

CTM-UA1.0

1. GUÍA DE INSTALACIÓN DE CTM-UA 1.0	2
1.1. INSTALACIÓN MATLAB RUNTIME	2
1.2. INSTALACIÓN DE CTM-UA 1.0	3
2. MANUAL DE USUARIO DE CTM-UA 1.0	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI)	8
2.3. TIPOS DE CÁLCULOS	14
2.3.1. Cantidad de agua a enfriar.....	14
2.3.2. Altura de la torre	19
2.3.3. Temperatura de salida del agua	20
2.3.4. Coeficiente de transferencia de masa	21
ANEXOS.....	23

1. GUÍA DE INSTALACIÓN DE CTM-UA 1.0

Es importante tener en cuenta que CTM-UA 1.0 es una herramienta informática desarrollada en el entorno de desarrollo de interfaces de usuario de MATLAB (*Graphical User Interface Development Environment*, GUIDE), por lo tanto, es necesario instalar el MR (Matlab Runtime) para el funcionamiento de la herramienta sin necesidad de tener instalado MATLAB.

1.1. INSTALACIÓN MATLAB RUNTIME

MATLAB Runtime es un conjunto de librerías independientes que permite la ejecución de aplicaciones o componentes de MATLAB compilados. El usuario deberá dirigirse al siguiente URL: <https://la.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html> en donde se abrirá la página web mostrada en la Figura 1. En la Figura 2 se encuentran diferentes versiones del Runtime, el usuario deberá escoger la versión R2017a (9.2) correspondiente al sistema operativo que posea su ordenador e instalar el Runtime.

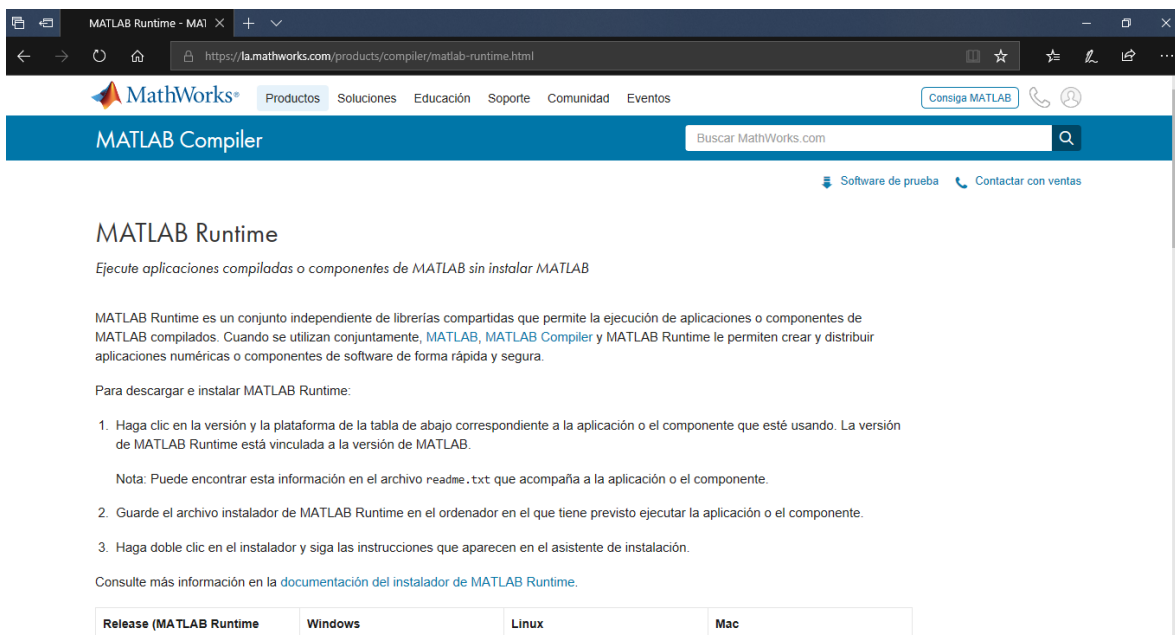


Figura 1. Página después de seguir el vínculo para instalar el Runtime.

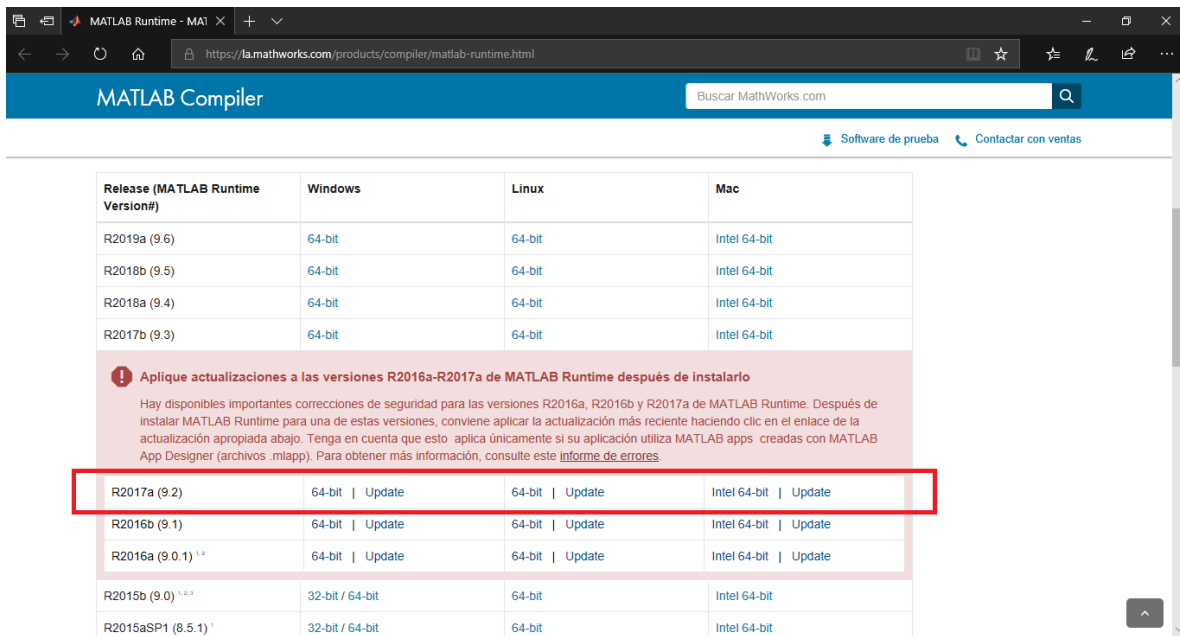


Figura 2. Selección de la versión del *Runtime*.

1.2. INSTALACIÓN DE CTM-UA 1.0

Una vez instalado el MATLAB *Runtime* se debe ejecutar como administrador el archivo MyAppInstaller_web y luego se abre una ventana previa a la instalación, como se ve en la figura 3.

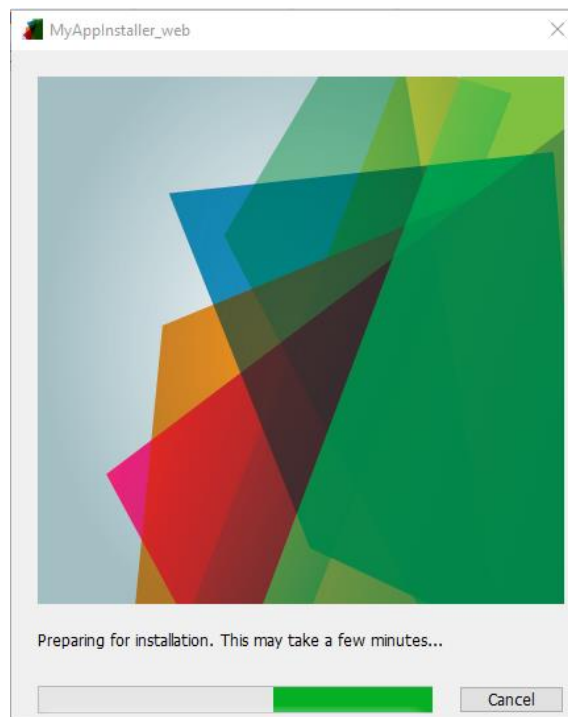


Figura 3. Cuadro de espera del instalador de CTM-UA.

La ventana que aparece en la figura 3 sólo durará unos pocos segundos y automáticamente aparece la ventana de instalación de CTM-UA, como se observa en la figura 4.

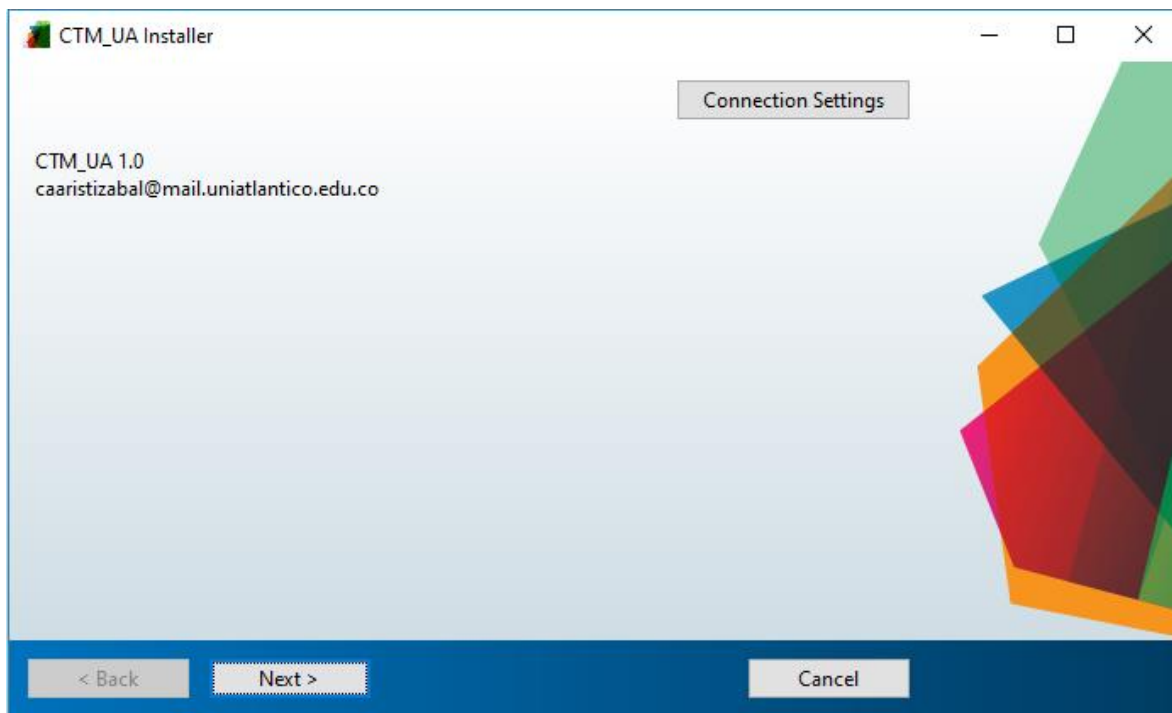


Figura 4. Cuadro de bienvenida del instalador de CTM-UA.

Debe realizar clic en el botón “Next” y aparece la ventana que se observa en la figura 5.

