

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO  
DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO  
PARA DETERMINAR EL CALOR ESPECÍFICO  
DE NÉCTARES”**

**INTEGRANTES:**

**BACH. LEOPOLDO JAVIER PAREDES PANDURO  
BACH. CARLOS ALBERTO ROCHA VELA  
BACH. ELÍAS BABILONIA SOTO**

**ASESOR: ING. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ**

**IQUITOS - PERÚ  
2015**



**UNAP**

**Facultad de  
Ingeniería Química**



**ACTA DE SUSTENTACIÓN**

En la ciudad de Iquitos, a las.....DIEZ HORAS Y QUINCE MINUTOS..... del décimo día del mes de enero del año dos mil quince, en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, se dio inicio al acto de Sustentación Pública de la tesis titulada: **“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO PARA DETERMINAR EL CALOR ESPECÍFICO DE NÉCTARES.”**, presentada por los bachilleres: Leopoldo Javier Paredes Panduro, Carlos Alberto Rocha Vela y Elías Babilonia Soto, para obtener el **TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERO QUÍMICO** que otorga la UNAP, de acuerdo a la Ley 30220 y el Estatuto General de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.

El Jurado Calificador nombrado por la Dirección de Escuela de Formación Profesional, está integrado por los siguientes catedráticos:

- |  |                   |
|--|-------------------|
| <b>Ing. JORGE ANTONIO SUÁREZ RUMICHE, Mgr.</b> | <b>Presidente</b> |
| <b>Ing. JORGE ENRIQUE CORNEJO ORBE</b>         | <b>Miembro</b>    |
| <b>Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA</b>      | <b>Miembro</b>    |
| <br>   |                   |
| <b>Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ</b>                | <b>Asesor</b>     |

Luego de haber escuchado con mucha atención la exposición y formuladas las preguntas respectivas las que fueron respondidas en forma .....SATISFACTORIA....., el Jurado Calificador -previa deliberación- llegó a las siguientes conclusiones:

- 1° La tesis ha sido:.....APROBADA..... Por: ...UNANIMIDAD.....  
 Con calificación de: .....EXCELENTE.....
- 2° Observaciones: EN HOJA ADJUNTA.....

Siendo las .....ONCE HORAS..... se dio por terminado el acto, felicitando a los sustentantes por sus exposición.

  
Ing. JORGE ANTONIO SUÁREZ RUMICHE, Mgr.  
**Presidente**

  
Ing. JORGE ENRIQUE CORNEJO ORBE  
**Miembro**

  
Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA  
**Miembro**

Esta tesis fue aprobada en sustentación pública el 10 de enero del 2015, con el calificativo de excelente. El jurado calificador estaba conformado por los siguientes docentes.

.....  
Ing. JORGE SUÁREZ RUMICHE, Mgr.  
PRESIDENTE  
CIP. 60878

.....  
Ing. JORGE CORNEJO ORBE  
MIEMBRO  
CIP. 93663

.....  
Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc  
MIEMBRO  
CIP. 93078

.....  
Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ.  
ASESOR  
CIP. 33277

## AGRADECIMIENTOS

Leopoldo Javier Paredes Panduro

A mis queridos padres Javier y Lily, a mi esposa Claudia María y a mi hijo Maximiliano Javier y a todos mis demás familiares por su apoyo incondicional a lo largo de la realización de esta tesis, y con el mismo cariño a todos mis amigos que siempre me ayudaron a alcanzar mis metas.

Muchas gracias a todos.

Carlos Alberto Rocha Vela

A Dios por la vida prestada y por todas las bendiciones que me da día a día, a mis queridos padres Segundo y Mery por haberme formado con el buen ejemplo, a mi esposa Nancy y a mis hijos Carlos y Bruno por su amor incondicional.

Elías Babilonia Soto

A mis queridos padres Juan y Judith, a mis hijos José María del Carmen, Emanuel Olmex, Xhemdor Daniel, Meliza, Karen y Lucelia por todo el apoyo para poder desarrollar todos mis objetivos tanto personales como académicos. Este logro es también de ustedes. También agradezco en especial a todos mis hermanos.

