

ANEXOS

ANEXO I

PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR

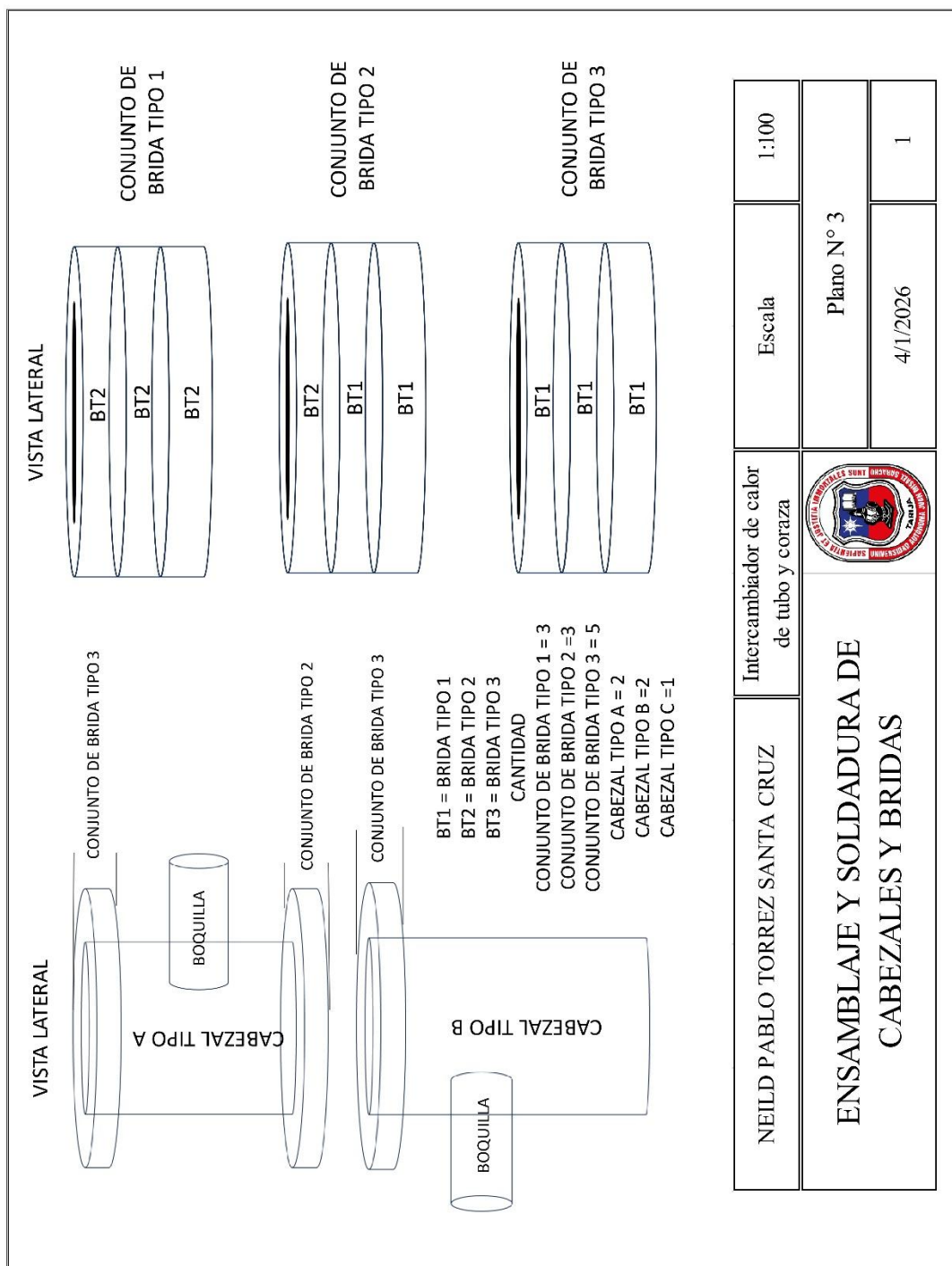
Plano N° 1.- Cortes y perforaciones de plancha de acero inoxidable

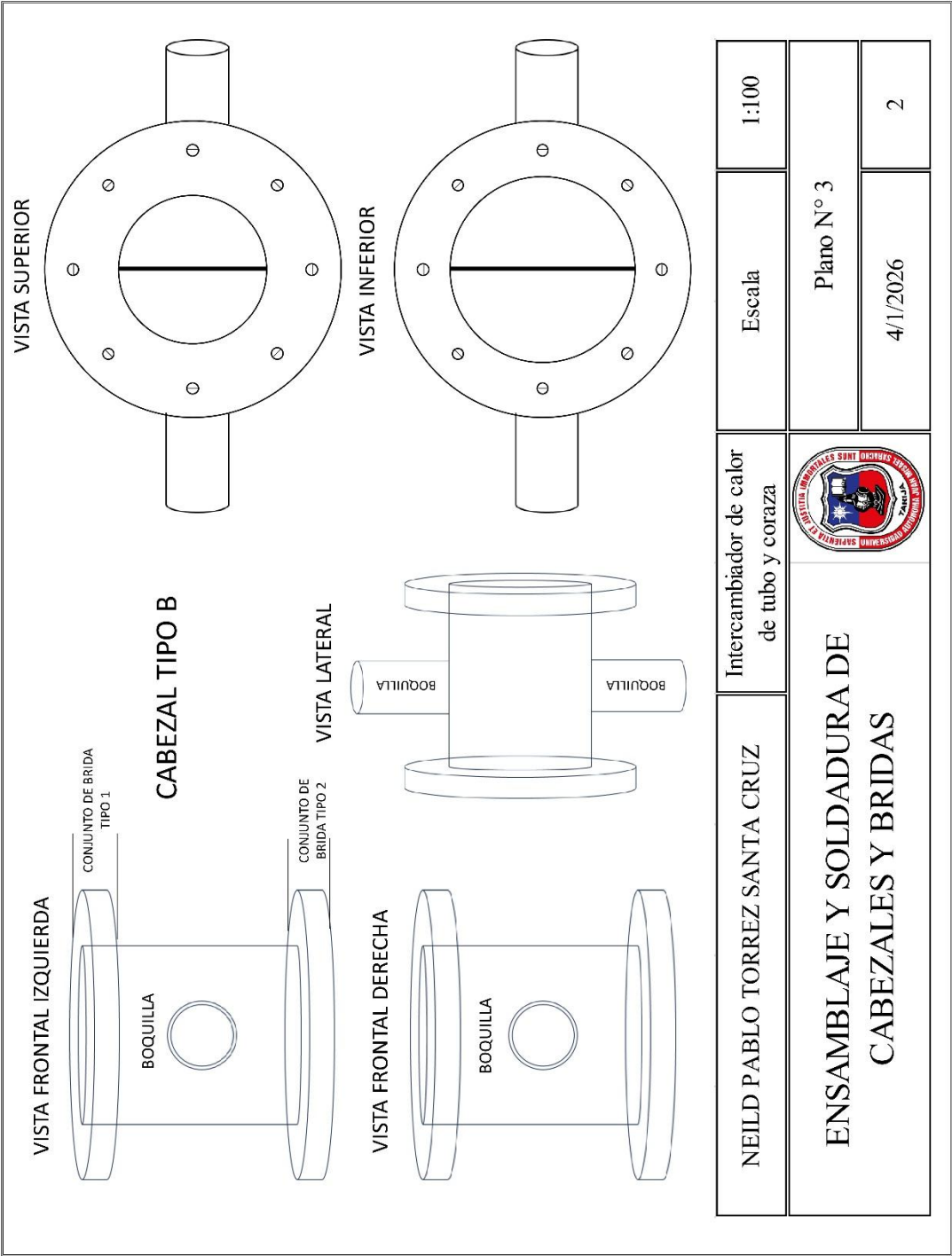
Plano N° 2.- Cortes y perforaciones de tubos de acero inoxidable de 1-4 pulgadas

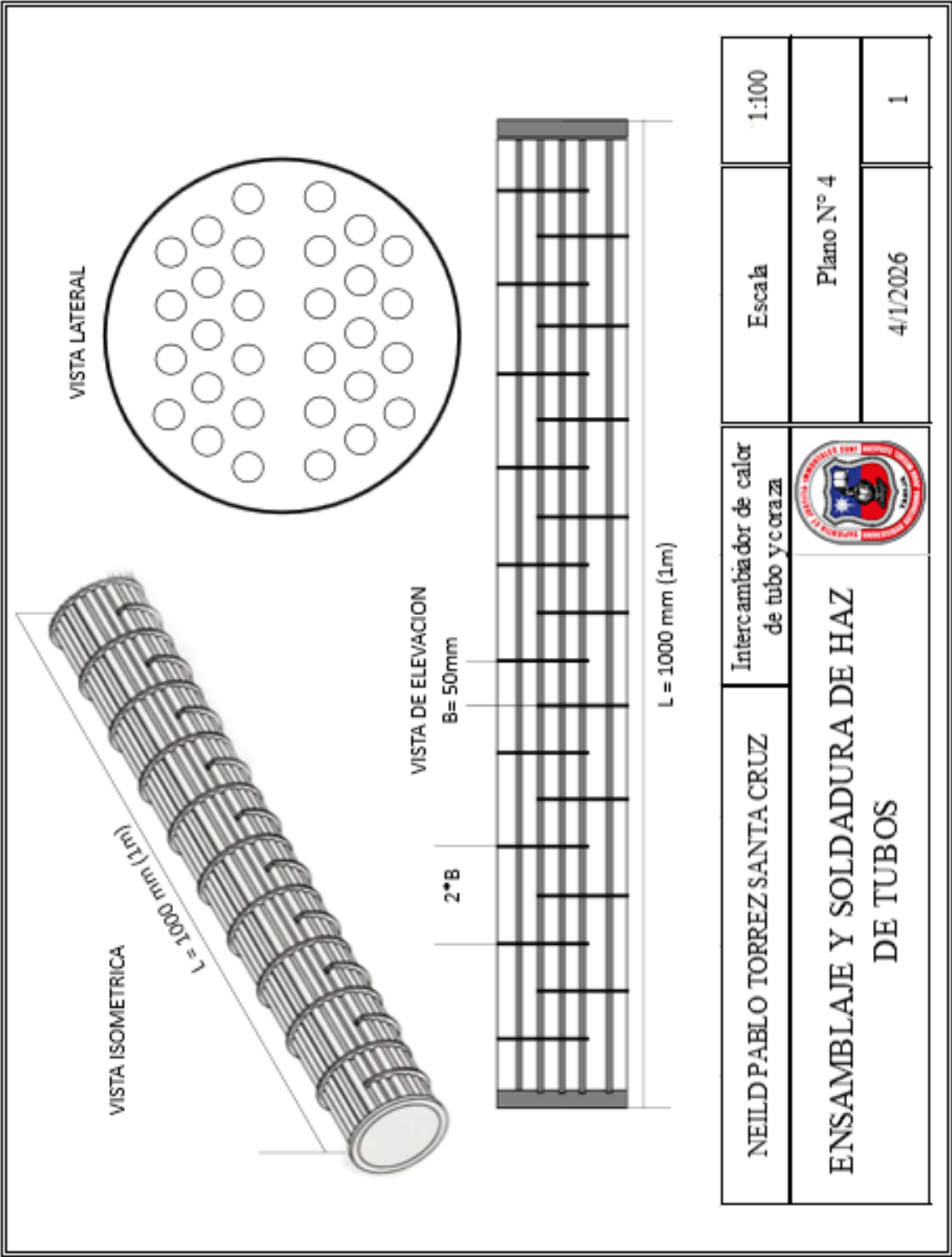
Plano N° 3.- Ensamblaje y soldadura de cabezales y bridas