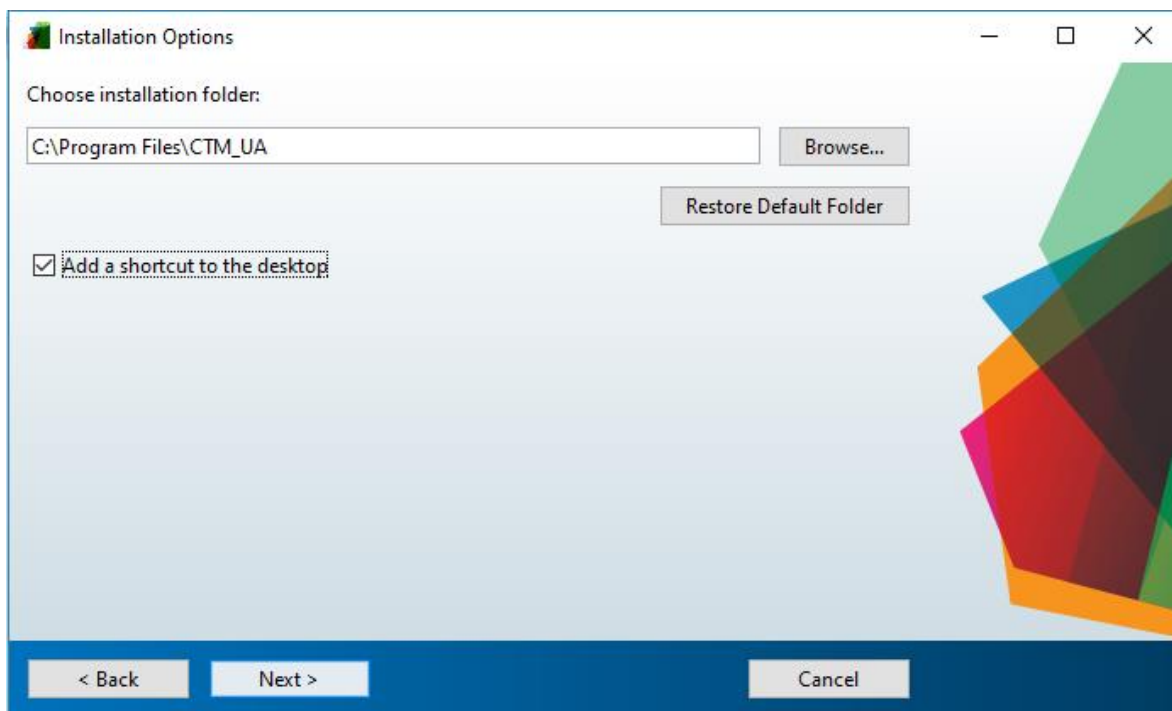


Figura 5. Ventana para seleccionar la ubicación donde se guardará el programa.

En la ventana de la figura 5 se escoge la ubicación en la cual se desea guardar el programa, también, se debe seleccionar la opción de “*Add a shortcut to the desktop*” para crear un acceso directo en el escritorio y presionar nuevamente el botón “*Next*”. Posteriormente el instalador verifica que esté instalado el MATLAB Runtime como se observa en la figura 6.



Figura 6. Verificación del requerimiento de MATLAB Runtime.

Se hace clic sobre el botón “*Next*” y aparece una confirmación sobre la ubicación donde se guardará el programa y aquí se debe presionar el botón “*Install*”, como aparece en la figura 7.

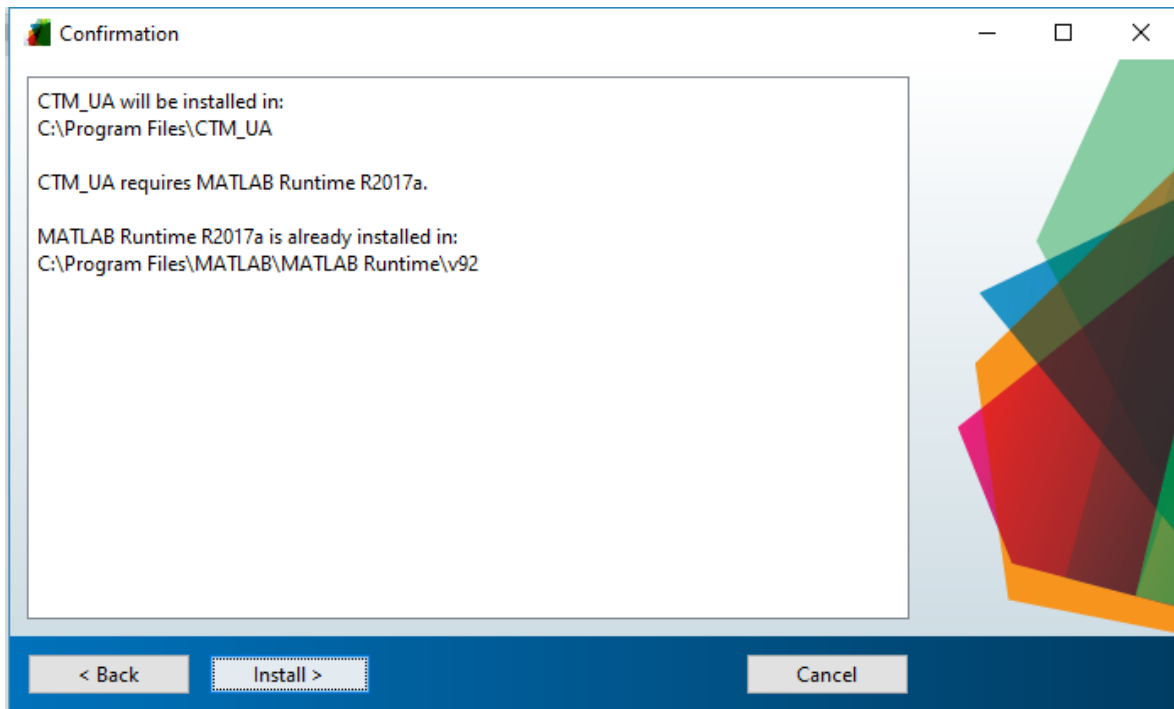


Figura 7. Ventana de instalación de CTM_UA

Una vez termine la instalación se presiona el botón “*Finish*” de la figura 8 para concluir con la instalación de CTM_UA.

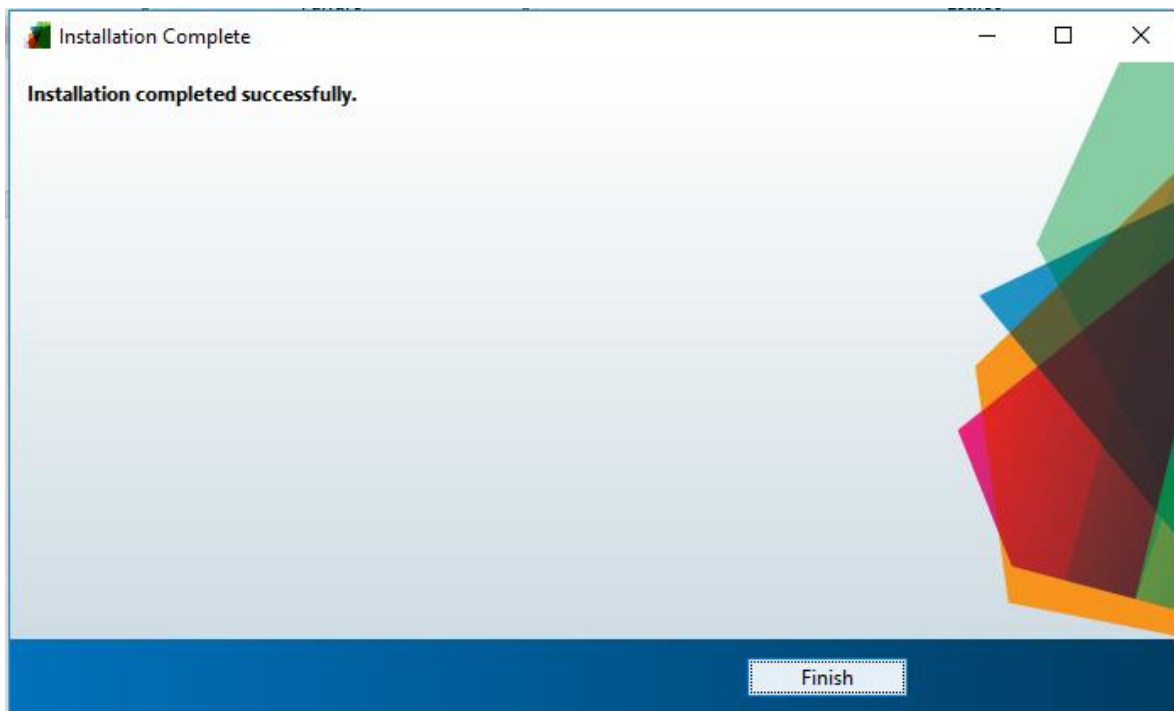


Figura 8. Ventana de finalización de instalación de CTM_UA.

2. MANUAL DE USUARIO DE CTM-UA 1.0

2.1. INTRODUCCIÓN

CTM-UA es un programa ambientado en MATLAB, que utiliza la teoría de Merkel para la simulación de torres de enfriamiento, las torres de enfriamiento son equipos muy utilizados en la industria para suplir los requerimientos de enfriamiento en los procesos de transferencia de calor, en una torre de enfriamiento se utiliza aire para enfriar corrientes de agua, haciendo fluir el aire desde la parte inferior de la torre para ponerlo en contacto con el agua que se suministra por la parte superior de ésta, ver figura 9. El principio del funcionamiento de estos equipos consiste en aprovechar el calor latente y el calor sensible del agua, se retira calor sensible del agua por transferencia de calor, porque el aire está a una menor temperatura que el agua. El calor latente se retira debido a la transferencia de masa, porque al no estar el aire saturado el agua se evapora parcialmente (en poca cantidad) y para poder cambiar de fase ésta toma la energía necesaria de la fase líquida, por lo que contribuye con la disminución de la temperatura del agua.

El programa permite analizar 4 tipos de cálculos diferentes entre los cuales se tiene flujo de agua, altura de la torre, temperatura final del agua y coeficiente volumétrico de transferencia de masa. Para cada uno de los tipos de cálculos se presentan diferentes tipos de gráficos de interés para el análisis de las torres de enfriamiento como lo es la línea de operación, perfil de temperatura del aire y el perfil de humedad del aire.

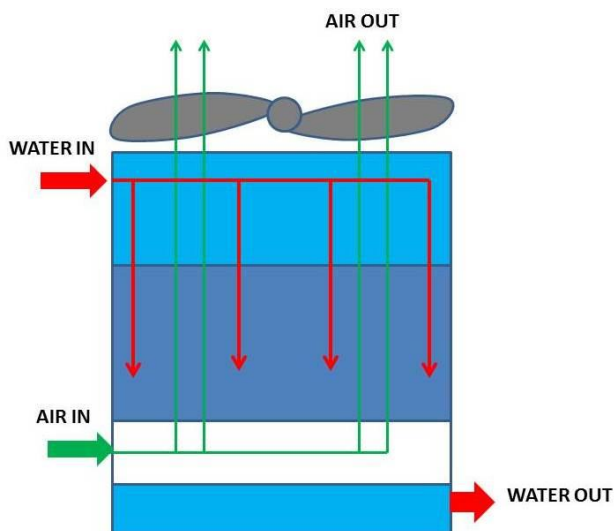


Figura 9. Esquema de una torre de enfriamiento.

La finalidad de CTM-UA es que pueda usarse como un complemento en las clases de transferencia de masa, mejorando los procesos de aprendizaje de los estudiantes y facilitando la labor del docente. Se espera que los estudiantes puedan desarrollar un criterio analítico sobre los fundamentos que rigen el funcionamiento de las torres de enfriamiento, de una manera práctica e interactiva, donde se le permite al estudiante facilitar la comprensión del

efecto que tiene cada una de las distintas variables de entrada sobre el desempeño de las torres de enfriamiento.

2.2. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO (GUI)

La interfaz del programa es bastante sencilla e intuitiva y cuenta con unos menús en la parte superior donde el usuario puede elegir entre los diferentes tipos de cálculos que se pueden realizar, ayuda e información resumida sobre el programa. En la figura 10 se muestra la vista principal de la interfaz gráfica de usuario (GUI), resaltando los menús.