## ÍNDICE GENERAL

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| Índice de figuras .....        | iii         |
| Índice de tablas .....         | v           |
| <b>I. RESUMEN.....</b>         | <b>vii</b>  |
| <b>II. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>viii</b> |
| <b>III. ANTECEDENTES .....</b> | <b>x</b>    |
| <b>IV. OBJETIVOS.....</b>      | <b>xii</b>  |
| <b>V. JUSTIFICACIÓN .....</b>  | <b>xiii</b> |

### CAPÍTULO I

|  |          |
|--|----------|
| <b>MARCO TEÓRICO.....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1. Calor específico.....   | 1        |
| 1.2. Primera ley de la termodinámica.....  | 2        |
| 1.3. Mecanismos básicos de la transferencia de calor.....                              | 5        |
| 1.3.1. Conducción.....   | 5        |
| 1.3.2. Convección.....   | 6        |
| 1.3.3. Radiación.....  | 7        |
| 1.4. Ley de Fourier para la conducción de calor .....                                  | 10       |
| 1.4.1. Conducción de calor a través de una placa o una pared.....                      | 11       |
| 1.4.2. Conducción de calor a través de un cilindro hueco.....                          | 12       |
| 1.5. Mecanismos combinados de la transferencia de calor en un cilindro de dos capas... | 13       |
| 1.6. Resistencias térmicas .....   | 17       |
| 1.7. Números adimensionales .....  | 19       |
| 1.8. Transferencia de calor en recipientes agitados.....                               | 22       |

### CAPÍTULO II

|   |           |
|---|-----------|
| <b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO .....</b>   | <b>25</b> |
| 2.1. Descripción del diseño del equipo .....  | 25        |
| 2.2. Aplicación de la primera ley de la termodinámica en el diseño del equipo.....        | 28        |
| 2.3. Mecanismos básicos de la transferencia de calor aplicados al diseño del equipo ..... | 35        |

|  |    |
|--|----|
| 2.4. Determinación del espesor adecuado para el aislante térmico.....      | 43 |
| 2.5. Determinación de la resistencia térmica global .....                  | 46 |
| 2.6. Determinación de la potencia nominal de la resistencia eléctrica..... | 49 |
| 2.7. Determinación de las dimensiones del cilindro de pared compuesta..... | 52 |
| 2.8. Construcción del cilindro de pared compuesta .....                    | 55 |

### **CAPÍTULO III**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INSTALACIÓN DEL EQUIPO .....</b>  | <b>61</b> |
| 3.1. Descripción y especificación de los componentes principales del equipo..... | 61        |
| 3.2. Diagrama de instalación eléctrica .....                                     | 63        |
| 3.3. Disposición adecuada del equipo en el laboratorio.....                      | 63        |

### **CAPÍTULO IV**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO .....</b>              | <b>64</b> |
| 4.1. Determinación de los parámetros de operación del equipo ..... | 64        |
| 4.2. Perfil de temperatura en el cilindro de pared compuesta ..... | 67        |
| 4.3. Experimentos realizados y discusión de resultados .....       | 72        |

### **CAPÍTULO V**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ANÁLISIS DE COSTO.....</b>                 | <b>79</b> |
| 5.1. Costo de diseño .....                    | 79        |
| 5.2. Costo de materiales y equipos.....       | 79        |
| 5.3. Costo de instalación y mano de obra..... | 80        |
| 5.4. Otros costos.....                        | 80        |
| 5.5. Costo total .....                        | 80        |

