección, radiación y ebullición se obtuvo el coeficiente global para el banco de tubos $19 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Conocidos los coeficientes se calculó el coeficiente global de transferencia de calor limpio con la ecuación [7] y se tuvo un valor de $22,57 \text{ kcal/hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Una vez calculados los coeficientes limpio y sucio se procedió a calcular la resistencia al ensuciamiento del evaporador con un valor de $0,0047 \text{ hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C/kcal}$.

De la comparación de la resistencia al ensuciamiento calculada con la sugerida se acepta el área asumida así como las demás dimensiones derivadas de la misma.

Para facilitar la determinación del área de transferencia adecuada se desarrolló el programa **DEHT** (dimensionamiento del evaporador de tubos de humo) en lenguaje basic para macros de Microsoft Excel, algunos de los resultados obtenidos para diferentes áreas asumidas se presentan en la Tabla 3, cabe señalar que en ningún caso se acepta que el evaporador esté subdimensionado es decir que la resistencia al ensuciamiento calculada sea menor a la sugerida por bibliografía.

3.3.7. Cálculo de la potencia del soplador, chimenea

Caída de presión en el hogar y banco de tubos

La caída de presión por fricción en el hogar es despreciable, en el banco de tubos esta presentó un valor de $0,1 \text{ plg H}_2\text{O}$, además en el evaporador se produce caída de presión por cambios de dirección, entradas y salidas, estas pérdidas se las calculó mediante la ecuación 13 y presentaron un valor de $0,42 \text{ plg H}_2\text{O}$.

$$\Delta P_A = 3,5 \cdot n_T \left(\frac{v^2 \cdot \rho}{2g} \right) \quad [13]$$

Chimenea

De acuerdo a la regla de Rankine el área de la chimenea (A_{ch}) fue de $0,018 \text{ m}^2$, con esta área se obtuvo el diámetro interior de la chimenea (d_{ich}) $0,153 \text{ m}$, con esta dimensión la velocidad de los gases de combustión presentó un valor de 10 m/s que se encuentra dentro del rango

aceptado (5 a 17 m/s), la altura de la chimenea fue de $1,53 \text{ m}$.

La caída de presión en la chimenea tanto por fricción como por accesorios fue de $0,97 \text{ plg H}_2\text{O}$, con este valor la potencia mínima del soplador fue de $0,2 \text{ hp}$.

Tabla 3. Resultados obtenidos con diferentes áreas externas asumidas.

Área externa (m^2)	# Tubos	U_D ($\text{kcal/hm}^2\text{C}$)	U_h ($\text{kcal/hm}^2\text{C}$)	U_t ($\text{kcal/hm}^2\text{C}$)	U_L ($\text{kcal/hm}^2\text{C}$)	R_D ($\text{hm}^2\text{C/kcal}$)
10,22	32	27,85	63,03	24,80	29,59	0,0021
11,00	36	25,88	63,03	22,92	27,63	0,0025
12,00	40	23,72	63,03	21,37	25,65	0,0032
13,00	44	21,90	63,03	20,08	23,96	0,0039
13,95	48	20,41	63,03	19,00	22,55	0,0047

3.3.8. Espesor de los materiales

En la Tabla 4 se presentan los espesores de los materiales utilizados en las diferentes partes que conforman el evaporador obtenidos de acuerdo a los procedimientos del código ASME 2004.

En la Tabla 5 se encuentra un resumen de las dimensiones obtenidas del análisis térmico y mecánico del evaporador de tubos de humo.

Tabla 4. Espesores de las partes del evaporador.

Parte del evaporador	Espesor (m)
Hogar	0,0060
Coraza	0,0060
Tubos	0,0022
Hoja de soporte de los tubos	0,0080
Puertas	0,0080

Tabla 5. Dimensiones del evaporador de tubos de humo

Parte del evaporador	Longitud (m)	Diámetro interno (m)	Diámetro externo (m)
Hogar	1,50	0,5080	0,5200
Tubos	1,50	0,0464	0,0508
Coraza	1,80	1,0670	1,0790
Chimenea	1,53	0,1530	0,1590
Placa de soporte de los tubos (tubesheet)	-	1,0670	-

La placa de soporte de los tubos fue diseñada para albergar 48 tubos y al hogar con un espaciamiento entre tubos de 76,2 mm, además cada una posee un deflector para direccionar los gases de combustión.