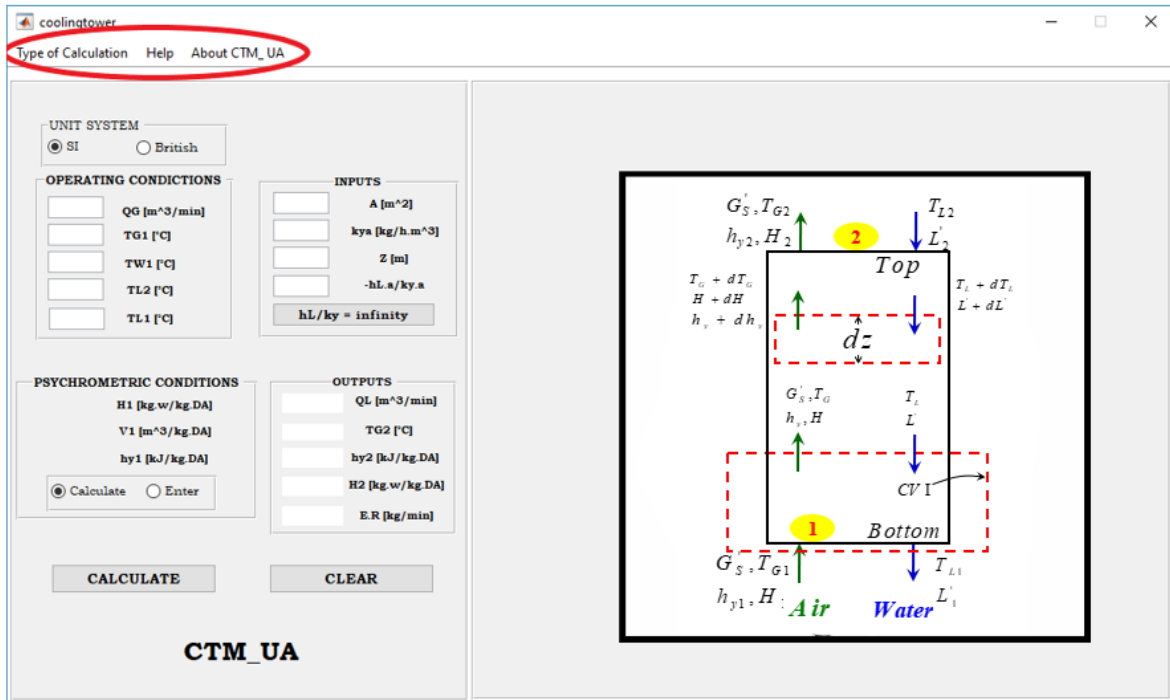


Figura 10. Interfaz gráfica de usuaria de CTM-UA.

Realizando clic sobre el menú "Types of Calculation" se puede seleccionar el tipo de cálculo que se quiera realizar con CTM-UA, en la figura 11 se muestra las diferentes opciones dentro de este menú.

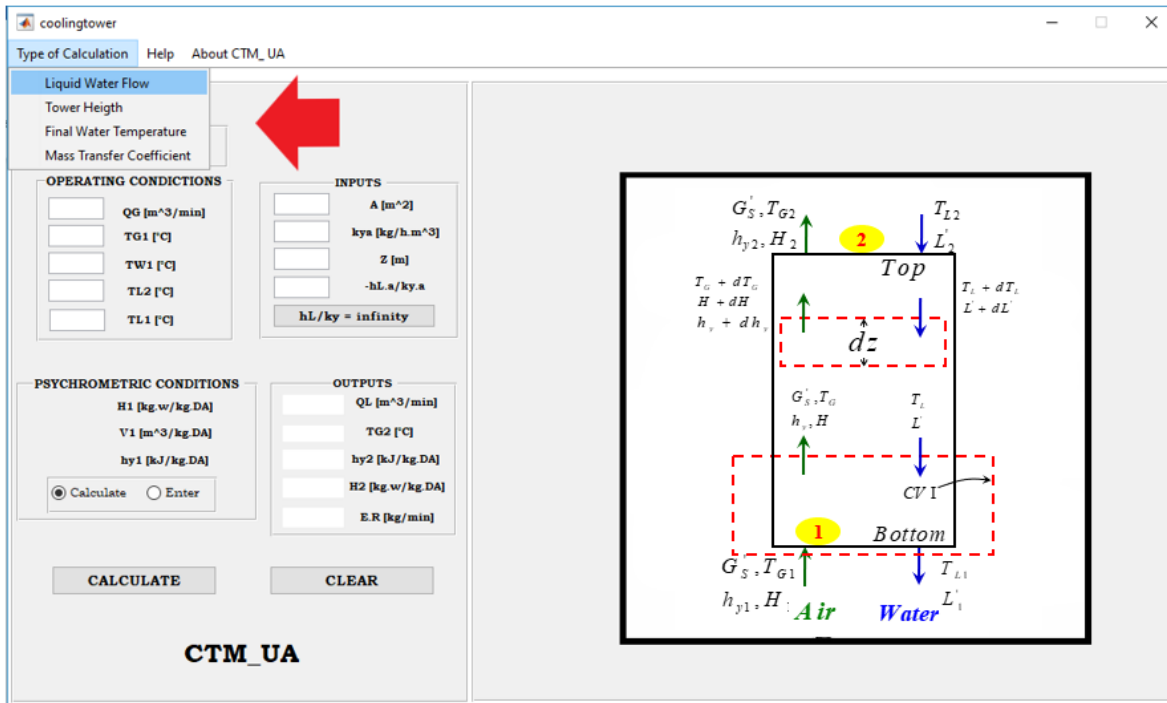


Figura 11. Diferentes tipos de cálculos que ofrece CTM-UA.

Como se indica en la figura 11 el programa ofrece 4 tipos de cálculo, como lo son “*Liquid Water Flow*” que permite hallar el flujo de agua a enfriar, “*Tower Height*” que calcula la altura de la torre, “*Final Water Temperature*” donde se halla la temperatura final del agua y “*Mass Transfer Coefficient*” donde se puede calcular el coeficiente volumétrico de transferencia de masa. Mas delante se entra en detalle sobre lo que quiere decir cada tipo de cálculo y se muestran ejemplos.

La interfaz cuenta con la opción de elegir el sistema de unidades en el cual se desee trabajar, en el recuadro que dice “*UNIT SYSTEM*”, por defecto se tiene seleccionado el sistema internacional de unidades (SI), pero si se desea, se puede trabajar con el sistema inglés de unidades (*British*), en la figura 12 se muestra la ubicación de los botones.

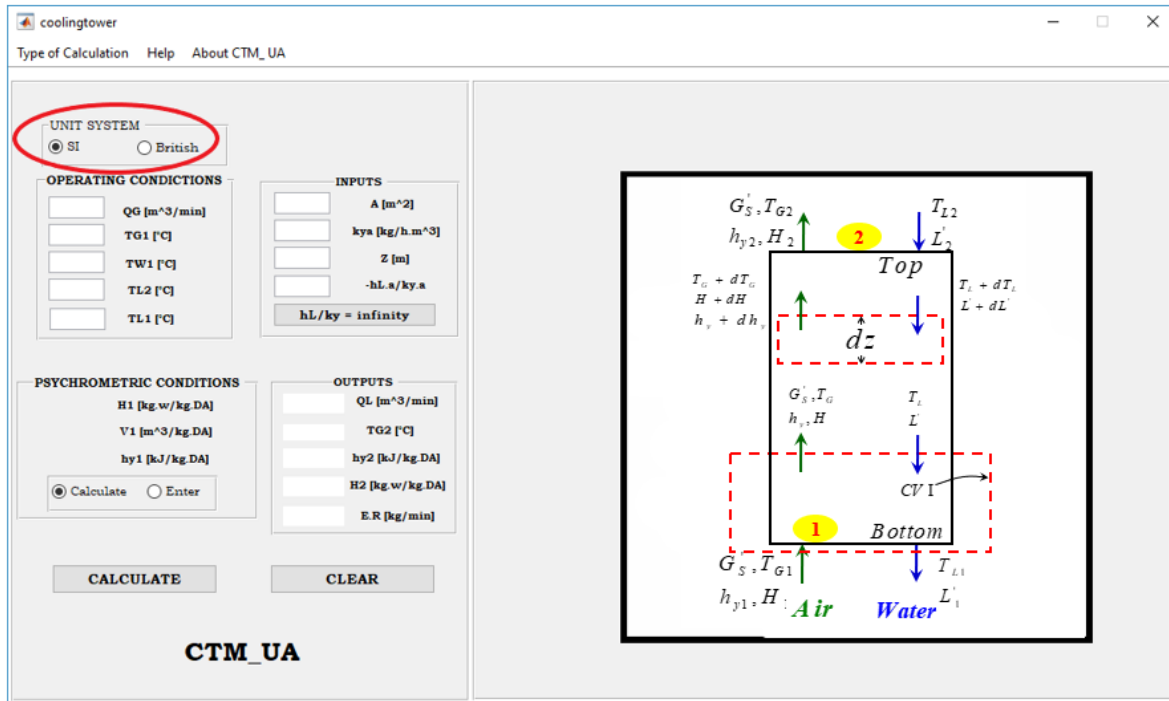


Figura 12. Cambio en el sistema de unidades.

Observe que al seleccionar entre un sistema de unidades y otro las leyendas que acompañan los cuadros para ingresar los valores de las variables cambian, por ejemplo, en el cuadro de “INPUTS” la primera casilla pasa de “A [m²]” a “A [ft²]” lo que significa que cambia de metros cuadrados a pies cuadrados.

Más abajo en la interfaz se encuentra el recuadro de las condiciones de operación “OPERATING CONDICTIONS” (ver figura 13), donde se especifican diferentes variables que definen la operación de la torre de enfriamiento, estas variables dependen del tipo de cálculo seleccionado por el usuario y más adelante se explican en detalle.

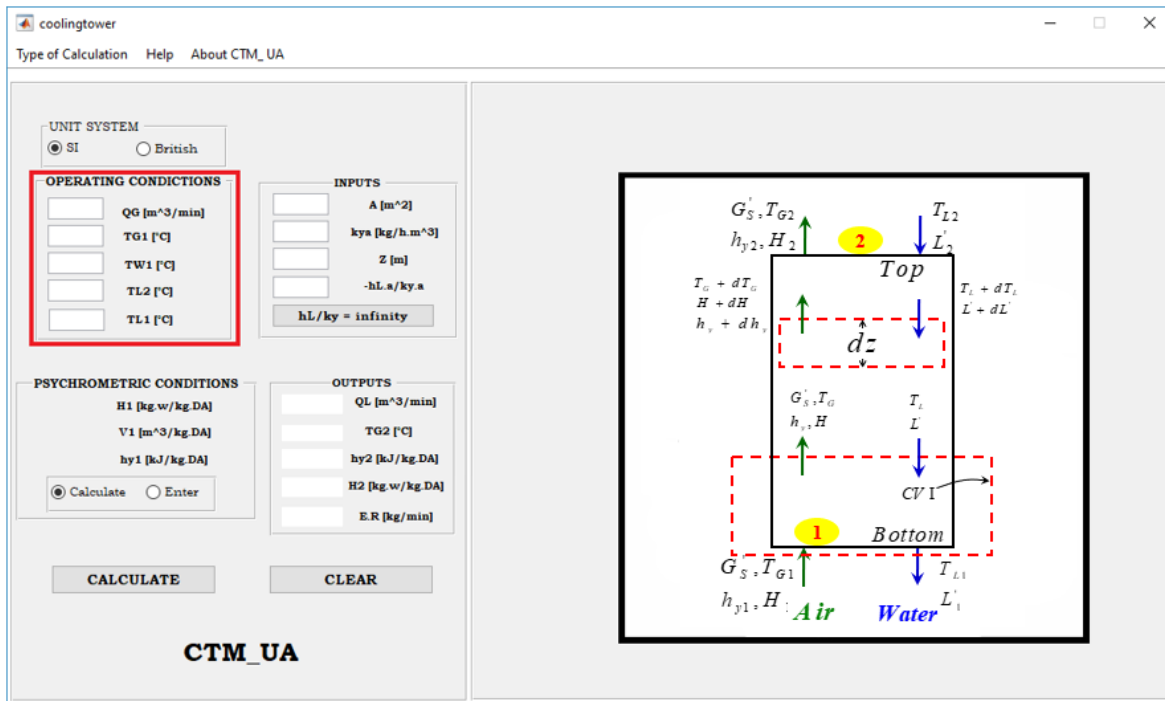


Figura 13. Condiciones de operación de la torre de enfriamiento.