### **CAPÍTULO VI**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b> | <b>81</b> |
| 6.1. Conclusiones .....                     | 81        |
| 6.2. Recomendaciones.....                   | 82        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....   | <b>83</b> |
| <b>ANEXOS</b> .....   | <b>86</b> |
| <b>Anexo 1.</b> Vista completa del equipo .....                                     | 87        |
| <b>Anexo 2.</b> Cargando el equipo para el experimento con néctar de cocona.....    | 88        |
| <b>Anexo 3.</b> Cargando el equipo para el experimento con néctar de camu camu..... | 89        |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1. Intercambio de radiación en la superficie .....   | 9  |
| Figura 1.2. Intercambio de radiación entre una superficie y sus alrededores.....  | 9  |
| Figura 1.3. Conducción de calor en una pared plana.....   | 12 |
| Figura 1.4. Conducción de calor a través de un cilindro hueco.....  | 13 |
| Figura 15. Esquema de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación<br>en un cilindro de dos capas.....                  | 13 |
| Figura 1.6. Circuito térmico para un cilindro de dos capas.....   | 18 |
| Figura 1.7. Perfil de velocidad de capa límite con transferencia de calor por convección<br>natural desde una placa vertical calentada..... | 21 |
| Figura 1.8. Vista general de un tanque con agitador de turbina .....  | 22 |
| Figura 1.9. Transferencia de calor en un recipiente con agitación .....   | 24 |
| Figura 2.1. Sistema termodinámico en estudio.....   | 25 |
| Figura 2.2. Esquema ideal del equipo.....   | 27 |
| Figura 2.3. Representación gráfica de $T_N$ versus $t$ .....  | 34 |
| Figura 2.4. Representación gráfica de $C_{pN}$ versus $T_m$ .....   | 35 |
| Figura 2.5. Mecanismos básicos de la transferencia de calor en el cilindro de pared<br>compuesta .....                                      | 35 |
| Figura 2.6. Simulación realizada para determinar el valor de $N_G N_{Pr}$ .....   | 41 |
| Figura 2.7. Simulación realizada para determinar el valor de $h_{Ae}$ .....   | 42 |
| Figura 2.8. Simulación realizada para determinar el valor de $h_N$ .....  | 42 |
| Figura 2.9. Simulación realizada para determinar el valor de $\dot{Q}_{PPS}$ , considerando que $e_{At} =$<br>0 .....                       | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.10. Simulación realizada para determinar los valores de $\dot{Q}_{PPS}$ , considerando diferentes valores de $e_{At}$ ..... | 44 |
| Figura 2.11. Representación gráfica de $\dot{Q}_{PPS}$ versus $e_{At}$ .....   | 45 |
| Figura 2.12. Simulación realizada para determinar el valor de $\dot{Q}_{conv, r_4 \rightarrow Aire}$ .....                           | 47 |
| Figura 2.13. Simulación realizada para determinar el valor de $h_{rad, r_4}$ .....   | 48 |
| Figura 2.14. Simulación realizada para determinar el valor de $\sum R$ .....   | 48 |
| Figura 2.15. Esquema de la capa de acero inoxidable que cubre al néctar .....  | 51 |
| Figura 2.16. Esquema del cilindro interior .....   | 52 |
| Figura 2.17. Esquema del cilindro exterior .....   | 53 |
| Figura 2.18. Fijación del aro entre los cilindros interior y exterior.....   | 53 |
| Figura 2.19. Esquema del aro entre los cilindros interior y exterior .....   | 54 |
| Figura 2.20. Esquema de la tapa aislada.....   | 54 |
| Figura 2.21. Trazos realizados para la construcción del cilindro de pared compuesta .....  | 55 |
| Figura 2.22. Regiones 1 y 3, después de ser roladas .....  | 55 |
| Figura 2.23. Cilindro interior con su base .....   | 56 |
| Figura 2.24. Aro entre los cilindros interior y exterior.....  | 56 |
| Figura 2.25. Espacio entre los cilindros interior y exterior, cubierto con lana de vidrio ....                                       | 57 |
| Figura 2.26. Acoplamiento de las regiones que forman la tapa aislada .....   | 57 |
| Figura 2.27. Cilindro de pared compuesta.....  | 58 |
| Figura 2.28. Tapa aislada.....   | 58 |
| Figura 2.29. Resistencia eléctrica.....  | 59 |
| Figura 2.30. Enchufe y cable vulcanizado.....  | 59 |
| Figura 2.31. Termómetro digital .....  | 59 |
| Figura 2.32. Motor eléctrico con agitador .....  | 60 |
| Figura 3.1. Diagrama de instalación eléctrica.....   | 63 |
| Figura 4.1. Simulación realizada para determinar el valor de $Z$ .....   | 66 |
| Figura 4.2. Simulación realizada para determinar el valor de $f_C$ .....   | 66 |
| Figura 4.3. Simulación realizada para determinar el valor de $P_R$ .....   | 67 |
| Figura 4.4. Perfil de temperatura en el cilindro de pared compuesta, en el experimento con agua pura.....                            | 71 |
| Figura 4.5. Representación gráfica de $T_N$ versus $t$ , en el experimento 1.....  | 72 |