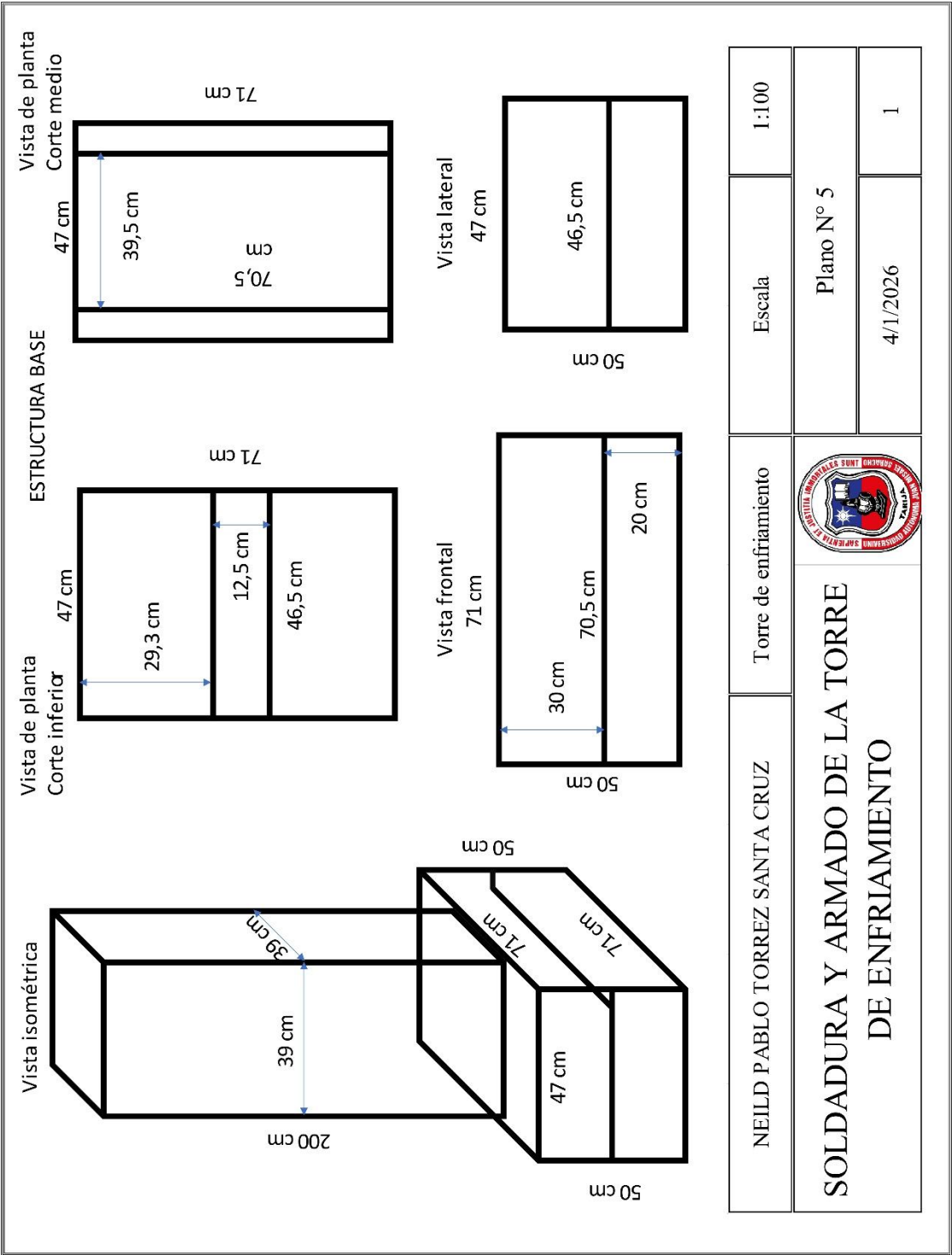
Plano N° 4.- Ensamblaje y soldadura de haz de tubos

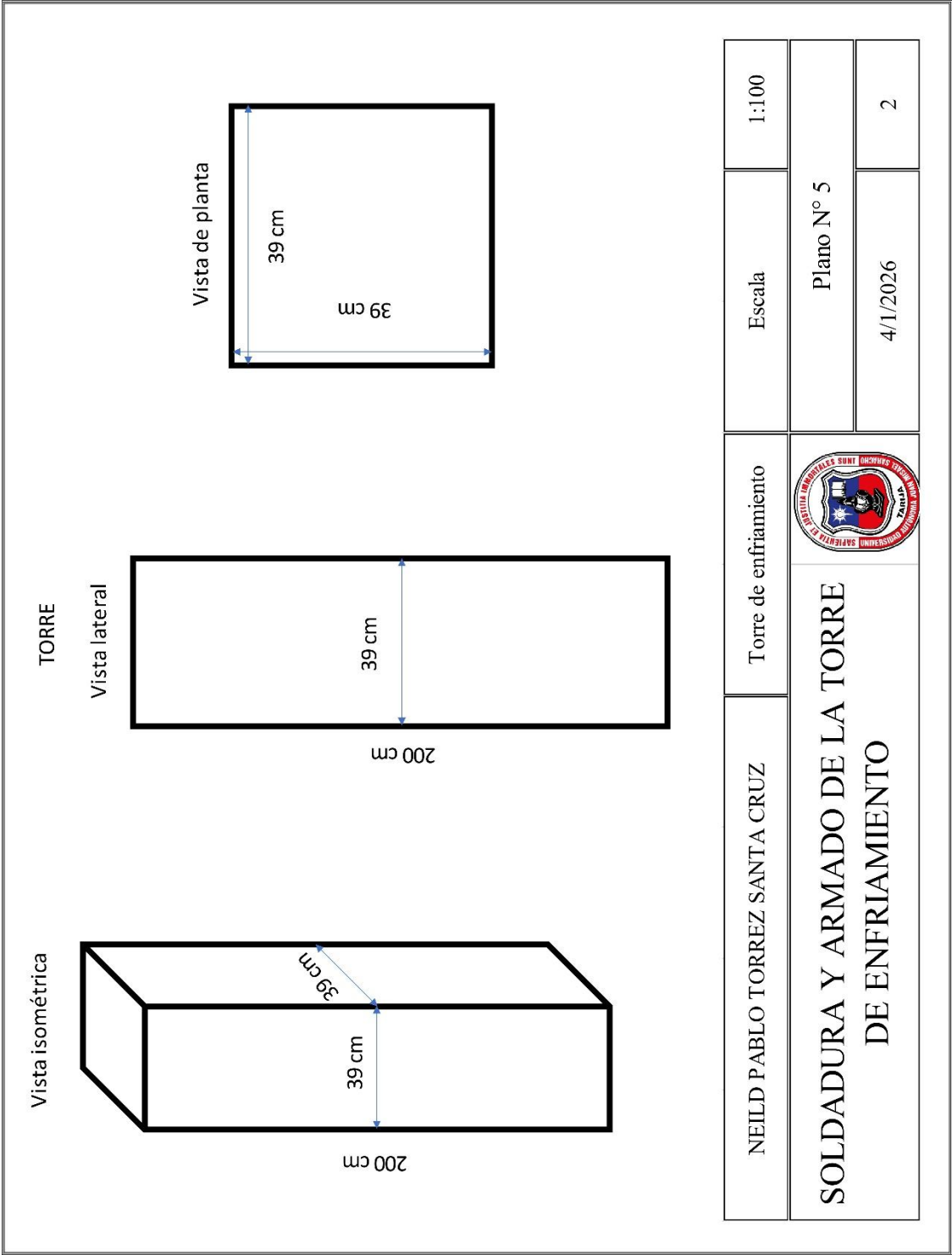
Plano N° 5.- Soldadura y armado de la torre de enfriamiento











ANEXO II

CÓDIGO DE ARDUINO

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// Configuración de pines
const int PIN_ONEWIRE = 2;    // Bus OneWire para los 4 DS18B20
const int PIN_FLUJO1 = 3;     // Primer sensor de flujo
const int PIN_FLUJO2 = 4;     // Segundo sensor de flujo

// Inicializar sensores
OneWire oneWire(PIN_ONEWIRE);
DallasTemperature sensores(&oneWire);

// Variables para los sensores de flujo (uso de interrupciones/volátiles)
volatile unsigned int pulsosFlujo1 = 0;
volatile unsigned int pulsosFlujo2 = 0;
unsigned long ultimoConteoFlujo1 = 0;
unsigned long ultimoConteoFlujo2 = 0;
float flujo1 = 0.0;
float flujo2 = 0.0;

// Variables para control de tiempo
unsigned long ultimaLecturaTemp = 0;
unsigned long ultimaLecturaFlujo = 0;
const int INTERVALO_TEMP = 1000; // 1 segundo para temperaturas
const int INTERVALO_FLUJO = 500; // 500ms para cálculo de flujo

// Variables para almacenar temperaturas
float temp1 = 0.0, temp2 = 0.0, temp3 = 0.0, temp4 = 0.0;

```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Iniciando sistema de monitoreo...");

  // Inicializar sensor de temperatura
  sensores.begin();
  int numSensores = sensores.getDeviceCount();

  Serial.print("Sensores DS18B20 encontrados: ");
  Serial.println(numSensores);

  if (numSensores < 4) {
    Serial.print("ADVERTENCIA: Se esperaban 4 sensores, encontrados ");
    Serial.println(numSensores);
  }

  // Configurar pines de flujo con interrupciones
  pinMode(PIN_FLUJO1, INPUT_PULLUP);
  pinMode(PIN_FLUJO2, INPUT_PULLUP);

  // Configurar interrupciones para contar pulsos (si el pin lo permite)
  // Nota: Los pines 2 y 3 tienen interrupciones hardware en Arduino UNO
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_FLUJO1), contarPulsoFlujo1, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_FLUJO2), contarPulsoFlujo2, FALLING);

  Serial.println("Sistema listo - Lecturas continuas activadas");
  Serial.println("=====");
}