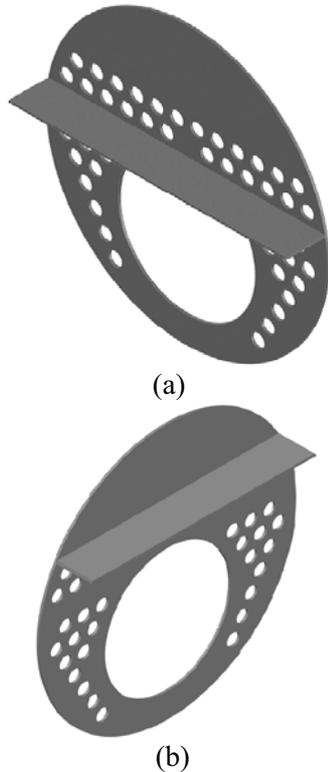


Figura 4. Placa de soporte trasera (a) y delantera (b)

En cuanto a la coraza cabe señalar que posee una puerta de acceso al banco de tubos, una tubería de 4 plg para la salida del vapor, 1 tubería de 1 plg utilizada para la alimentación y 2 tuberías de 3 plg para la descarga del concentrado, la coraza será recubierta con material aislante de espesor de 2,5 plg.

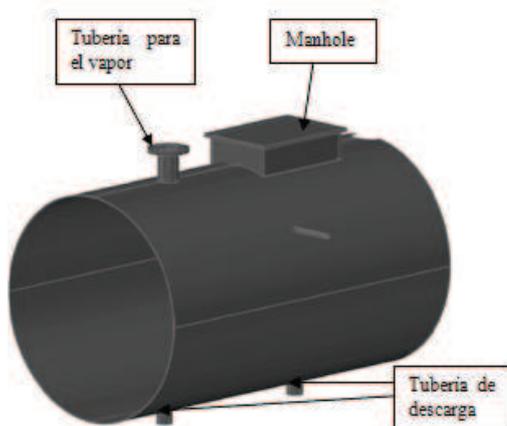


Figura 5. Coraza

En la Figura 6 se presenta la vista isométrica del evaporador dimensionado.



Figura 6. Vista isométrica del evaporador dimensionado

Como el efluente descargado es ácido ($\text{pH}=4,16$) será necesario neutralizarlo hasta un valor cercano a 7 para lo cual se puede utilizar sosa cáustica grado técnico, mediante pruebas experimentales se determinó que se necesita 0,1 g por litro de efluente, además para la alimentación se propone utilizar una bomba centrífuga de 0,5 HP.

3.3.9. Análisis financiero del proceso de reutilización y reducción del efluente

En la Tabla 6 se presentan los resultados del análisis de costos de la reutilización del efluente, con la reutilización del efluente como solución de relleno se logra una disminución de 2,3 litros de solución virgen, lo que implica que la cantidad de azúcar usada disminuya, obteniéndose un ahorro de 0,08 dólares por copa procesada.

Tabla 6. Análisis de costos para la reutilización del efluente

Reutilización	efluente generado (l/semana)	copas tratadas	Solución virgen utilizada (l)	
			sin reutilización	con reutilización
inicio	-	1667	15003	15003
1 ^{ra} reutilización	5201	1300	11700	6500
2 ^{da} reutilización	4056	1014	9126	5070
	total	3981	35829	26573
Solución utilizada (l/copa)			9	6,7
Sacarosa utilizada (kg/copa)			0,45	0,34
Costo (\$/copa)			0,31	0,23

El costo correspondiente a los accesorios y equipos necesarios para la reducción del efluente es de 10147,08 dólares, si la empresa pagara la inversión inicial durante 10 años la cuota mensual correspondería a 103,79\$.

El consumo de combustible representaría un gasto de 412 dólares mensuales, mientras que los costos asociados a la energía eléctrica consumida por la bomba de alimentación y quemador son de 1,71 \$/mes, por lo que para la concentración del efluente generado durante un mes (20,8 m³) se gastaría 517,66 dólares.

Conclusiones

1. La Gypsophila variedad doble time cultivada en la Unidad de Negocios La Mora absorbe el 60,3% de la sacarosa suministrada en el proceso de apertura, se desperdicia aproximadamente 179 g de sacarosa por copa tratada, además se necesita adicionar 0,82 litros de solución nutritiva por día como relleno.
2. La concentración de azúcar en el efluente descargado es de 57,27 g/l, con un promedio de 5,2 m³/semana y representa una pérdida de 0,13 dólares por copa procesada (217 \$/semana).
3. La reutilización del efluente como solución de relleno permite un ahorro de 0,08 dólares por copa procesada (533,44 \$/mes).

4. El efluente generado en la apertura de la Gypsophila se puede reutilizar por dos ocasiones.
5. El evaporador dimensionado para concentrar el efluente requiere un área de transferencia de 13,95 m² con las dimensiones descritas en el presente documento.
6. El equipo fue dimensionado para trabajar a la presión atmosférica de Quito, de acuerdo al espesor de los materiales la máxima presión que soportará el evaporador será de 61 psi.
7. La inversión inicial que debería realizar la empresa para el montaje del sistema de reducción del efluente es de 10487,59 dólares, con un costo mensual de operación de 521,32 dólares.