Otro recuadro que debe ser especificado es el de los parámetros físicos de la torre como el área transversal o la altura, titulado “*INPUTS*”, ver figura 14.

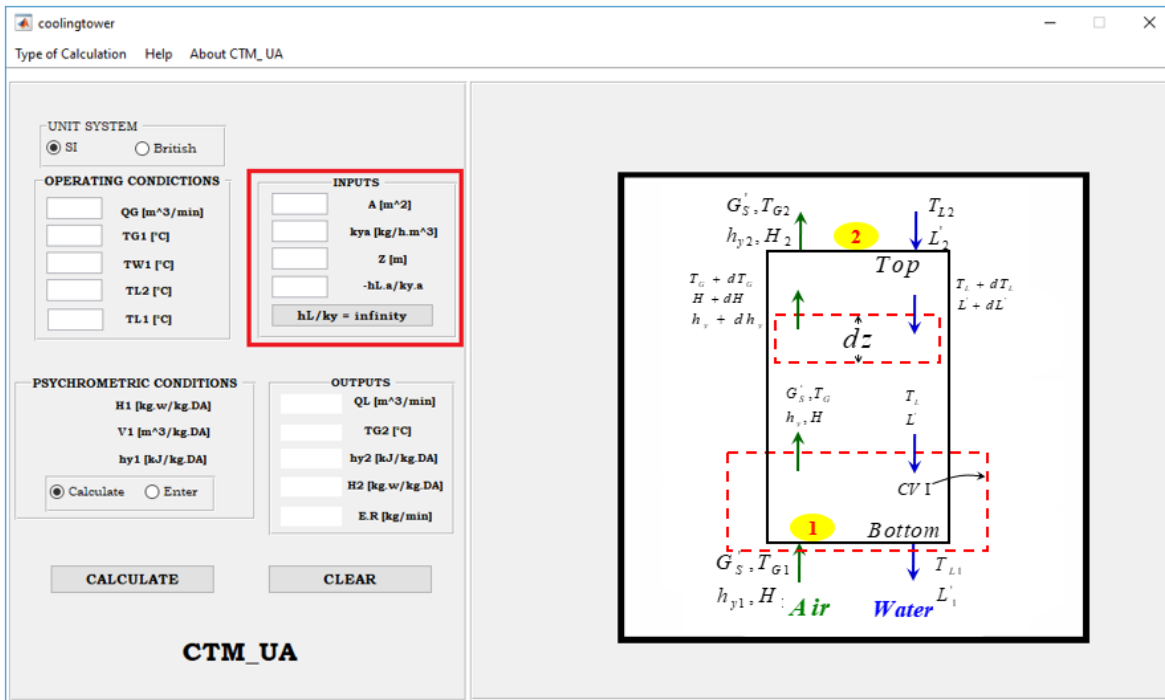


Figura 14. Parámetros físicos de la torre de enfriamiento.

La interfaz también ofrece una sección de propiedades psicrométricas del aire llamada “*PSYCHROMETRIC CONDITIONS*”, estas propiedades son muy importantes porque habla sobre las condiciones en las que está entrando el aire como su humedad absoluta H1, volumen específico V1 y la entalpía hy1. Todas estas propiedades son calculadas teniendo en cuenta el manual ASHRAE 2013 (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), tomando como partida las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire. Observe la figura figura15.

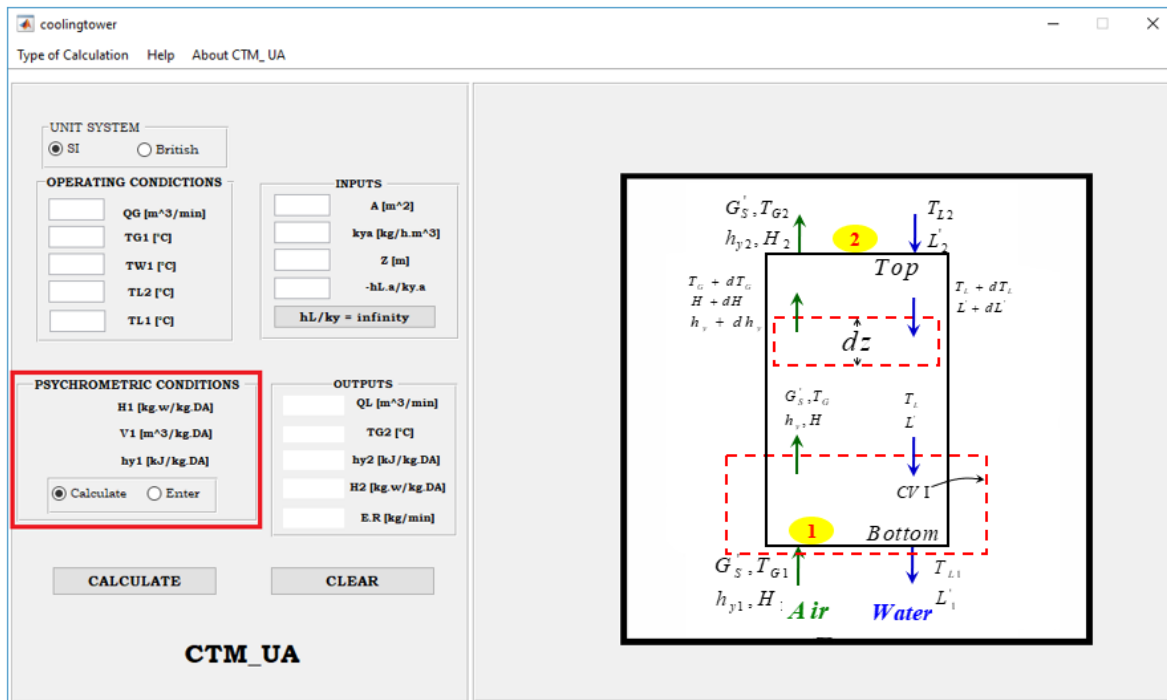


Figura 15. Condiciones psicrométricas del aire alimentado a la torre de enfriamiento.

En la figura 16 se muestra el recuadro que hace referencia a los resultados del cálculo correspondiente “*OUTPUTS*” que es donde se visualiza, a parte del calculo seleccionado, información como la temperatura de salida del aire TG2, la entalpía de salida del aire hy2, humedad de salida del aire H2 y el flujo de evaporación de agua E.R.

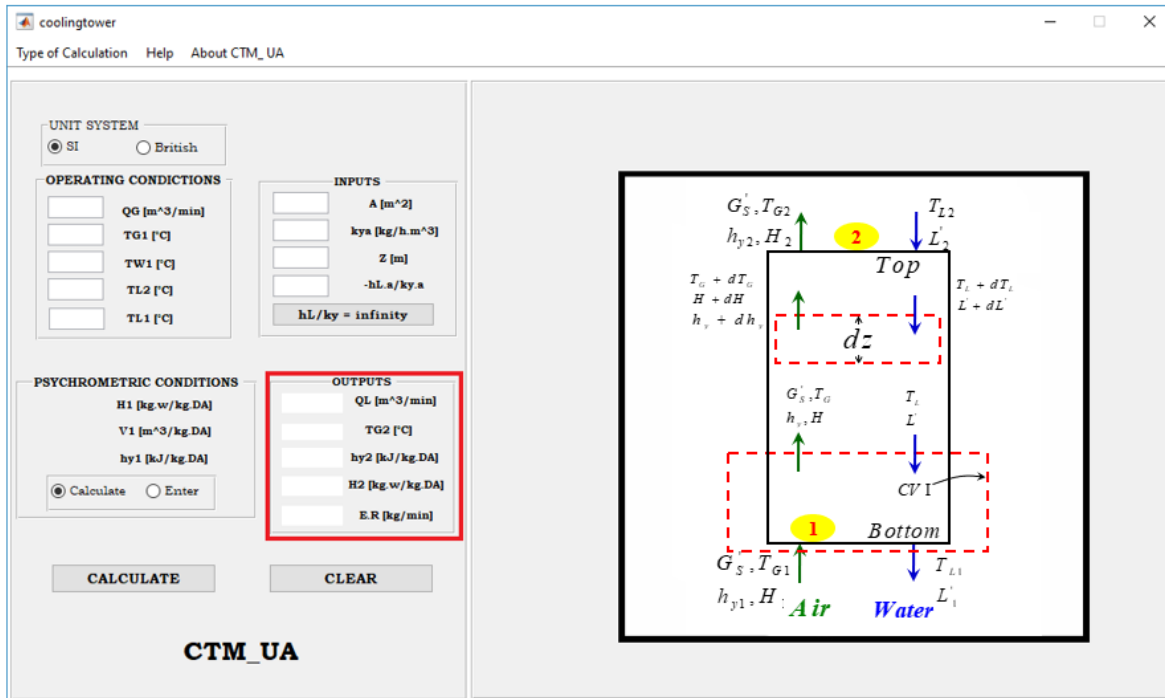


Figura 16. Resultados presentados por CTM-UA

Para realizar los cálculos la interfaz cuenta con un botón en la parte inferior, llamado “**CALCULATE**” y otro botón “**CLEAR**” que restablece la ventana principal de la interfaz, es decir, borra todos los datos que se hayan ingresado y quita los gráficos que se estén mostrando, regresando a la imagen de inicio. Una vez se presiona el botón “**CLEAR**” se debe volver a seleccionar el tipo de cálculo, porque se reasigna al primer tipo de cálculo (flujo de agua), a menos que se desee realizar el cálculo de flujo de agua. Ver figura 17.

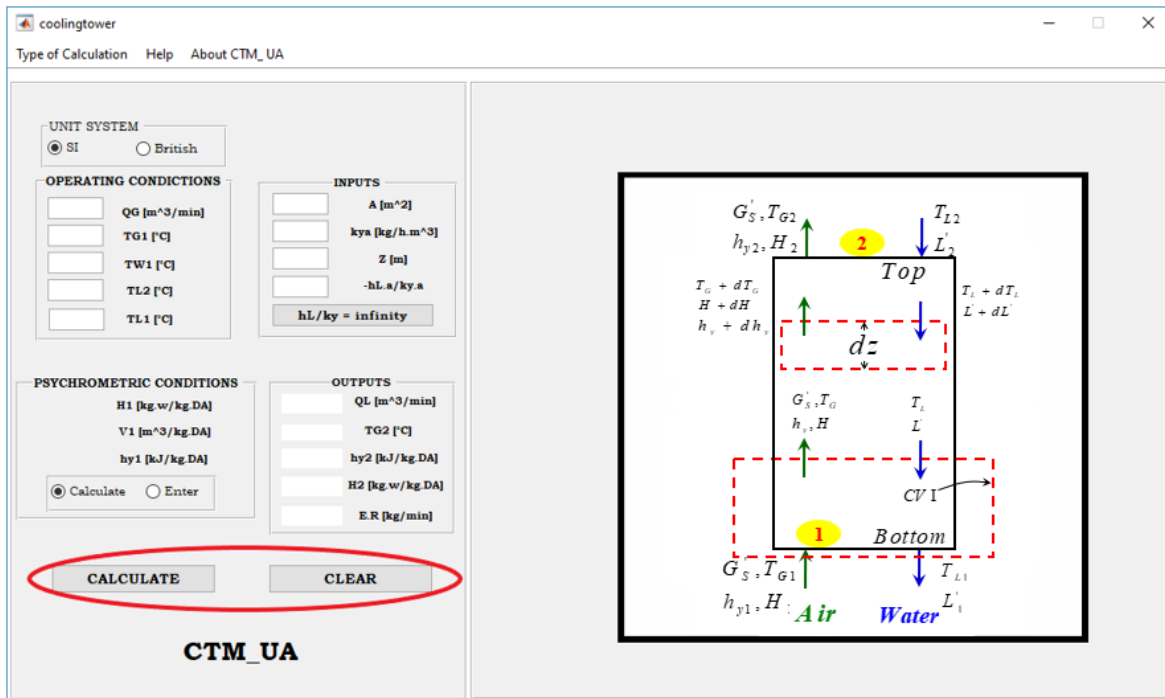


Figura 17. Botones para calcular y restablecer pantalla principal de CTM-UA.