```

```

// Funciones de interrupción para contar pulsos
void contarPulsoFlujo1() {
    pulsosFlujo1++;
}

void contarPulsoFlujo2() {
    pulsosFlujo2++;
}

// Función para calcular flujo basado en pulsos acumulados
void calcularFlujos() {
    static unsigned long ultimoCalculo = 0;
    unsigned long ahora = millis();
    unsigned long tiempoTranscurrido = ahora - ultimoCalculo;

    if (tiempoTranscurrido >= INTERVALO_FLUJO && ultimoCalculo > 0) {
        // Calcular pulsos por segundo
        float pulsosPorSegundo1 = (pulsosFlujo1 * 1000.0) / tiempoTranscurrido;
        float pulsosPorSegundo2 = (pulsosFlujo2 * 1000.0) / tiempoTranscurrido;

        // Calcular flujo en L/min (fórmula YF-S402)
        flujo1 = (pulsosPorSegundo1 / 7.5) * 60.0;
        flujo2 = (pulsosPorSegundo2 / 7.5) * 60.0;

        // Reiniciar contadores
        pulsosFlujo1 = 0;
        pulsosFlujo2 = 0;
        ultimoCalculo = ahora;
    }
}

```

```

if (ultimoCalculo == 0) {
    ultimoCalculo = ahora;
}
}

```

// Versión sin interrupciones (polling no bloqueante)

```

void leerFlujosPolling() {
    static unsigned long ultimaMedicion = 0;
    static int estadoAnterior1 = HIGH;
    static int estadoAnterior2 = HIGH;
    static unsigned long inicioMedicion = 0;

    unsigned long ahora = millis();

    // Iniciar nueva medición cada INTERVALO_FLUJO
    if (ahora - inicioMedicion >= INTERVALO_FLUJO) {
        // Calcular flujos basados en pulsos acumulados
        unsigned long tiempoMedicion = ahora - inicioMedicion;

        if (tiempoMedicion > 0) {
            float pulsosPorSegundo1 = (pulsosFlujo1 * 1000.0) / tiempoMedicion;
            float pulsosPorSegundo2 = (pulsosFlujo2 * 1000.0) / tiempoMedicion;

            flujo1 = (pulsosPorSegundo1 / 7.5) * 60.0;
            flujo2 = (pulsosPorSegundo2 / 7.5) * 60.0;

            pulsosFlujo1 = 0;
            pulsosFlujo2 = 0;
        }
    }
}

```

```

    inicioMedicion = ahora;
}

// Detectar flancos de bajada (polling no bloqueante)
int estadoActual1 = digitalRead(PIN_FLUJO1);
int estadoActual2 = digitalRead(PIN_FLUJO2);

if (estadoActual1 == LOW && estadoAnterior1 == HIGH) {
    pulsosFlujo1++;
}

if (estadoActual2 == LOW && estadoAnterior2 == HIGH) {
    pulsosFlujo2++;
}

estadoAnterior1 = estadoActual1;
estadoAnterior2 = estadoActual2;
}

void loop() {
    // ===== LECTURA DE TEMPERATURAS (cada 1 segundo) =====
    if (millis() - ultimaLecturaTemp >= INTERVALO_TEMP) {
        ultimaLecturaTemp = millis();

        // Solicitar y leer temperaturas
        sensores.requestTemperatures();

        temp1 = sensores.getTempCByIndex(0);
        temp2 = sensores.getTempCByIndex(1);
        temp3 = sensores.getTempCByIndex(2);
    }
}

```

```

temp4 = sensores.getTempCByIndex(3);

// Mostrar resultados
Serial.print("T1: ");
Serial.print(temp1 != DEVICE_DISCONNECTED_C ? temp1 : -999.0);
Serial.print("C | T2: ");
Serial.print(temp2 != DEVICE_DISCONNECTED_C ? temp2 : -999.0);
Serial.print("C | T3: ");
Serial.print(temp3 != DEVICE_DISCONNECTED_C ? temp3 : -999.0);
Serial.print("C | T4: ");
Serial.print(temp4 != DEVICE_DISCONNECTED_C ? temp4 : -999.0);
Serial.print("C");

Serial.print("      ");

// Mostrar flujos (siempre disponibles)
Serial.print("F1: ");
Serial.print(flujos1, 1);
Serial.print(" L/min | F2: ");
Serial.print(flujos2, 1);
Serial.println(" L/min");

}

// ===== LECTURA CONTINUA DE FLUJOS =====
// Elegir UNO de los siguientes métodos:

// Método 1: Con interrupciones (descomentar si usas pines 2/3)
// calcularFlujos();

```

```
// Método 2: Polling no bloqueante (funciona en cualquier pin)
```

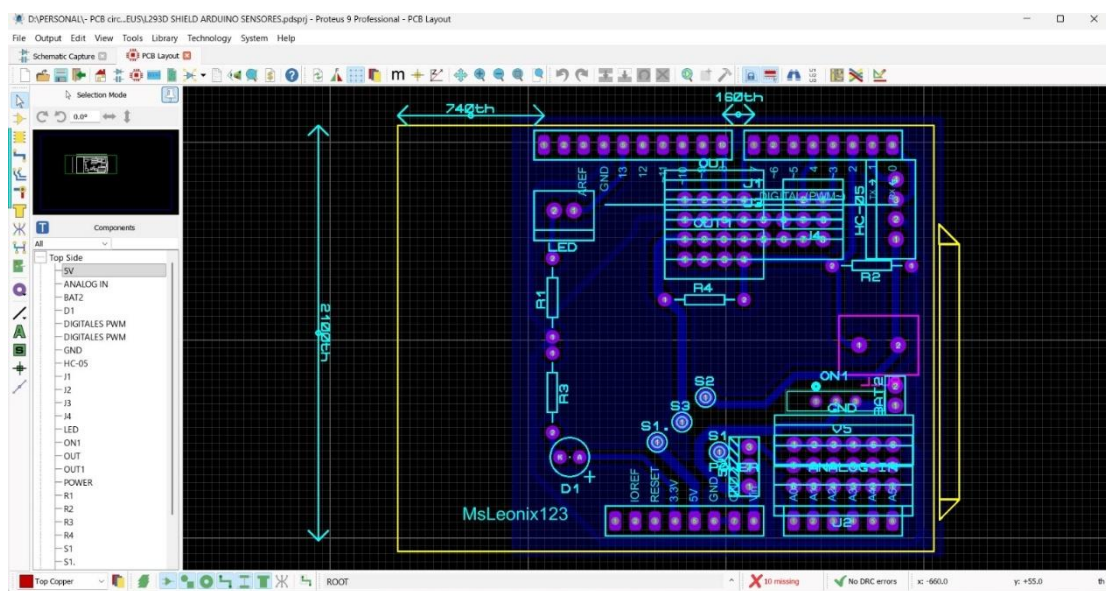
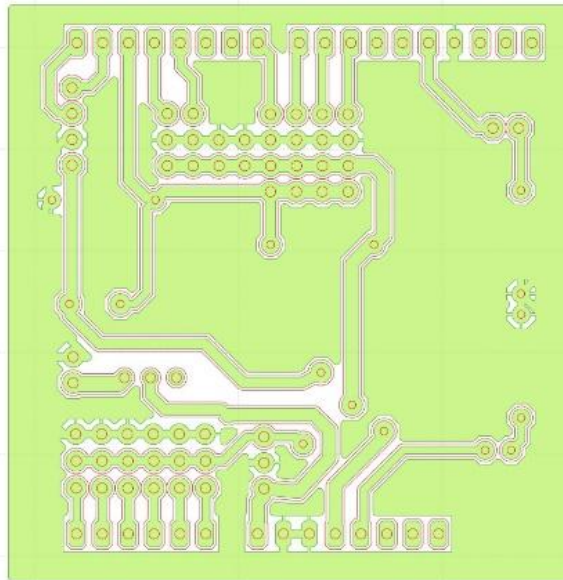
```
leerFlujosPolling();
```

```
// Pequeña pausa para evitar sobrecargar el CPU
```

```
delay(10);
```

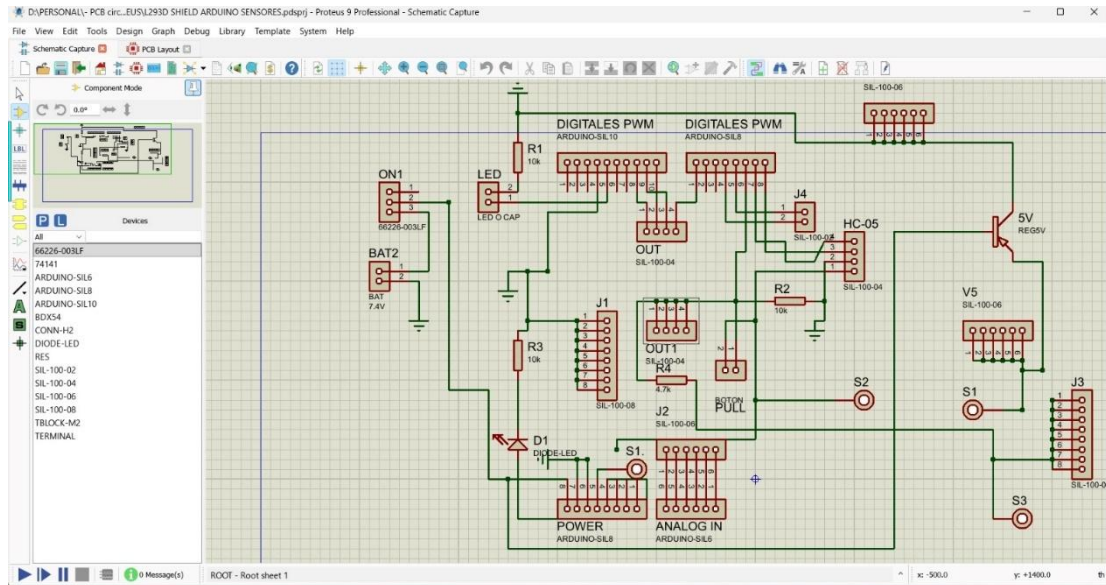
```
}
```

Elaboración de PCB proteus



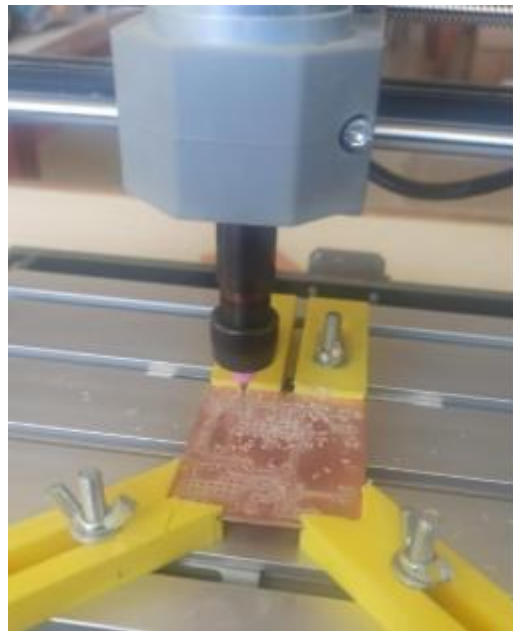
Fuente: Elaboración propia (2026).