Agradecimientos

Se agradece a la empresa Hilsea Investments Limited con su Unidad de Negocios La Mora por su apoyo económico y logístico para el desarrollo de este proyecto.

Nomenclatura

- A Área de transferencia
 Cp Capacidad calorífica a presión constante
 d Diámetro

f	Factor de fricción
F_A	Factor de área
F_e	Factor de emisividad
g	Aceleración de la gravedad
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección
h_{eb}	Coefficiente de transferencia de calor por ebullición-evaporación
k	Conductividad térmica
L	Longitud
LMTD	Temperatura media logarítmica
P_c	Poder calorífico del combustible
Q	Calor
R_D	Resistencia al ensuciamiento
R_H	Rendimiento térmico
T_c	Temperatura de combustión
T_{gs}	Temperatura de salida de los gases
T_{gmh}	Temperatura media de los gases de combustión en el hogar
T_o	Temperatura ambiente
T_{pi}	Temperatura de pared interior
U_D	Coefficiente global de transferencia de calor sucio
U_L	Coefficiente global de transferencia de calor limpio
v	Velocidad
W_c	Masa de combustible quemado
W_g	Masa de gases de combustión por kilogramo de combustible quemado
W	Flujo de gases $W_g \cdot W_c$
h	Hogar
t	Tubos
i	Interior
e	Exterior
p	Pared
ρ	Densidad
ch	Chimenea

Referencias bibliográfica

1. American Society of Mechanical Engineers ASME, 2004, "BOILER & PRESSURE VESSEL CODE", Editorial ASME, edición 2004, New York, Estados Unidos, pp. 1-300.
2. Brumbaugh, J., 2004, "Heating Systems, Furnaces and Boilers", 4ta edición, Editorial Wiley, Indianapolis, Estados Unidos, p. 486.
3. Ganapathy, V., 2003, "Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators", Ira edición, Marcel Dekker Inc., Nueva York, Estados Unidos, pp. 7-27, 7-28.
4. Hartman, R., 1993, "Gypsophila Baby's-breath", In Hickman, J. C. (ed.) The Jepson Manual: Higher Plants of California. p. 481.
5. Heselton, K., 2005, "Boiler Operator's Handbook ", Editorial The Fairmont Press, Georgia, Estados Unidos, pp. 151, 155.
6. HILSEA INVESTMENTS LIMITED (La Mora), 2008, "Exportación Gypsophila Doble Time", Quito, Ecuador, p. 1.
7. Holman, J., 1999, "Transferencia de Calor", 1ra. edición, McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, Madrid, España, pp. 7, 8, 9, 218, 334.
8. Hurst Boiler, 2009, "Series 300 Three Pass Dry Back Packaged Scotch Boilers", http://www.hurstboiler.com/boilers/scotch_marine, (Julio, 2009).
9. Kader, A., 2002, "Postharvest technology of horticultural crops", 3ra edición, University of California, California, Estados Unidos, pp. 315-324.
10. Kakac, S., 1991, "Boilers, Evaporators & Condensers", John Wiley & Sons, Florida, Estados Unidos, pp. 107-135.
11. Ministerio del Ambiente, 2002, "Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente TULAS", Registro Oficial, Quito, Ecuador, pp. 286-340.
12. Norrish, R., 1967, "Selected Tables of Physical Properties of Sugar Solutions", 1ra. edición, The British Food Manufacturing Industries Research Association, Reino Unido, p. 108.
13. Pacheco, F., 2007, "LA FLORICULTURA ECUATORIANA", http://www.sica.gov.ec/agronegocios/biblioteca/ingrizzo/perfiles_productos/floricultura.pdf, (Agosto, 2009).

14. Perry, R., 2008, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 8va edición, Editorial McGraw-Hill companies, Estados Unidos, pp. 2-144, 6-16, 24-9.
15. Refinería Estatal Esmeraldas (REE), 2009, "Poder calorífico Diesel", Esmeraldas, Ecuador, p. 1.
16. Shah, R. y Sekulic, D., 2003, "Fundamentals of Heat Exchanger Design", 1ra edición, Editorial Wiley & Sons Inc, New Jersey, Estados Unidos, pp. 109, 110, 882.
17. Thornock, D. y Mitchell, H., 2007, "Measurements and Design Enhancements in Firetube Boilers Using Improved Technology", [http:// www.johnstonboiler.com/TechBriefs/ABMA_9_00.PDF](http://www.johnstonboiler.com/TechBriefs/ABMA_9_00.PDF), (Diciembre, 2009).
18. Tregea, W., 2003, "Gypsophila Growing in Central Australia", www.primaryindustry.nt.gov.au, (Septiembre 2009).
19. Trinks, W., Mawhinney, M., Shannon, R., Reed, R. y Garvey, J., 2004, "Industrial Furnaces", 6ta. edición, Editorial Wiley & Sons Inc, New Jersey, Estados Unidos, pp. 1, 25-69.