2.3. TIPOS DE CÁLCULOS

A continuación, se explican cada uno de los cálculos que ofrece CTM-UA, las variables de entradas requeridas, sus resultados y gráficos.

2.3.1. Cantidad de agua a enfriar

Este caso es muy útil cuando se tiene una torre de enfriamiento dada con ciertos parámetros definidos, y se necesita enfriar una corriente de agua desde una temperatura de entrada TL2 hasta una temperatura deseada TL1, pero se quiere determinar cuál es el flujo volumétrico máximo de agua que se puede enfriar teniendo en cuenta las condiciones en las que opera la torre existente.

Por defecto este es el tipo de cálculo que viene seleccionado, por lo tanto, no es necesario ir al menú “Types of Calculation”, pero sí es necesario si previamente seleccionó otro tipo de cálculo. Las condiciones de operación para este tipo de cálculo son: QG flujo volumétrico de aire, TG1 temperatura de entra del aire, TW1 temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada, TL2 y TL1. En cuanto a los “INPUTS” se requiere el área transversal de la torre A, el coeficiente volumétrico de transferencia de masa kya, la altura de la torre Z y la relación psicrométrica aparente hL.a/ky.a (para todos los cálculos se debe ingresar el signo menos), cabe resaltar que existen casos en los que la relación psicrométrica aparente tiene un valor que tiende a infinito y se produce cuando la transferencia de calor domina sobre la transferencia de masa, es decir, $kya \ll hLa$, para éste caso en particular, se debe hacer clic sobre el botón “hL/ky = infinity”. Recuerde que las unidades de todas estas variables dependen del sistema de unidades elegido y que por defecto se trabaja en el sistema internacional de unidades.

Luego de ingresar todos los valores anteriormente mencionados se hace clic sobre el botón “*CALCULATE*”.

Ejemplo: Se tiene una torre de enfriamiento de 3 m de altura con una sección de área transversal de 2 m², tiene capacidad para un flujo máximo de aire de 63 m³/min a 21 °C y una temperatura de bulbo húmedo de 16 °C. Se desea enfriar una corriente de agua desde 35 °C hasta 22°C. Determine la cantidad máxima de agua que se podría enfriar utilizando la torre a las condiciones descritas. Experimentalmente se ha determinado que el coeficiente volumétrico de transferencia de masa tiene un valor promedio de 1000 kg/h·m³ y que la transferencia de masa es muy pequeña en comparación con la transferencia de calor.

Para solucionar el problema lo primero es ingresar los datos en la interfaz, como se observa en la figura 18. Recuerde que en este caso se debe presionar el botón para la relación psicrométrica aparente cuando tiende a infinito.

The screenshot shows the 'coolingtower' software window. It has a menu bar with 'Type of Calculation', 'Help', and 'About CTM-UA'. The main area is divided into several sections:

- UNIT SYSTEM:** Radio buttons for 'SI' (selected) and 'British'.
- OPERATING CONDITIONS:** Input fields for air flow (63 m³/min), air temperature (21 °C), wet-bulb temperature (16 °C), cooling water inlet temperature (35 °C), cooling water outlet temperature (22 °C), and a green button for 'kL/ky = infinity'.
- PSYCHROMETRIC CONDITIONS:** Input fields for enthalpy (H1, H2), wet-bulb temperature (TW1, TW2), and a 'Calculate' button.
- INPUTS:** Input fields for area (2 m²), mass transfer coefficient (1000 kg/h·m³), height (3 m), and a green button for 'kL/ky = infinity'.
- OUTPUTS:** Output fields for water flow (QL), air temperature (TG2), humidity (hy2), enthalpy (H2), and evaporation rate (ER).

At the bottom, there are 'CALCULATE' and 'CLEAR' buttons, and the text 'CTM-UA'.

On the right, a schematic diagram of a cooling tower is shown. It is a vertical rectangular box with 'Top' and 'Bottom' labels. Air flows upwards (indicated by green arrows) and water flows downwards (indicated by blue arrows). A differential control volume 'dz' is highlighted in the center. Various thermodynamic and mass transfer variables are labeled at the top and bottom of the tower, including air flow (G_s, T_{G2}), water flow (L₂), temperatures (T₂, T_{L2}), humidity (h_{y2}, H₂), and enthalpy (T₂ + dT₂, H₂ + dH₂).

Figura 18. Datos de entrada para el cálculo del flujo de agua.

Una vez ingresados todos los datos necesarios, se procede a hacer clic sobre el botón “*CALCULATE*” y se obtienen los resultados que se presentan en la figura 19.

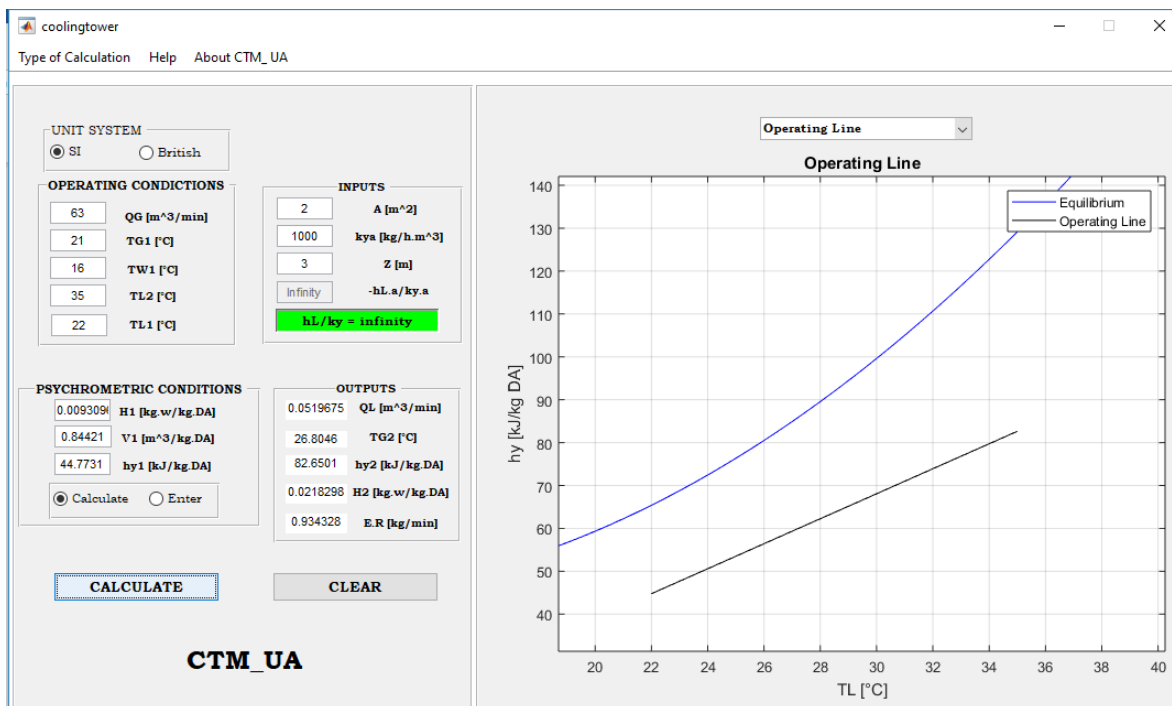


Figura 19. Resultados y línea de operación.

Como se observa en la figura 19, el programa nos presenta los resultados las propiedades psicrométricas del aire a la entrada, en el recuadro de “*OUTPUTS*” se encuentran diferentes resultados entre los cuales se tiene el caudal de agua que se puede enfriar, que en este caso es de **0.0519675 m³/min** que sería la respuesta del problema. Sin embargo, el programa nos presenta también la temperatura de salida del aire TG2 con un valor de **26.8048 °C**, entalpía del aire a la salida hy2 igual a **82.6501 kJ/kg-DA** (kg-DA hace referencia a kilogramos de aire seco “dry air”), humedad del aire a la salida de la torre H2 con valor de **0.0218298 kg-w/kg-DA** (kilogramos de agua por kilogramos de aire seco) y un flujo másico de evaporación de agua E.R de **0.934328 kg/min**. Se observa también que aparece un gráfico titulado “*Operating Line*” que muestra la línea de operación de la torre y la curva de equilibrio agua-aire, esta línea representa la variación en la entalpía del aire a medida que se enfría el agua y sirve para describir el intervalo de operación de la torre. Observe además que aparece un menú desplegable en la parte superior del gráfico que es donde se elige el tipo de gráfico que se quiere visualizar, en la figura 20 se encuentran los diferentes tipos de gráficos que se pueden visualizar, dentro de los que tenemos línea de operación “*Operating Line*”, perfil de temperatura del aire “*Temperature Profile*” y perfil de humedad “*Humidity Profile*”.

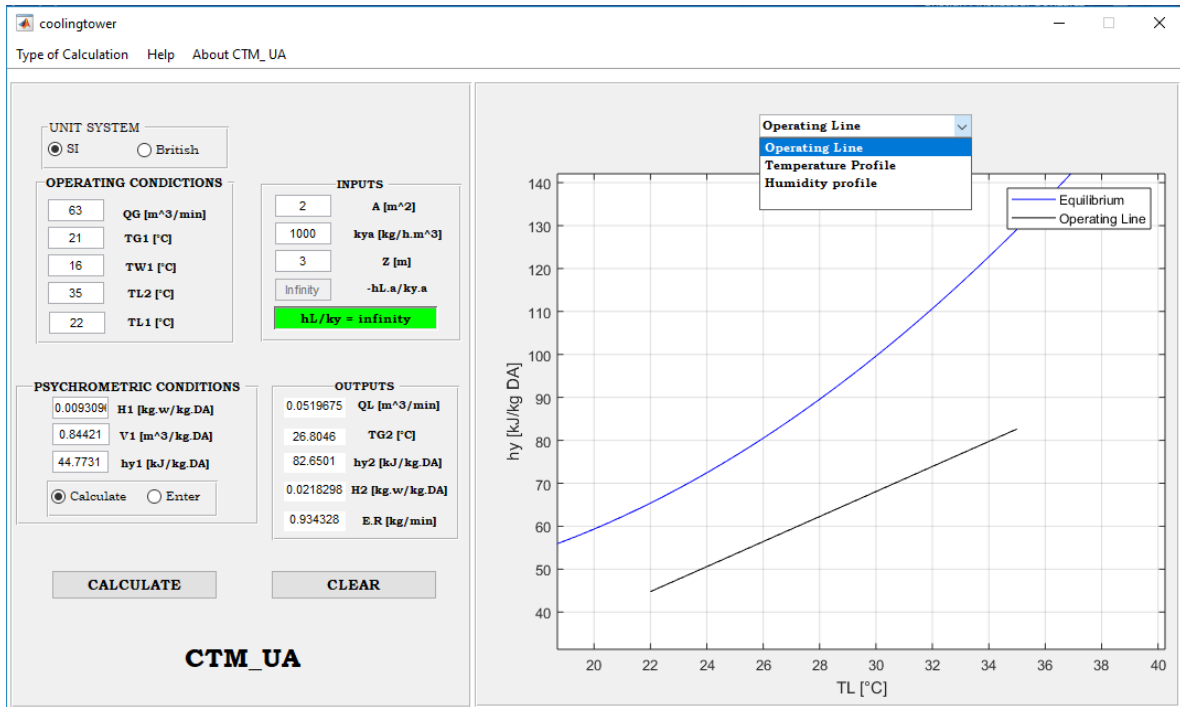


Figura 20. Opciones entre los tipos de gráficos que se pueden visualizar.