Esquema electrónico



Fuente: Elaboración propia (2026).

Fabricación de placa especial PCB para sensores de Arduino



Fuente: Elaboración propia (2026).

ANEXO III

TOMA DE DATOS Y PARÁMETROS PARA DISEÑO

Fabricación del sistema de calentamiento

Sellado de difusores con silicona simple y silicona de alta temperatura



Fuente: Elaboración propia (2026).

Determinación de temperaturas del sistema de calentamiento



Fuente: Elaboración propia (2026).

Fabricación de prototipo de banco de pruebas



Fuente: Elaboración propia (2026).

ANEXO IV

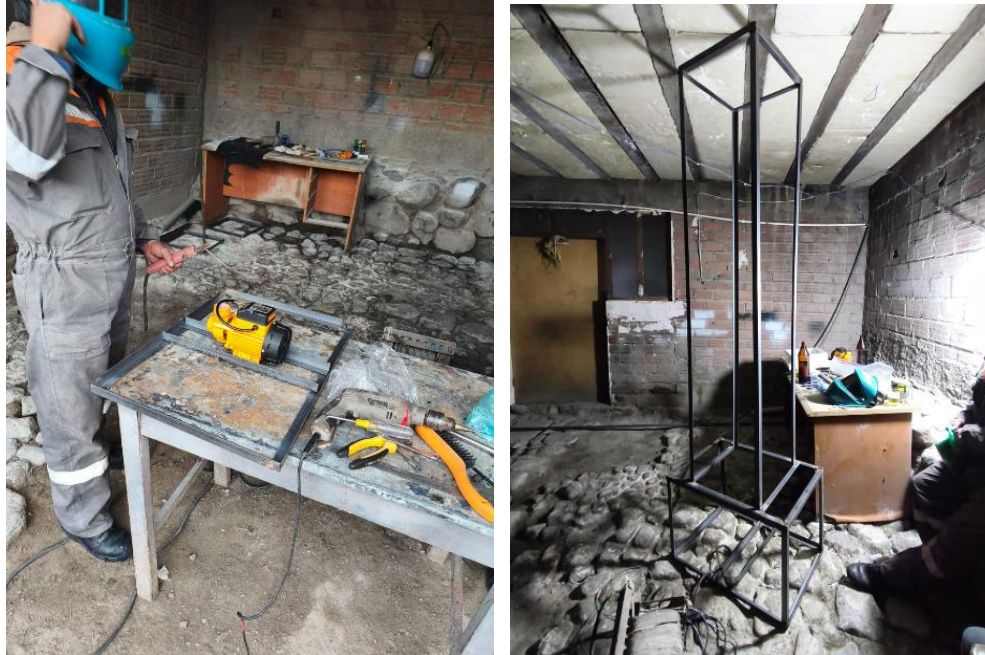
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

Constituido por el andamio de acero recubierta con pintura anticorrosiva que podemos observar en el plano N°5 del ANEXO I, en su interior estará el conjunto de empaque y como paredes serán de policarbonato compacto de 2 mm de espesor

Empaque de la torre de enfriamiento

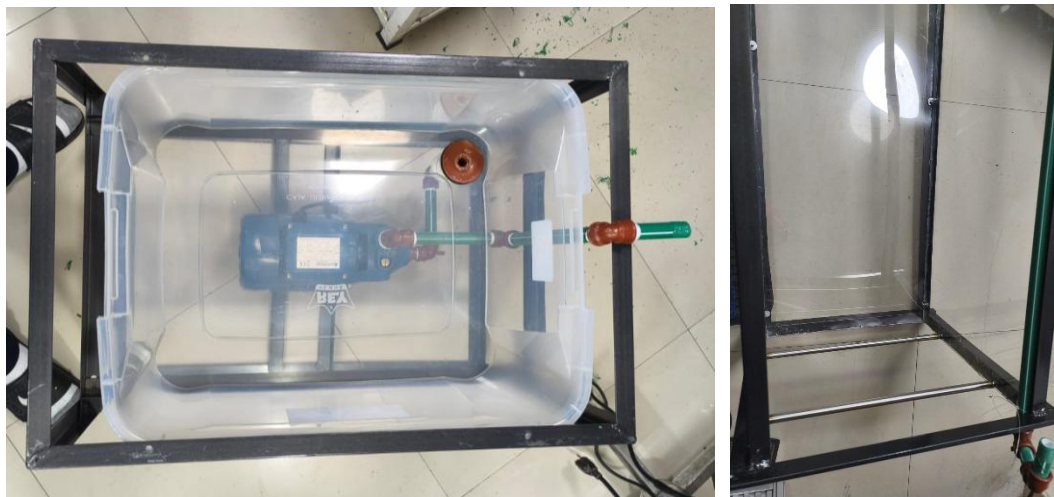
Con el objetivo de optimizar el área de transferencia de masa y calor dentro de la torre de enfriamiento, se implementó un relleno estructurado compuesto por láminas plásticas onduladas. Este material fue seleccionado como una alternativa eficiente y económica frente a los empaques comerciales de alta complejidad, permitiendo maximizar la superficie de contacto entre el fluido líquido y la corriente de aire

ascendente. Durante la fase de montaje, las láminas se dispusieron en arreglos paralelos, manteniendo una separación uniforme que facilita la formación de una película delgada de agua sobre la superficie del material, siendo un total de dos módulos. Esta configuración asegura una distribución adecuada del flujo y reduce la caída de presión, promoviendo así un intercambio térmico eficaz entre las fases, simulando las condiciones operativas de un empaque estructurado industrial.

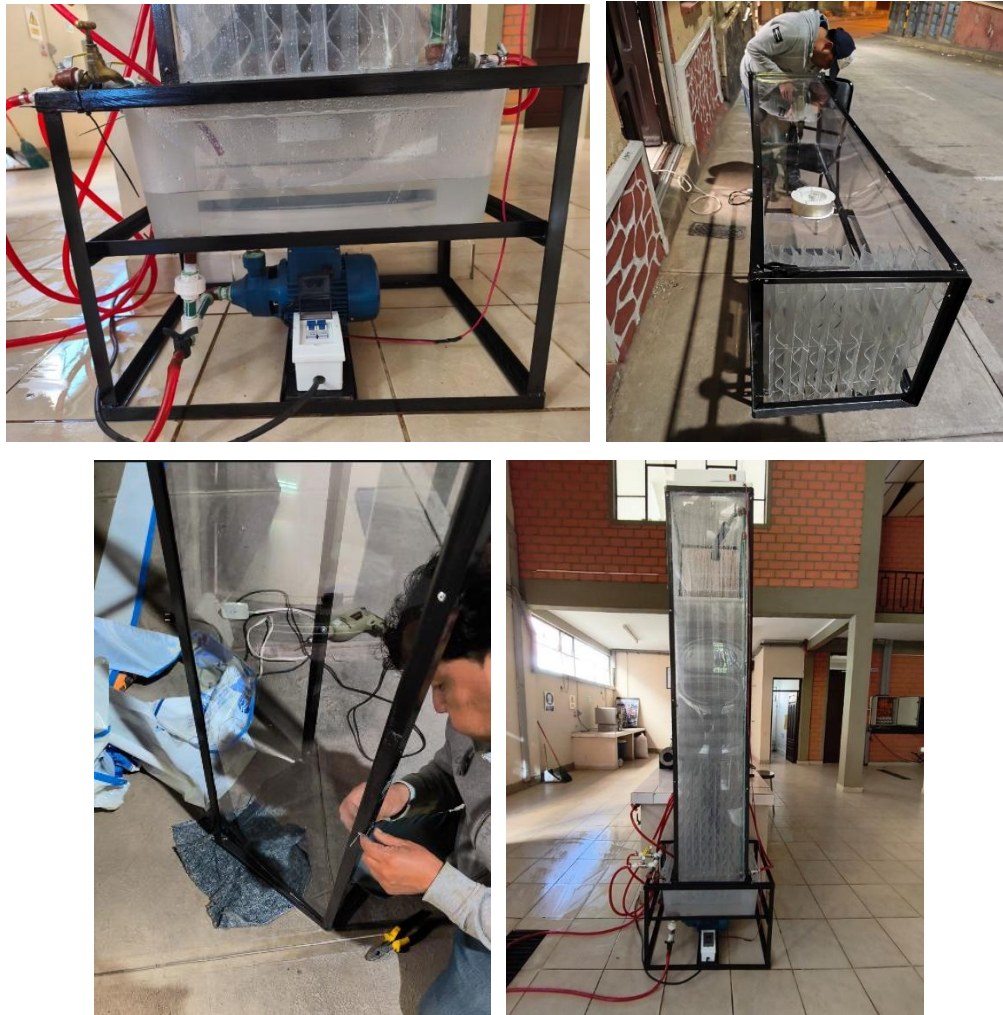


Fuente: Elaboración propia (2026).

Ensamblaje de la torre de enfriamiento







Fuente: Elaboración propia (2026).

ANEXO IV

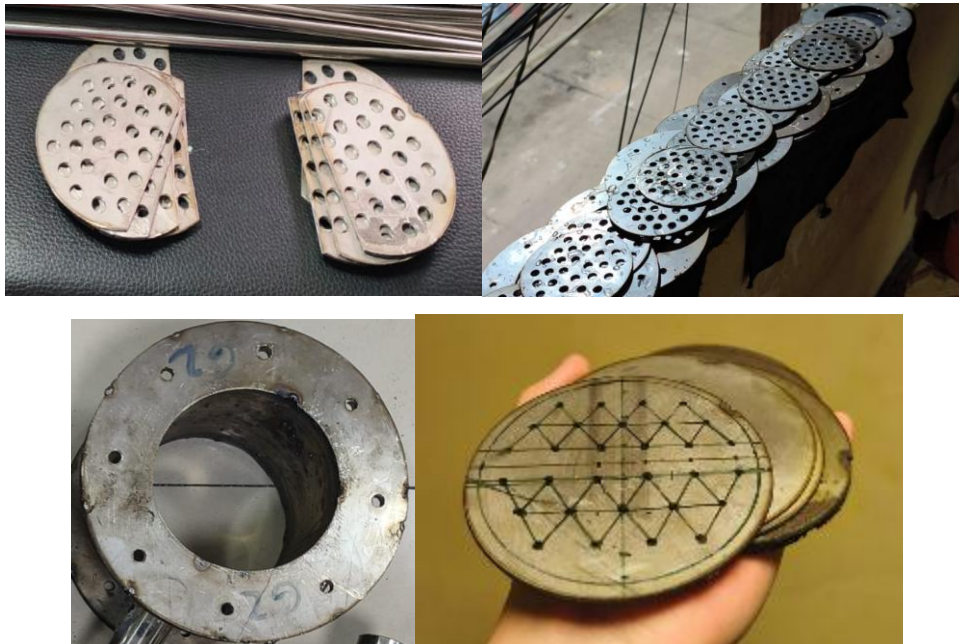
CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

Una vez terminada la parte del diseño de nuestro sistema de intercambio de calor procedemos al montaje de nuestro equipo principal, el intercambiador de calor de tubos y coraza normalmente se suele construir con las normas TEMA y ASME, pero estas normas son para equipos de tipo industrial, donde requieren de flujos y presiones altas, por lo cual requiere muchos más gasto económico, ya sea que las normas nos pide espesores mínimos, pero para un equipo piloto o para pruebas didácticas de laboratorio, jamás se llegaría a esas condiciones operativas tan exigentes, por lo cual nos basaremos

en lo mínimo de estas normas, adecuando cada norma a nuestro equipo piloto de laboratorio.

Fabricación del espejo bridas y deflectores

El material seleccionado para esto fue, plancha de acero inoxidable 304 de espesor de 1,5 mm, el cual mediante planos en el ANEXO I (plano N°1) se procede a hacer los cortes respectivos mediante plasma, con perforaciones de 8,1mm y arreglo triangular de 60° grados para los espejos y baffles, incluyendo el corte del 20% para los deflectores. Para las bridas por norma, con una cantidad de 8 agujeros el espacio de centro a centro está definido por 45°



Fuente: Elaboración propia (2026).

Fabricación de cabezales

Mediante los planos 2 y 3 del ANEXO I, se hacen los cortes y perforaciones correspondientes a los tubos de 1 y 4 pulgadas siendo el tubo de 4 pulgadas la base de nuestros cabezales.

Recepción y ensamblaje de cabezales



Fuente: Elaboración propia (2026).

Conjunto de bridas

Estas están clasificadas en 3 por su tipo de corte y el orden de apilación

Cabezal tipo A

Siendo 2 cabezales en total, que son la parte desacoplable del equipo, pero juntos estos dos cabezales forman la configuración de (1-1) es decir nos da 1 paso por los tubos, conformado por el conjunto de bridas de tipo 2, siendo esta parte para que se pueda acoplar a la coraza y con ese diámetro interno extra para que pueda ser un sellado hermético junto con el empaque de goma en la parte de la holgura entre el espejo y el diámetro interno de la coraza y el de tipo 3, siendo esta parte donde ira ubicado el visor y sujeto con otro conjunto de brida, y con la unión del tubo de 1 pulgada como la boquilla.



Fuente: Elaboración propia (2026).

Cabezal de tipo B

Consta de 2 partes, estas son parte de la coraza, ya que el material de la coraza es de policarbonato, necesitan una parte donde se puedan acoplar los cabezales metálicos, a diferencia del cabezal de tipo A, tiene solo un conjunto de brida de tipo 3, esta parte siendo donde se acopla el cabezal de tipo A, y la contraparte de esta se tiene que acoplar a la coraza de policarbonato, teniendo una longitud extra para asegurar la hermeticidad al momento de ensamblar la coraza.



Fuente: Elaboración propia (2026).

Cabezal de tipo C

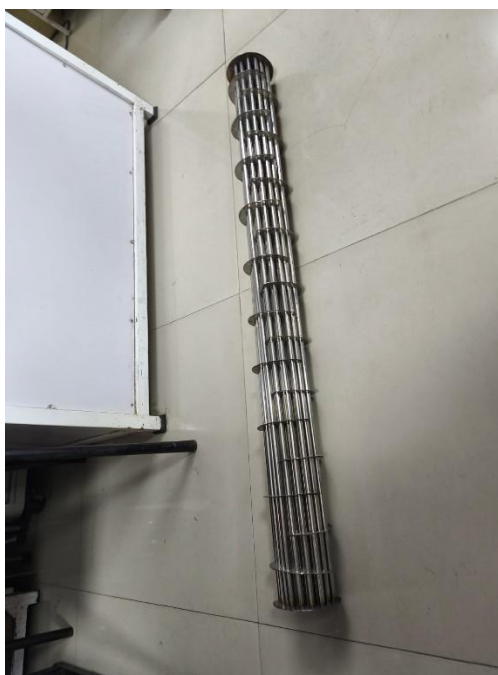
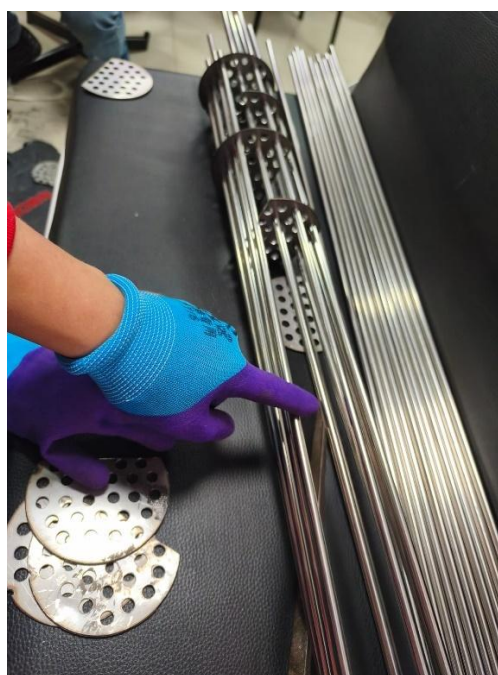
Este solo consta de una pieza la cual tiene 2 tubos con boquillas y una placa soldada en el medio, esto para que cuando se acople a la coraza pueda generar la configuración de (1-2) o en otras palabras haya dos pasos en los tubos, consta de el conjunto de brida de tipo 1 y 2, incluyendo el visor respectivamente



Fuente: Elaboración propia (2026).

Fabricación del haz de tubos

El ensamblaje viene a partir de 30 tubos de 8 mm de (de) 19 bafles y 2 espejos de acero inoxidable 304 con las medidas de corte correspondientes, el armado es simple primero se deberá ubicar primeramente los bafles intercalando los lados en base al plano N°4 del ANEXO I, donde también se tiene la ubicación de cada tubo, una vez finalizado la ubicación correcta de los bafles se procederá a soldar los espejos de ambos lados.



Fuente: Elaboración propia (2026).

Fabricación de la coraza

Solo se deben acoplar los cabezales de tipo B a los lados de la coraza y sellarlos con silicona de alta temperatura no reaccionante a químicos.

Moldeado de lámina de policarbonato de 4mm



Ensamblaje de coraza



Fuente: Elaboración propia (2026).

Armado y pruebas hidráulicas del intercambiador de calor de tubos y coraza



Fuente: Elaboración propia (2026).

ANEXO IV

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL BANCO DE PRUEBAS

El banco de pruebas está constituido por:

Manómetros

Sistema de Arduino con 4 sensores de temperatura y 2 de caudal

2 duchas de 4 tiempos

2 líneas de alimentación

2 líneas de retorno

Enchufe para alto amperaje, siendo este la alimentación de la ducha

Enchufe con transformador de 12V que alimenta al sistema de Arduino

Cable USB para conectar al celular o a la computadora para lectura los datos

El banco de pruebas tiene cuatro ingresos y cuatro salidas, las salidas son fácilmente reconocibles ya que están compuestas con chicotillos flexibles, dos de agua fría y dos de agua caliente.

Las entradas estarán siempre libres para poder ser conectadas a la torre de enfriamiento, para lo cual se requiere ajustar con abrazaderas las uniones junto con las mangueras rojas provenientes de la torre de enfriamiento.

LINEA 1 Es el ingreso de agua hacia las duchas, incluye dos manómetros, caudalímetro y un sensor de temperatura, esta línea siempre dará agua caliente a nuestro sistema.

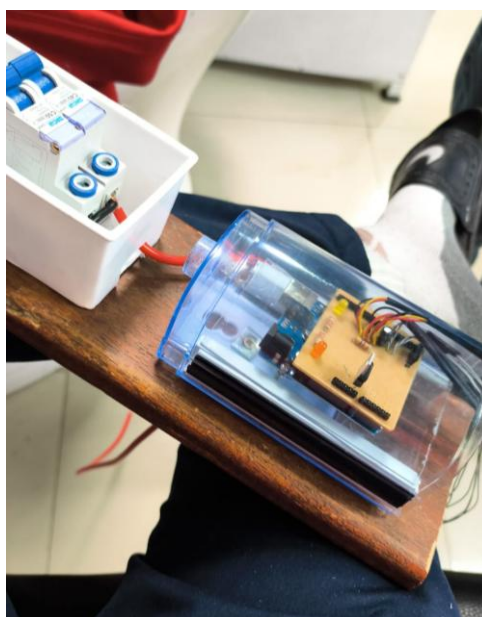
LINEA 2 Este es el ingreso de agua fría, es directo y soporta altas presiones, incluye un manómetro, caudalímetro y un sensor de temperatura.

LINEA 3 Esta sería la primera línea de salida dirigida a la torre de enfriamiento o al desagüe, esta deberá ser para el fluido más frío de salida del sistema, esta línea incluye un solo sensor de temperatura.

LINEA 4 Esta es la misma que la línea 3, su única diferencia es que es para el fluido de salida más caliente del sistema o con más alta presión, incluye un manómetro y un sensor de temperatura.

Ajuste de contracorriente o paralelo en el intercambiador de calor

Para esto solo debemos ajustar los chicotillos a la configuración deseada, siempre y cuando entendiendo cuales son las líneas de entrada y de salida.





Fuente: Elaboración propia (2026).

PRUEBAS Y RECOLECCION DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL LOU



Fuente: Elaboración propia (2026).

PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS

Descripción de los procedimientos experimentales al sistema de intercambio de calor

Para llevar a cabo la evaluación de la transferencia de calor y el análisis hidráulico del sistema, se ejecutarán pruebas experimentales tanto en el intercambiador de calor de tubo y coraza como en la torre de enfriamiento. Durante todas las corridas, se utilizará agua en ambos circuitos, empleando el sistema de calentamiento tipo ducha para elevar la temperatura del fluido caliente.

La adquisición de datos (temperatura y flujo volumétrico) se realizará en tiempo real a través del sistema Arduino, mientras que las caídas de presión se registrarán mediante la lectura directa de los manómetros instalados. Se debe garantizar siempre que la bomba centrífuga, ubicada por debajo de los recipientes, esté correctamente cebada antes de iniciar cualquier operación.

Pruebas Experimentales en el Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza

El intercambiador de calor cuenta con una coraza desmontable configurada para un (1) paso. Para variar los pasos por los tubos, se intercambiarán los cabezales del equipo: se utilizarán dos cabezales Tipo A para la configuración de un paso por los tubos, y se instalará un cabezal Tipo C para alternar a dos pasos por los tubos. El circuito de agua fría operará consistentemente con un mayor caudal respecto al circuito de agua caliente.

Evaluación experimental configuración 1-1 en contracorriente

Esta fase inicial se centra en determinar el coeficiente global de transferencia de calor y la eficiencia térmica del equipo operando con un solo paso por los tubos y un solo paso por la coraza. Para esta configuración, es indispensable el montaje de los dos cabezales Tipo A en los extremos del intercambiador.