Al seleccionar en el menú desplegable la opción “*Temperature Profile*” se puede visualizar el perfil de temperatura del aire, como se puede ver en la figura 21. Este tipo de gráfico muestra cómo varía la temperatura del aire a través de la línea de operación de la torre y se realiza utilizando el método de Mickley.

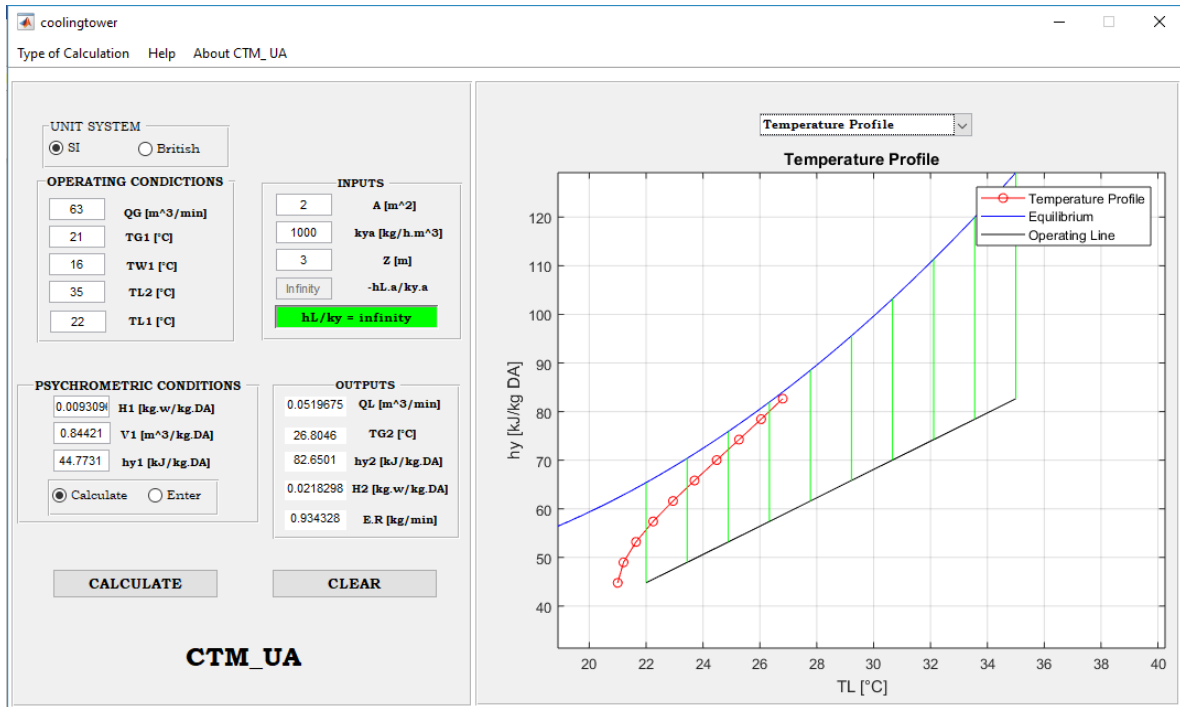


Figura 21. Perfil de temperatura.

La última opción del menú desplegable es el perfil de humedad, que ofrece una vista de cómo varía la humedad del aire en función de la altura de la torre, como se observa en la figura 22.

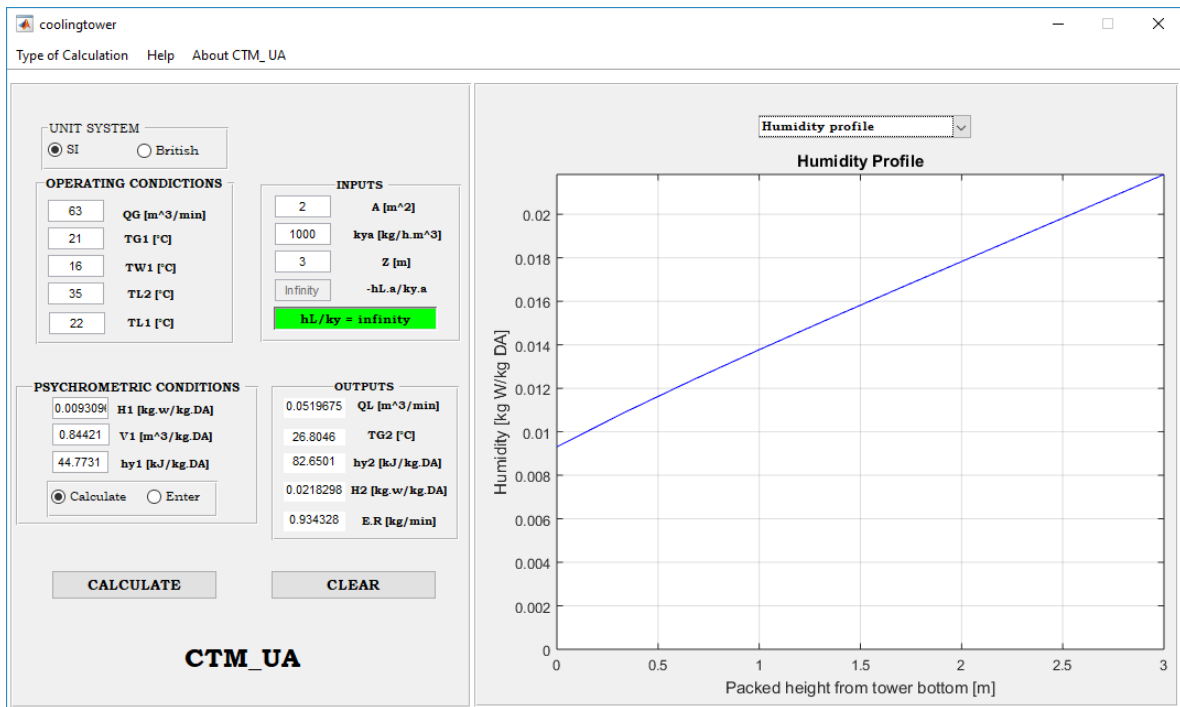


Figura 22. Perfil de humedad.

En la parte de anexos puede encontrar un algoritmo general sobre la solución de este tipo de cálculos y también se presentan las ecuaciones utilizadas.

2.3.2. Altura de la torre

Este tipo de cálculo es muy útil cuando se va a diseñar una torre de enfriamiento para cumplir con necesidades determinadas (cantidad de agua a enfriar, temperatura de entrada y salida, flujo de aire máximo y las condiciones de entrada del aire). Con este cálculo se tiene un indicio sobre la altura de la torre que cumple con los requerimientos de enfriamiento.

Para realizar este cálculo se debe seleccionar en el menú “*Types of Calculation*” la opción “*Tower Heighth*” que corresponde al cálculo de la altura de la torre. Observe cómo se resaltan en color rojo una variable en el recuadro de “*INPUTS*” QL que corresponde al flujo volumétrico de agua que antes era un cálculo y ahora pasa a ser una entrada, esto se hace con el fin de evidenciar que se está realizando otro tipo de cálculo. También, se resalta en “*OUTPUTS*” la variable Z que corresponde a la altura de la torre y pasa de ser una entrada a un cálculo. En cuanto a este tipo de cálculo todo funciona igual que para el cálculo explicado anteriormente (flujo de agua), lo único que cambia son las dos variables que se acaban de mencionar (Z y QL). Ver figura 23.

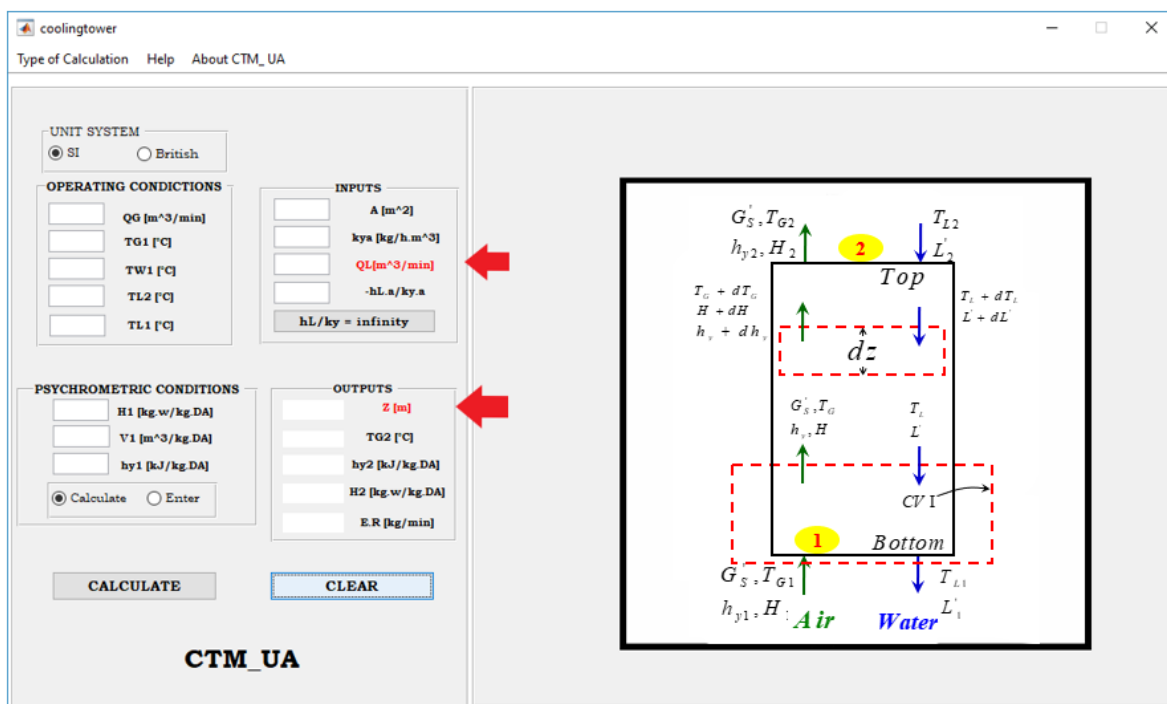


Figura 23. Cambio en las variables de entrada y salida para el cálculo de altura de la torre.

En este caso no se presenta ejemplo, pero se asigna al usuario realizar el siguiente ejercicio siguiendo los pasos explicados en el ejemplo de flujo de agua.