Procedimiento 1

Fluido caliente por la coraza y fluido frío por los tubos - Análisis paramétrico

Este ensayo evalúa el comportamiento térmico cuando el fluido caliente circula por el espacio anular (coraza) y el fluido frío por el interior de los tubos. Adicionalmente, durante esta configuración base se realizarán variaciones sistemáticas de caudal y

temperatura para determinar su influencia directa sobre las temperaturas de salida y la efectividad global del intercambiador de calor.

Preparación del Equipo y Montaje

- Verificar la estanqueidad de los cabezales Tipo A, asegurando que las juntas de sellado estén correctamente posicionadas para evitar fugas entre los tubos y la coraza.
- Configurar las válvulas de paso para establecer el perfil de flujo en contracorriente: la entrada del fluido frío debe ser opuesta a la entrada del fluido caliente.

Puesta en Marcha del Sistema Hidráulico

- Verificar que el Sumidero de la torre de enfriamiento tenga el nivel de agua óptimo.
- Cebiar la bomba centrífuga (asegurando que el aire sea purgado, dado que la bomba se encuentra ubicada por debajo del recipiente de almacenamiento).
- Encender la bomba y ajustar el caudal del agua fría y caliente mediante las válvulas de control, monitoreando el flujo a través de la interfaz de Arduino.

Acondicionamiento Térmico (Sistema de Ducha)

- Activar el sistema de calentamiento tipo ducha.
- Circular el agua caliente hacia la entrada superior/lateral de la coraza.
- Monitorear en tiempo real mediante los sensores conectados al Arduino hasta que el sistema empiece a tomar temperatura.

Estabilización y Captura de Datos (Punto Base)

- Observar la tendencia de las cuatro temperaturas en la interfaz del sistema de adquisición.
- Una vez alcanzado el estado estacionario (variación menor a $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en un lapso de 5 minutos), registrar las presiones manométricas iniciales para el cálculo de la caída de presión (ΔP).

Análisis de la Variación de Caudal (Comportamiento de Temperaturas de Salida y Efectividad vs. Caudal)

- Fijar variables

- Mantener constantes el caudal del agua caliente, la temperatura de entrada del agua caliente (T1) proveniente de la ducha, la temperatura de entrada del agua fría (t1).

Variación

- Modificar gradualmente el caudal del fluido frío (tubos) en intervalos predefinidos (por ejemplo, en descensos de 15, 12, 9 y 6 L/min o su equivalente).

Recolección

- Para cada escalón de caudal, esperar a que el equipo alcance un nuevo estado estacionario. Una vez estabilizado, registrar la temperatura de salida del agua caliente (T2) y la temperatura de salida del agua fría (t2). Estos datos permitirán graficar el comportamiento térmico y calcular la efectividad para cada caudal.
- Análisis de la Variación de Temperatura (Comportamiento de Efectividad vs. Temperatura de Entrada)

Fijar variables

Mantener constantes los caudales de ambos fluidos (frío y caliente) y la temperatura de entrada del fluido frío (t1).

Variación

Modificar progresivamente la temperatura de entrada del fluido caliente (T1) ajustando la potencia o el flujo de calentamiento en el sistema de ducha (por ejemplo, generando escalones desde 28 °C hasta 59 °C aproximadamente).

Recolección

Para cada nuevo valor de temperatura de entrada (T1), esperar la estabilización del sistema en estado estacionario. Registrar las temperaturas de salida (T2 y t2) y tabular los resultados. Estos datos permitirán determinar cómo la fuerza impulsora térmica afecta la efectividad del equipo.

Finalización

Apagar el sistema de calentamiento tipo ducha y mantener el flujo de agua fría por unos minutos para refrigerar el equipo antes de proceder a la siguiente configuración de flujos.

Procedimiento 2

Fluido caliente por los tubos y fluido frío por la coraza

En esta prueba se invierten las fases para analizar cómo influye el aumento de la velocidad lineal dentro de los tubos en la transferencia de calor del fluido caliente.

Reconfiguración de Flujos

- Sin desmontar los cabezales Tipo A, se procede a intercambiar los chicotillos de alimentación.
- Conectar la salida de la ducha (agua caliente) a la entrada de los cabezales (tubos).
- Conectar la línea de agua fría a la entrada de la coraza, manteniendo siempre la configuración de contracorriente.

Inicio de la Operación

- Verificar que el sistema Arduino esté recibiendo señal de todos los sensores.
- Encender la bomba y el sistema de calentamiento. Ajustar el caudal de agua fría en la coraza para que sea significativamente mayor al flujo en los tubos, conforme a los parámetros de diseño de la tesis.

Monitoreo y Control

Seguir la evolución térmica a través del código de adquisición de datos. Es crítico verificar que la presión en los manómetros de los tubos no exceda los límites de operación ante el posible aumento de pérdida de carga.

Registro Experimental

Esperar la estabilización de las lecturas. El estado estacionario se confirma cuando el balance de energía entre el calor cedido por los tubos y el absorbido por la coraza presenta un error de cierre aceptable (generalmente $<10\%$).

Almacenar los datos de

- Temperatura de entrada y salida del fluido caliente (tubos).
- Temperatura de entrada y salida del fluido frío (coraza).
- Caudales de operación y lecturas de presión manométrica.

- Parada de Seguridad: Desactivar la ducha, permitir la recirculación de agua fría para estabilizar el material del intercambiador y prepararse para la transición a las pruebas en paralelo o cambio de cabezales.

Evaluación experimental configuración 1-1 en paralelo

Procedimiento 3

Fluido caliente por la coraza y fluido frío por los tubos

Esta prueba tiene como objetivo evaluar la transferencia de calor bajo un régimen de flujo en paralelo (co-corriente). A diferencia de la contracorriente, en esta disposición ambos fluidos ingresan por el mismo extremo del intercambiador, lo que genera un perfil térmico donde la mayor fuerza impulsora se encuentra en la entrada del equipo. Se mantiene el uso de los cabezales Tipo A para garantizar un solo paso por los tubos.

Reconfiguración del Banco de Pruebas

Asegurar que el sistema se encuentre despresurizado tras las pruebas anteriores.

Modificar las conexiones hidráulicas de entrada y salida para establecer un perfil de flujo en paralelo. La línea de alimentación del agua caliente (proveniente de la ducha) y la línea del agua fría deben acoplarse en los puertos de entrada del mismo extremo del intercambiador.

Reinicio del Sistema Hidráulico

Comprobar nuevamente el cebado de la bomba centrífuga, recordando que por su ubicación (debajo del recipiente) debe estar libre de cavitación y burbujas de aire.

Encender la bomba y habilitar el paso de agua fría por los tubos, ajustando la válvula de control para asegurar el caudal mayoritario requerido en el circuito de enfriamiento.

Activación del Circuito Caliente

- Encender el sistema de calentamiento tipo ducha.
- Permitir el ingreso del agua caliente hacia la coraza.
- Verificar mediante la lectura de los sensores en el sistema Arduino que la temperatura de entrada del fluido caliente coincida con las condiciones operativas de diseño.

Estabilización y Adquisición de Datos

Monitorear de forma continua las variables térmicas e hidráulicas. En el flujo en paralelo, la temperatura de salida del fluido frío nunca podrá superar la temperatura de salida del fluido caliente; es vital confirmar este comportamiento en el monitor del Arduino para validar la correcta conexión física de las mangueras.

Alcanzado el estado estacionario (fluctuación térmica mínima), proceder a registrar

- Temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos.
- Caudales manejados en ambas líneas.
- Caídas de presión (ΔP) registradas en los manómetros de la coraza y los tubos.

Finalización

Cortar el suministro de calor de la ducha y permitir la estabilización térmica del sistema solo con agua fría antes de realizar la última variación de esta fase.

Procedimiento 4

Fluido caliente por los tubos y fluido frío por la coraza

Esta es la última prueba de la configuración 1-1. Consiste en invertir la asignación de los fluidos manteniendo el flujo co-corriente, lo cual permite analizar el efecto de la geometría interior de los tubos sobre la caída de presión y la transferencia de calor del fluido caliente.

Intercambio de Líneas de Alimentación

- Sin retirar los cabezales Tipo A y manteniendo el flujo en el mismo sentido (paralelo), intercambiar las entradas.
- Conectar el suministro de agua caliente (ducha) al ingreso de los cabezales para que fluya por el interior de los tubos.
- Conectar la línea principal de agua fría al puerto de entrada de la coraza.

Arranque y Ajuste de Caudales

- Poner en marcha la bomba centrífuga principal.
- Ajustar el caudalímetro del agua fría (ahora en la coraza) para mantener la relación de mayor flujo volumétrico respecto al agua caliente.
- Encender la ducha y habilitar el paso del fluido caliente a través de los tubos.

Control de Variables Críticas

- Prestar especial atención a los manómetros conectados al circuito de los tubos, ya que la fricción interna en el haz de tubos suele ser mayor, lo que podría generar variaciones rápidas de presión en la línea del agua caliente.
- Supervisar las temperaturas mediante la interfaz de Arduino para asegurar que el sistema se dirige hacia el equilibrio térmico.

Registro de Datos

Una vez que el sistema estabilice sus lecturas (estado estacionario confirmado), ejecutar la toma de datos.

Registrar sistemáticamente

- Las cuatro temperaturas terminales (entradas y salidas).
- Los flujos volumétricos respectivos.
- Las presiones manométricas de ambos circuitos.

Parada Total de la Fase 1-1

- Apagar el sistema de ducha.
- Mantener la bomba funcionando por 5 a 10 minutos para enfriar completamente el haz de tubos y la coraza.
- Apagar la bomba y cerrar válvulas principales.
- Drenar parcialmente el intercambiador de calor para prepararlo para la maniobra mecánica de sustitución de cabezales (cambio de cabezal Tipo A por Tipo C) para los próximos ensayos de dos pasos por los tubos.

Evaluación experimental configuración (1-2)

Esta fase experimental tiene como propósito evaluar el incremento en la eficiencia de la transferencia de calor al aumentar el tiempo de residencia y la velocidad lineal del fluido que circula por el interior de los tubos. Para lograr esta configuración de dos (2) pasos por los tubos y un (1) paso por la coraza, se requiere una modificación mecánica en el equipo, sustituyendo uno de los cabezales ciegos o de paso directo.

Procedimiento 5

Fluido caliente por la coraza y fluido frío por los tubos

En esta prueba se analizará el comportamiento del fluido de enfriamiento circulando a mayor velocidad a través del haz de tubos, mientras que el fluido caliente aportado por la ducha cede su energía térmica en el espacio anular de la coraza.

Modificación Mecánica y Montaje (Cambio de Cabezal)

- Asegurar que el equipo esté completamente despresurizado y drenado tras las pruebas de la fase 1-1.
- Desmontar uno de los cabezales Tipo A del extremo posterior del intercambiador.
- Instalar cuidadosamente el cabezal de retorno Tipo C. Este cabezal obligará al fluido que viaja por los tubos a retornar por la mitad inferior (o superior) del haz, completando así los dos pasos antes de salir por el extremo frontal. Verificar el correcto ajuste de las empaquetaduras para evitar fugas internas y externas.

Alineación de Flujos

- Conectar la línea de suministro de agua fría a la boquilla de entrada de los tubos en el cabezal frontal. (Nota: en esta configuración, la entrada y salida de los tubos ocurren en el mismo extremo del intercambiador).
- Conectar la salida del sistema de ducha (agua caliente) a la entrada de la coraza.

Arranque del Sistema Hidráulico

Confirmar el cebado de la bomba centrífuga situada debajo del recipiente principal.

Iniciar el bombeo de agua fría y ajustar la válvula para mantener el caudal mayoritario.

Encender la ducha y habilitar el paso del fluido caliente a través de la coraza.

Monitoreo de Variables y Pérdida de Carga

A través del monitor de Arduino, vigilar la evolución de las temperaturas.

Atención especial: Debido a que el área de flujo transversal en los tubos se reduce a la mitad y la longitud del recorrido se duplica, la pérdida de carga (ΔP) del agua fría aumentará significativamente. Registrar y vigilar los manómetros de la línea de tubos para asegurar que la presión se mantenga dentro de los límites de seguridad de las conexiones y tuberías acrílicas o de policarbonato.

Registro de Datos en Estado Estacionario

Una vez que las lecturas térmicas en la interfaz de adquisición se estabilicen (variación $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$), tomar nota de:

- Las temperaturas terminales de ambos circuitos.
- Los caudales volumétricos leídos por los sensores.
- Las presiones de entrada y salida para ambos fluidos.

Procedimiento 6

Esta es la prueba final del intercambiador de calor, donde se evalúa el efecto del doble paso sobre el fluido caliente. Al igual que en la fase inicial, se realizarán variaciones paramétricas sistemáticas para analizar la sensibilidad de la efectividad y las temperaturas de salida frente a cambios en el caudal y la temperatura de entrada.

Inversión de las Líneas de Alimentación

- Manteniendo el ensamble mecánico con el cabezal Tipo C ya instalado, proceder a intercambiar las conexiones hidráulicas en el panel de distribución.
- Acoplar la línea de agua caliente (salida de la ducha) al puerto de entrada del cabezal frontal para que recorra los dos pasos por los tubos.
- Acoplar la línea principal de agua fría a la entrada de la coraza.

Puesta en Marcha y Regulación

Activar la bomba centrífuga. Regular el caudalímetro de la coraza para asegurar el suministro de agua fría con mayor flujo volumétrico.

Encender el sistema de ducha para introducir el agua caliente a través de los tubos.

Control Operativo y Presión

- Debido a que el agua caliente ahora experimenta el doble recorrido, monitorear constantemente los manómetros de la línea de tubos para prevenir sobrepresiones.
- Utilizar el sistema Arduino para visualizar en tiempo real la aproximación al equilibrio térmico y verificar que el sensor de flujo registre los valores de consigna.

Estabilización Base

Una vez que las lecturas térmicas en la interfaz de adquisición se estabilicen (variación $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$), confirmar el estado estacionario inicial.

Análisis de la Variación de Caudal (Temperaturas de Salida y Efectividad vs. Caudal):

Fijar variables

Mantener constantes el caudal del fluido caliente en los tubos, su temperatura de entrada (T1) y la temperatura de entrada del agua fría (t1) en la coraza.

Variación

Modificar gradualmente el caudal del agua fría (fluido en la coraza) siguiendo los escalones experimentales (por ejemplo: 15, 12, 9 y 6 L/min).

Recolección

Para cada nivel de caudal, esperar la estabilización térmica. Registrar la temperatura de salida del agua caliente en los tubos (T2) y la del agua fría en la coraza (t2). Estos valores permitirán generar las curvas de comportamiento y calcular la efectividad operacional para la configuración de dos pasos.

Análisis de la Variación de Temperatura (Efectividad vs. Temperatura de Entrada):

Fijar variables

Mantener constantes los caudales de ambos fluidos y la temperatura de entrada del agua fría (t1).

Variación

Incrementar progresivamente la temperatura de entrada del agua caliente (T1) mediante el control del sistema de ducha (por ejemplo, desde 28 °C hasta alcanzar los 59 °C).

Recolección

En cada punto de temperatura estabilizado, capturar los datos de T2 y t2 a través de Arduino. Dado que la configuración 1-2 tiene un perfil térmico más complejo, estos datos son críticos para determinar si la efectividad se mantiene constante o varía con la carga térmica.

Cierre de las Pruebas del Intercambiador

- Cortar la energía del sistema de calentamiento de la ducha.
- Mantener el bombeo de agua fría durante unos minutos adicionales para extraer el calor residual de los tubos y proteger la integridad de los sellos.

- Apagar la bomba y el sistema Arduino, cerrando las válvulas principales para dar por concluida la fase experimental del intercambiador de tubo y coraza.

Evaluación experimental torre de enfriamiento

La última fase de experimentación se centra en la evaluación del rendimiento de la torre de enfriamiento de tiro inducido. Dado que este equipo opera como un sistema cerrado que recibe el agua proveniente de las líneas de retorno del intercambiador de calor, su análisis requiere monitorear el enfriamiento por evaporación del fluido hasta alcanzar el equilibrio térmico con el aire ambiente.

Procedimiento 7

Evaluación de Desempeño Térmico e Hidráulico en Estado Estacionario

Este ensayo evaluará la capacidad de la torre para remover el calor sensible del agua caliente a través del contacto directo con el aire a medida que el fluido desciende por el relleno.

Alineación e Inspección del Sistema

- Verificar el acople hermético de las cuatro (4) líneas de interconexión entre el banco de pruebas principal y la torre de enfriamiento: dos líneas de entrada (retorno de agua caliente proveniente del proceso) y dos líneas de salida (suministro de agua fría desde el sumidero).
- Inspeccionar el nivel inicial de agua en el sumidero (piscina de recolección en la parte inferior de la torre).
- Asegurar que el empaque o relleno interior se encuentre posicionado correctamente para maximizar el área de contacto agua-aire.

Puesta en Marcha del Circuito

- Encender la bomba centrífuga principal del sistema, verificando su correcto cebado desde la parte inferior del tanque de almacenamiento.
- El fluido que se calienta de la coraza y el fluido que se enfría debe ir a la parte superior de la torre. El fluido debe ingresar a través del sistema de aspersión o distribución, garantizando una lluvia uniforme sobre toda el área transversal del empaque.

Monitoreo Transitorio

- A través del sistema de adquisición de datos basado en Arduino, comenzar a registrar las temperaturas en tiempo real.
- Se debe prestar especial atención a la temperatura del agua caliente que ingresa por las boquillas de aspersión y a la temperatura del agua enfriada que se recolecta en el sumidero.
- Vigilar las lecturas de los manómetros en las líneas de entrada y salida para asegurar que el circuito cerrado opere sin sobrepresiones que puedan afectar las tuberías de retorno.

Estabilización y Toma de Datos

- El sistema requerirá un tiempo de residencia y recirculación continuo para que el gradiente térmico se estabilice (el agua del sumidero dejará de disminuir su temperatura gradualmente).
- Una vez que las temperaturas de entrada y salida mantengan una variación mínima ($< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$) a lo largo del tiempo, se confirmará que la torre ha alcanzado el estado estacionario. En este punto, realizar una única toma de datos definitiva que incluya:
 - Temperatura de entrada del agua caliente (tope de la torre).
 - Temperatura de salida del agua fría (sumidero).
 - Caudal volumétrico total manejado por la torre (L/min).
 - Humedad, temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire ambiente.
 - Cierre General del Banco de Pruebas
 - Desactivar el sistema de calentamiento tipo ducha del equipo principal.
 - Mantener la bomba centrífuga recirculando agua a temperatura ambiente durante 10 a 15 minutos para asegurar el enfriamiento total de todo el banco (intercambiador y torre).
 - Apagar la bomba, cerrar todas las válvulas de control y proceder con el drenaje parcial o total de los equipos según los protocolos de mantenimiento

GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO: ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA EN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

Carrera: Ingeniería Química – Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Asignatura: Operaciones Unitarias- Fenómenos De Transporte – Termodinámica –
Balance de Materia y Energía – Control y Medición de Procesos, entre otros

Requisitos Previos y Seguridad

IMPORTANTE: Antes de encender los equipos o realizar cualquier cambio mecánico en el arreglo físico, el estudiante debe leer obligatoriamente los siguientes documentos
Manual de operación



El uso de equipo de protección personal (bata de laboratorio, gafas de seguridad y guantes) es indispensable. Debido a que la configuración requiere el acople y desacople manual de conexiones roscadas por donde circulará agua caliente, es vital asegurar que el sistema esté despresurizado y a temperatura segura antes de cualquier manipulación.

Objetivos de la Práctica

Objetivo General

Evaluar el rendimiento térmico y el coeficiente global de transferencia de calor en un intercambiador de tubos y coraza utilizando configuraciones múltiples con agua en ambos circuitos.

Objetivos Específicos:

Comparar la eficiencia térmica operando en flujos en paralelo (corriente) y en contracorriente.

Analizar el efecto térmico al intercambiar el fluido caliente entre los tubos y la coraza.

Determinar la variación en la transferencia de calor al modificar el cabezal para operar de un paso a dos pasos por los tubos.

Operar el sistema manteniendo el caudal de agua caliente constante bajo una presión de control estricta.

3. Fundamento Teórico

El intercambiador de tubos y coraza facilita la transferencia de energía térmica entre dos fluidos (en este caso, agua líquida en ambos lados) a diferentes temperaturas. El rendimiento depende drásticamente de su configuración geométrica y de flujo:

- Flujo en Paralelo Ambos fluidos entran por el mismo extremo y fluyen en la misma dirección. La diferencia de temperatura entre los fluidos es máxima en la entrada y disminuye hacia la salida.
- Flujo en Contracorriente: Los fluidos entran por extremos opuestos, manteniendo una diferencia de temperatura más constante a lo largo del equipo, lo que generalmente resulta en una mayor eficiencia de transferencia.
- Número de Pasos: El uso de cabezales divisores permite que el fluido dentro de los tubos viaje a lo largo del equipo más de una vez (por ejemplo, 2 pasos), aumentando la velocidad del fluido y el coeficiente de transferencia, a expensas de una mayor caída de presión.

4. Descripción del Equipo y Condiciones de Operación

El banco de pruebas está diseñado para ofrecer seis configuraciones posibles de manera mecánica:

1. Dirección del flujo: Paralelo o Contracorriente.
2. Asignación de fluidos: Fluido caliente por los tubos o por la coraza.
3. Número de pasos en tubos: un paso o dos pasos (intercambiando el cabezal de la unidad).

Suministro y Arreglo Físico:

Sistema de Interconexión: El cambio de configuración (paralelo/contracorriente y tubos/coraza) no se realiza por válvulas de paso, sino desenroscando y reubicando cuatro chicotillos de conexión en las boquillas de entrada y salida del intercambiador.