Se desea enfriar una corriente de agua de 10 m³/h desde 35 °C hasta 20 °C. Para ello se requiere una torre de enfriamiento, usted como ingeniero de proyectos es asignado para

dimensionar ésta. En experimentos se ha determinado que el coeficiente de transferencia de masa para el relleno de la torre a las condiciones esperadas tiene un valor promedio de $1200 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-3}$, también por cuestiones de espacio la torre puede tener un área de sección transversal de máximo 2 m^2 y un flujo de aire máximo de $9000 \text{ m}^3/\text{h}$ a 22°C y una temperatura húmeda de 13°C . Es necesario hallar las condiciones de salida del aire (temperatura y humedad), la altura de la torre y el flujo de agua que se evapora. Los cálculos deben ser realizados para diferentes valores de h_L/k_y , con el fin de analizar cómo este parámetro afecta la altura de la torre y las condiciones de salida del aire. En cada caso es necesario realizar los perfiles de temperatura del aire y el perfil de humedad de la torre. $h_L/k_y = \infty$ y $h_L/k_y = 10$

De la misma forma en los anexos se muestra un algoritmo general de solución de este tipo de cálculo y las ecuaciones utilizadas.

2.3.3. Temperatura de salida del agua

Este tipo de cálculo es necesario cuando se tiene una corriente de agua caliente de flujo conocido y se dispone de una torre de enfriamiento con características definidas, entonces se desea saber a qué temperatura va a salir el agua de la torre especificando las condiciones de entrada.

Para realizar este cálculo se debe seleccionar en el menú “*Types of Calculation*” la opción “*Final Water Temperature*” que corresponde al cálculo de la temperatura de salida del agua. Observe cómo se resaltan en color rojo una variable en el recuadro de “*OPERATING CONDICTIONS*” QL que corresponde al flujo volumétrico de agua que para otros casos es un cálculo y ahora pasa a ser una entrada, esto se hace con el fin de evidenciar que se está realizando otro tipo de cálculo. También, se resalta en “*OUTPUTS*” la variable TL1 que corresponde a la temperatura de salida del agua que pasa de ser una entrada a un cálculo. En cuanto a este tipo de cálculo todo funciona igual que para el cálculo explicado anteriormente (flujo de agua), lo único que cambia son las dos variables que se acaban de mencionar (TL1 y QL). Ver figura 24.

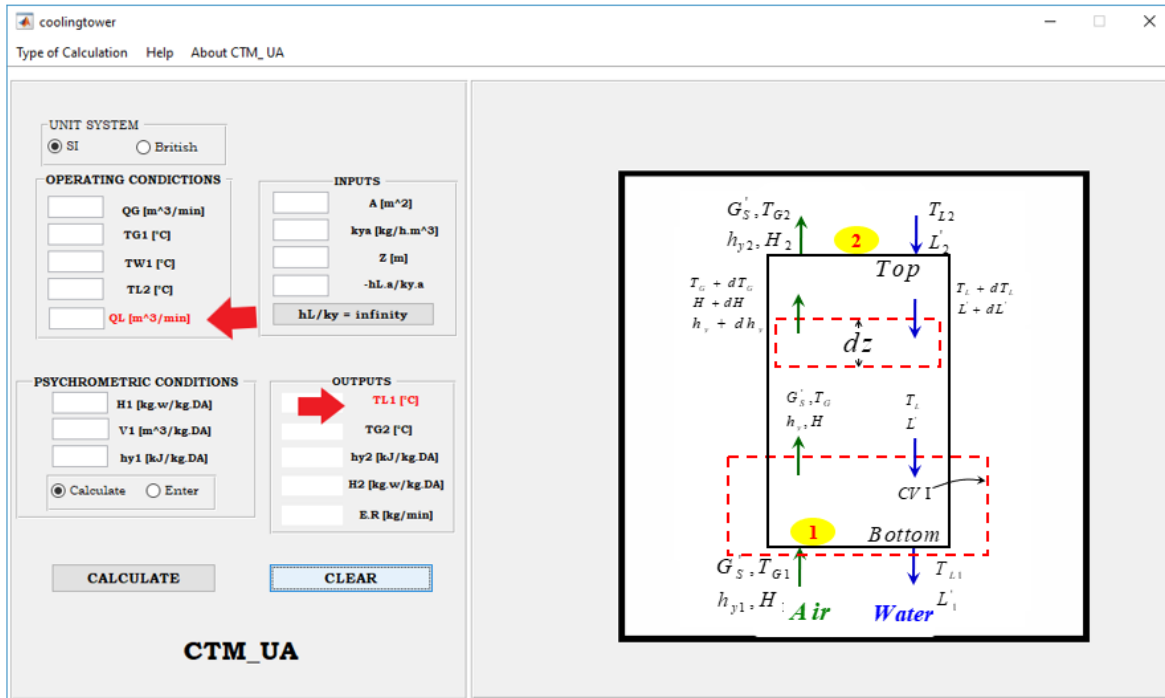


Figura 24. Cambio en las variables de entrada y salida para el cálculo de temperatura final del agua.

2.3.4. Coeficiente de transferencia de masa

Este tipo de cálculo es útil cuando se quiere hallar el coeficiente volumétrico de transferencia de masa para una torre de enfriamiento determinada que opera a unas condiciones definidas (flujos de aire y agua, temperaturas y dimensiones de la torre). Con este tipo de cálculo se puede observar la influencia que tienen las condiciones de operación y las dimensiones de la torre en cuanto al coeficiente de transferencia de masa.

Para realizar este cálculo se debe seleccionar en el menú “Types of Calculation” la opción “Mass Transfer Coefficient” que corresponde al cálculo del coeficiente volumétrico de transferencia de masa. Observe cómo se resaltan en color rojo una variable en el recuadro de “INPUTS” QL que corresponde al flujo volumétrico de agua que para otros casos es un cálculo y ahora pasa a ser una entrada, esto se hace con el fin de evidenciar que se está realizando otro tipo de cálculo. También, se resalta en “OUTPUTS” la variable kya que corresponde al coeficiente volumétrico de transferencia de masa que pasa de ser una entrada a un cálculo. En cuanto a este tipo de cálculo todo funciona igual que para el cálculo explicado anteriormente (flujo de agua), lo único que cambia son las dos variables que se acababan de mencionar (kya y QL). Ver figura 25.

coolingtower

Type of Calculation Help About CTM_UA

UNIT SYSTEM

☒ SI ☐ British

OPERATING CONDITIONS

QG [m³/min]

TG1 [°C]

TW1 [°C]

TL2 [°C]

TL1 [°C]

PSYCHROMETRIC CONDITIONS

H1 [kg.w/kg.DA]

V1 [m³/kg.DA]

hy1 [kJ/kg.DA]

☒ Calculate ☐ Enter

CALCULATE

CLEAR

CTM_UA

INPUTS

A [m²]

QL [m³/min]

Z [m]

-hL.a/ky.a

hL/ky = infinity

OUTPUTS

kya [kg/h.m²]

TG2 [°C]

hy2 [kJ/kg.DA]

H2 [kg.w/kg.DA]

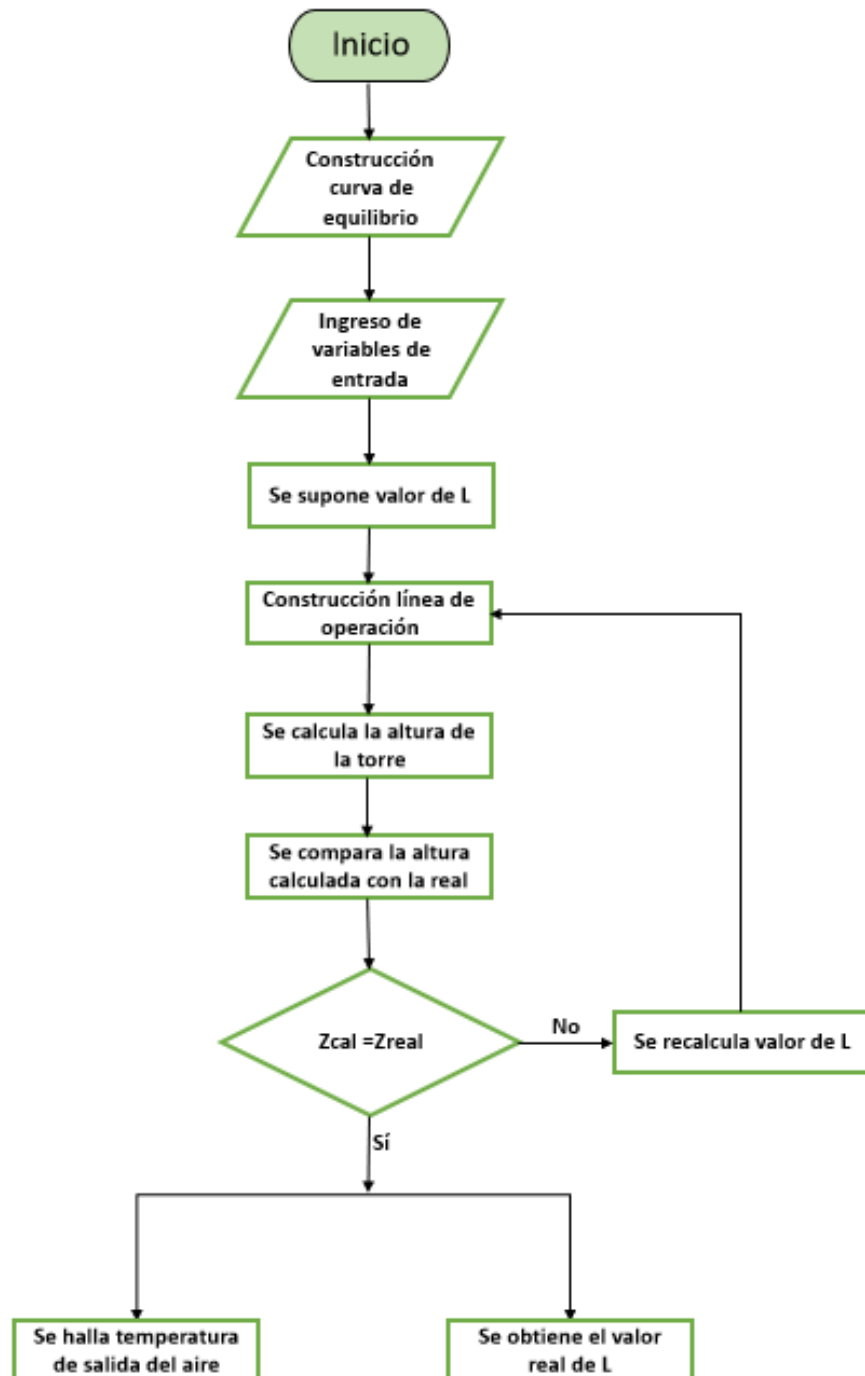
E.R [kg/min]

The diagram illustrates a vertical cooling tower section. Air flows upwards from the bottom (labeled 'Bottom' with a yellow circle '1') to the top (labeled 'Top' with a yellow circle '2'). Water flows downwards from the top to the bottom. At the bottom, air enters with properties G_s, T_{G1} and h_{y1}, H . At the top, air exits with properties G_s', T_{G2} and h_{y2}, H_2 . Water enters at the top with properties T_{L2} and L_2 , and exits at the bottom with properties T_{L1} and L_1 . A differential element dz is shown within the tower. The diagram also includes labels for $T_G + dT_G$, $H + dH$, $h_y + dh_y$, $T_L + dT_L$, and $L + dL$. A control volume $CV1$ is indicated at the bottom.