Fluido Frío: Agua proveniente directamente de la torre de enfriamiento. La bomba de suministro se encuentra ubicada estratégicamente debajo del recipiente/tanque principal para asegurar el cebado continuo.

Fluido Caliente: Agua calentada mediante dos duchas eléctricas integradas al sistema.

Restricciones de Operación Obligatorias:

Caudal Caliente Constante: El caudal de agua caliente no debe modificarse durante las mediciones.

Presión de Control: Existe un manómetro instalado justo antes de las duchas eléctricas. Este instrumento debe marcar exactamente 0.4 bares en todo momento. La estabilización del caudal se rige rigurosamente por este indicador.

Variable Independiente: La única variable que se permite modificar en el circuito caliente son las temperaturas de salida de las duchas.

5. Procedimiento Experimental

Fase A: Preparación y Configuración del Arreglo Físico

1. Verificar que el equipo esté desenergizado, completamente despresurizado y que las bombas estén apagadas. El sistema debe estar drenado o bloqueado para evitar derrames al abrir las conexiones.
2. Seleccionar una de las seis configuraciones de estudio.
3. Ajuste de Chicotillos: Desenroscar cuidadosamente los cuatro chicotillos del intercambiador. Volver a enroscarlos en las boquillas correspondientes para dirigir el fluido caliente y el fluido frío según la configuración deseada (tubos/coraza y paralelo/contracorriente). Ajustar firmemente para evitar fugas bajo presión.
4. Si la configuración lo requiere, desmontar el cabezal de los tubos e instalar el cabezal correspondiente para operar a uno o dos pasos.

Fase B: Arranque del Sistema

1. Circuito Frío Primero: Iniciar la bomba (ubicada debajo del tanque) para establecer el flujo de agua de enfriamiento proveniente de la torre. Verificar visualmente que no existan fugas en los chicotillos recién acoplados. (Nota: Los procedimientos de arranque de la torre se encuentran en su manual respectivo).

2. Circuito Caliente: Abrir la válvula principal de suministro hacia las dos duchas eléctricas.
3. Ajustar el flujo hasta que el manómetro previo a las duchas indique 0.4 bares. Bloquear o mantener el suministro en esa posición para garantizar el caudal constante.
4. Encender las duchas eléctricas y seleccionar la configuración de temperatura inicial.

Fase C: Toma de Datos

1. Permitir que el sistema alcance el estado estacionario (las temperaturas no deben fluctuar de manera abrupta durante un periodo de 3 minutos).

2. Registrar las siguientes variables en la bitácora:

Temperatura de entrada del agua caliente.

Temperatura de salida del agua caliente.

Temperatura de entrada del agua fría.

Temperatura de salida del agua fría.

3. Para realizar una nueva corrida experimental sin cambiar el arreglo mecánico, modifique únicamente la temperatura de las duchas eléctricas y espere la estabilización del sistema.

4. Para cambiar de configuración (ej. de paralelo a contracorriente):

Apagar las duchas eléctricas.

Cortar el flujo de agua y despresurizar el sistema.

Volver a la Fase A para reposicionar los cuatro chicotillos.

6. Procesamiento de Datos y Cálculos Teóricos

Con los datos obtenidos, se deberá calcular el rendimiento para cada arreglo físico de los chicotillos:

1. Calor Cedido y Absorbido:

El flujo de calor Q para ambos fluidos se calcula con el calor específico del agua (C_p):

$$Q_f = m_f * C_{p_f} * (t_2 - t_1)$$

$$Q_c = m_c * C_{p_c} * (T_1 - T_2)$$

Diferencia de Temperatura Media Logarítmica (LMTD):

$$\Delta T_{LMDT} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U):

$$Q = U * A * \Delta T_{lmdt}$$

7. Cuestionario y Análisis

A partir de las gráficas de perfil de temperatura, ¿qué arreglo mecánico de los chicotillos (paralelo o contracorriente) presentó el mayor salto térmico y por qué?

Describe el impacto en el coeficiente global U y en la caída de presión al cambiar el cabezal de 1 paso a 2 pasos.

En términos de transferencia de calor y pérdidas hacia el ambiente, ¿cuál fue la diferencia cuantitativa al rutear el agua caliente por la coraza en lugar de por los tubos? Explique la importancia termodinámica e hidráulica de asegurar que el manómetro previo a las duchas eléctricas se mantenga inalterable a 0.4 bares durante todo el ensayo.

GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO: EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO OPERATIVO EN TORRE DE ENFRIAMIENTO

Carrera: Ingeniería Química – Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Asignatura: Operaciones Unitarias- Fenómenos De Transporte – Termodinámica – Balance de Materia y Energía – Control y Medición de Procesos, entre otros

1. Requisitos Previos y Seguridad

IMPORTANTE: Antes de encender los equipos, el estudiante debe leer obligatoriamente los siguientes documentos:

Manual de operación



El uso de equipo de protección personal (bata de laboratorio, gafas de seguridad y guantes) es indispensable. Debido a que la configuración requiere el acople y desacople manual de conexiones roscadas por donde circulará agua caliente, es vital asegurar que el sistema esté despresurizado y a temperatura segura antes de cualquier manipulación.

2. Objetivos de la Práctica

Objetivo General: Evaluar la capacidad de disipación de calor, la eficiencia térmica y los parámetros de diseño operativo de una torre de enfriamiento de agua.

Objetivos Específicos:

Calcular el Rango de enfriamiento (Range) y el Acercamiento (Approach) de la torre bajo condiciones de estado estacionario.

Determinar la cantidad de calor disipado al medio ambiente (calor sensible y calor latente por evaporación).

Comprender la función del intercambiador de calor de tubos y coraza como etapa previa de calentamiento para cumplir con los requerimientos de caudal mínimo de la torre.

3. Fundamento Teórico

Una torre de enfriamiento es un equipo de transferencia de calor y masa que enfría agua caliente poniéndola en contacto directo con aire atmosférico. El enfriamiento se produce principalmente por la evaporación de una pequeña fracción del agua, lo que extrae el calor latente de vaporización del resto del volumen de agua, reduciendo su temperatura.

Parámetros fundamentales de evaluación:

Temperatura de Bulbo Húmedo (T_{bh}): Es la temperatura límite teórica más baja a la que se puede enfriar el agua en la torre bajo las condiciones ambientales dadas.

Rango de Enfriamiento (Range): Es la diferencia entre la temperatura del agua caliente que entra a la torre y la temperatura del agua enfriada que sale de ella.

Acercamiento (Approach): Es la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente. Un acercamiento más pequeño indica una torre más eficiente.

$$A = T_{sumidero} - T_{bh}$$

Eficiencia de la Torre: Se define teóricamente como la relación entre el enfriamiento real logrado y el enfriamiento máximo teóricamente posible.

4. Descripción del Equipo y Configuración del Precalentamiento

Dado que la torre de enfriamiento requiere un caudal mínimo superior al que pueden proporcionar directamente las duchas eléctricas (y estas operan a una presión baja y restringida), se requiere un arreglo en dos etapas:

Etapas de Precalentamiento (Intercambiador de Calor):

Se utiliza el intercambiador de tubos y coraza. El agua proveniente de las duchas eléctricas (fluido caliente, operando a la presión de control de 0.4 bares) cede su calor al flujo de agua principal del banco de pruebas (fluido frío en el intercambiador). En esta práctica, no se estudiará el intercambiador en sí, sino que se configurará (usando los chicotillos) en la disposición que garantice la mayor transferencia térmica para elevar al máximo la temperatura del agua principal.

Suministro a la Torre:

El agua principal, ahora calentada tras pasar por el intercambiador, es impulsada hacia la parte superior de la torre de enfriamiento. La bomba encargada de este circuito está ubicada estratégicamente debajo del recipiente/tanque de recolección para asegurar un cebado positivo constante y mantener el caudal requerido por los distribuidores de la torre.

5. Procedimiento Experimental

Fase A: Preparación del Precalentamiento y Condiciones Ambientales

Medir las condiciones atmosféricas del laboratorio: Temperatura de bulbo seco (Tbs) y Temperatura de bulbo húmedo (Tbh) del aire ambiente usando un psicrómetro o sensores dispuestos en el laboratorio.

Verificar que la bomba (ubicada debajo del recipiente) esté correctamente cebada.

Configurar los chicotillos del intercambiador de calor en contracorriente para maximizar la temperatura de salida del agua que irá hacia la torre.

Fase B: Arranque del Sistema

Circuito Principal (Caudal de la Torre): Encender la bomba inferior para hacer circular el agua a través del intercambiador y posteriormente hacia los aspersores/distribuidores de la torre de enfriamiento.

Circuito de Calentamiento (Duchas): Abrir la válvula hacia las duchas eléctricas hasta fijar el manómetro exactamente a 0.4 bares. Encender las duchas en su nivel máximo de temperatura.

Encender el ventilador de tiro de la torre de enfriamiento (si el diseño es de tiro forzado o inducido).

Fase C: Toma de Datos

Monitorizar las temperaturas hasta alcanzar el estado estacionario (fluctuaciones menores durante al menos 3 minutos).

Registrar los siguientes parámetros en la bitácora:

T ingreso, torre: Temperatura del agua ingresando a la torre de enfriamiento (agua calentada por el intercambiador).

T sumidero: Temperatura del agua fría saliendo de la torre (en la piscina o tanque de recolección).

Caudal de agua circulando por la torre.

T_{bs} y T_{bh} del aire ambiente en ese instante.

Si es posible, variar la velocidad del ventilador de la torre o ajustar las duchas a un nivel de temperatura medio para tomar un segundo y tercer set de datos experimentales.

Para apagar: Desenergizar primero las duchas eléctricas, dejar circular el agua principal por 5 minutos para disipar el calor residual, apagar el ventilador de la torre y, finalmente, apagar la bomba de circulación.

6. Procesamiento de Datos y Cálculos Teóricos

Con los datos experimentales obtenidos, calcular para cada corrida:

Rango y Acercamiento:

$$R = T_{entrada} - T_{sumidero}$$

Calor Disipado por el Agua (Q):

El calor removido del agua, asumiendo calor específico constante ($C_p = 4.18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$)

Eficiencia Térmica de la Torre

$$\eta = \left(\frac{R}{R + A} \right) * 100$$

Factor de desempeño de la torre

$$FD = \frac{\eta_{calculada}}{\eta_{teorica}} * 100$$

Estimación del Agua Evaporada

7. Cuestionario y Análisis

Con base en los datos de Acercamiento (Approach) calculados, ¿qué tan cerca operó la torre de su límite teórico máximo impuesto por las condiciones ambientales del laboratorio?

Justifique técnica e hidráulicamente por qué fue necesario utilizar el intercambiador de calor de tubos y coraza para calentar el agua de la torre, en lugar de inyectar el agua de las duchas eléctricas directamente a los aspersores.

¿Cómo afectaría a la eficiencia de la torre un aumento en la humedad relativa del ambiente del laboratorio (lo que alteraría T_{bh})?

Identifique las principales fuentes de error experimental en la medición de la temperatura del agua de salida en el tanque de recolección.