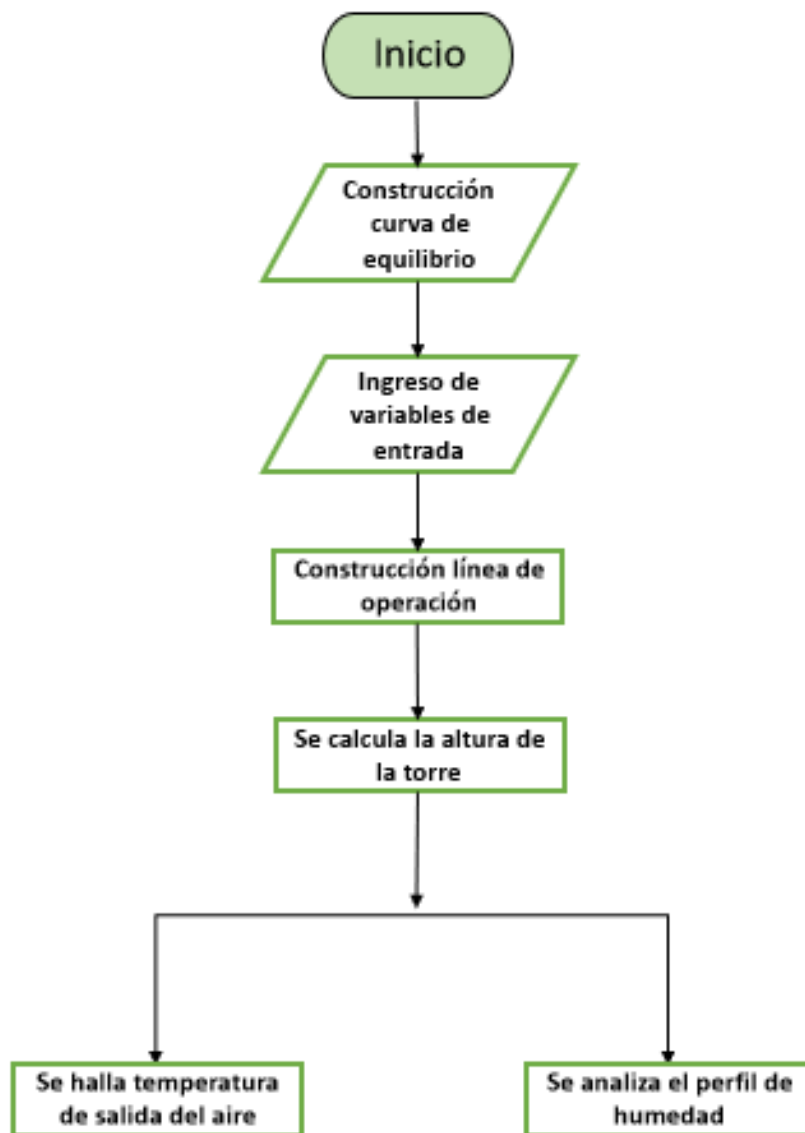
Figura 25. Cambio en las variables de entrada y salida para el cálculo de temperatura final del agua.

ANEXOS

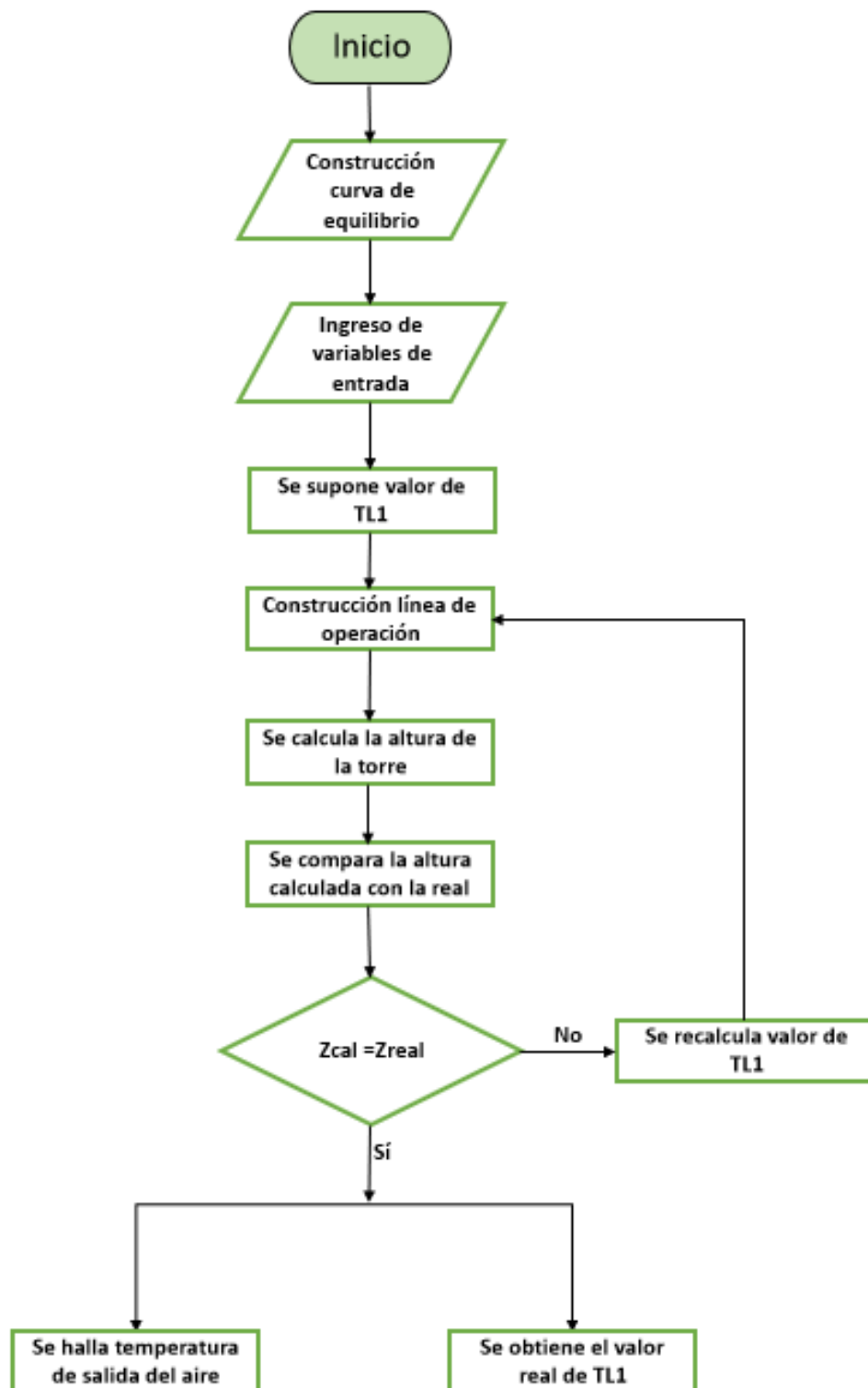
ANEXO 1: Algoritmo de solución para el cálculo de flujo volumétrico de agua



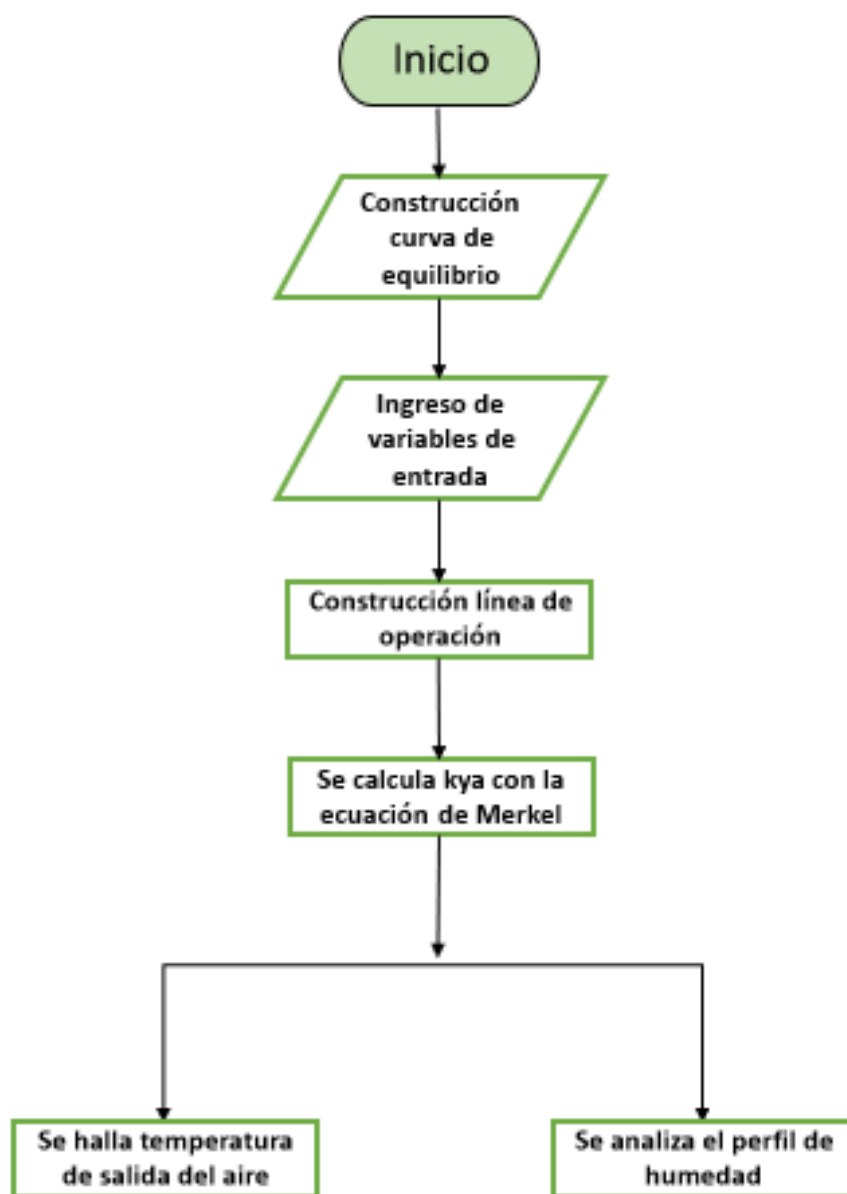
ANEXO 2: Algoritmo para el cálculo de la altura de la torre de enfriamiento



ANEXO 3: Algoritmo para el cálculo de la temperatura final del agua.



ANEXO 4: Algoritmo para el cálculo del coeficiente volumétrico de transferencia de masa.



ANEXO 5: Ecuaciones utilizadas para los diferentes tipos de cálculos

Ecuación de Merkel:

$$\frac{k_y a_M Z_T}{L} = \int_{T_{L1}}^{T_{L2}} \frac{C_{P,w}^{(L)}(T_L) dT_L}{[H_G^{sat}(T_L) - H_G(T_G, Y_w)]} \quad (1)$$

Curva de equilibrio

$$h_{eq1} = 0.1251T^2 - 2.2269T + 53.84 \quad (2)$$

Con $4 < T < 37$ °C

$$h_{eq2} = 0.0144T^3 - 1.7686T^2 + 82.029T - 1203 \quad (3)$$

Con $37 < T < 73$ °C

$$h_{eq3} = 0.2689T^3 - 58.157T^2 + 4254T - 104349 \quad (4)$$

Con $73 < T < 95$ °C

Ecuación de Antoine

$$\log(P) = A - \frac{B}{C + T} \quad (5)$$

Con:

A=5.11564

B=1687.537

C=230.170

Humedad de saturación

$$H_s = \frac{0.621945 * P}{101.325 - P} \quad (6)$$

Humedad absoluta del aire a la entrada de la torre:

$$H_a = \frac{(hlg - 2.326e3 * TW1) * H_s - c_{air} * (TG1 - TW1)}{hlg + cw * TG1 - 4.186e3 * TW1} \quad (7)$$

Con:

hlg=2501000 Entalpía de vaporización [J/kg]

c_{air}=1006 Capacidad calorífica del aire [J/kg]

cw=1860 Capacidad calorífica del agua [J/kg]

Entalpía del aire a la entrada de la torre

$$hy1 = (c_{air} * TG1 + H_a * (hlg + cw * TG1)) * 0.001 \quad (8)$$

volumen húmedo del aire a la entrada de la torre

$$v_1 = \left(\left(\frac{1}{29} \right) + \left(\frac{Ha}{18} \right) \right) * (0.082 * (TG1 + 273.15)) \quad (9)$$