|   |    |
|---|----|
| Figura 4.6. Representación gráfica de $C_{pN}$ versus $T_m$ , en el experimento 1 ..... | 73 |
| Figura 4.7. Representación gráfica de $T_N$ versus $t$ , en el experimento 2.....       | 74 |
| Figura 4.8. Representación gráfica de $C_{pN}$ versus $T_m$ , en el experimento 2.....  | 75 |
| Figura 4.9. Representación gráfica de $T_N$ versus $t$ , en el experimento 3.....       | 76 |
| Figura 4.10. Representación gráfica de $C_{pN}$ versus $T_m$ , en el experimento 3..... | 77 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.1. Constantes para la ecuación (1.57).....   | 21 |
| Tabla 1.2. Ecuaciones simplificadas para convección natural del aire a planos y cilindros<br>verticales.....                                       | 21 |
| Tabla 2.1. Resultados obtenidos mediante simulación de las ecuaciones (2.56) y (2.51)...   | 45 |
| Tabla 3.1. Dimensiones del cilindro interior .....   | 61 |
| Tabla 3.2. Dimensiones del cilindro exterior .....   | 61 |
| Tabla 3.3. Dimensiones del aro entre los cilindros interior y exterior .....   | 61 |
| Tabla 3.4. Dimensiones de la tapa aislada.....   | 62 |
| Tabla 3.5. Especificaciones técnicas del motor eléctrico con agitador .....  | 62 |
| Tabla 3.6. Especificaciones técnicas de la resistencia eléctrica .....   | 62 |
| Tabla 3.7. Especificaciones técnicas del termómetro digital.....   | 63 |
| Tabla 4.1. Resultados de los parámetros de operación del equipo .....  | 67 |
| Tabla 4.2. Tabulación de los datos para la elaboración del perfil de temperatura, en el<br>cilindro de pared compuesta.....                        | 69 |
| Tabla 4.3. Tabulación de $T_N$ versus el tiempo $t$ , en el experimento 1.....   | 72 |
| Tabla 4.4. Resultados de la altura, densidad, volumen y masa del néctar en el experimento<br>1 .....   | 73 |
| Tabla 4.5. Tratamiento de datos y resultados del calor específico del néctar, obtenidos<br>mediante el modelo matemático en el experimento 1 ..... | 73 |
| Tabla 4.6. Resultados del calor específico del néctar, mediante la ecuación (2.30), en el<br>experimento 1. ....                                   | 74 |
| Tabla 4.7. Tabulación de $T_N$ versus el tiempo $t$ , en el experimento 2.....   | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 4.8. Resultados de la altura, densidad, volumen y masa del néctar en el experimento 2 .....  | 75 |
| Tabla 4.9. Tratamiento de datos y resultados del calor específico del néctar, obtenidos mediante el modelo matemático en el experimento 2 .....  | 75 |
| Tabla 4.10. Resultados del calor específico del néctar, mediante la ecuación (2.30), en el experimento 2 .....                                   | 76 |
| Tabla 4.11. Tabulación de $T_N$ versus el tiempo $t$ , en el experimento 3 .....   | 76 |
| Tabla 4.12. Resultados de la altura, densidad, volumen y masa del néctar en el experimento 3 .....   | 77 |
| Tabla 4.13. Tratamiento de datos y resultados del calor específico del néctar, obtenidos mediante el modelo matemático en el experimento 3 ..... | 77 |
| Tabla 4.14. Resultados del calor específico del néctar, mediante la ecuación (2.30), en el experimento 3 .....                                   | 78 |
| Tabla 5.1. Costo de diseño.....  | 79 |
| Tabla 5.2. Costo de materiales y equipos .....   | 79 |
| Tabla 5.3. Costo de instalación y mano de obra. ....   | 80 |
| Tabla 5.4. Otros costos .....  | 80 |

## I. RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se ha realizado el diseño y construcción de un equipo para determinar el calor específico de néctares. Se ha hecho la aplicación de la primera ley de la termodinámica a un proceso de calentamiento a llevarse a cabo en el equipo, considerándose un sistema termodinámico el cual está compuesto por el néctar y la capa de metal que rodea al mismo, como resultado de esta aplicación se obtuvo una ecuación que relaciona el calor específico del néctar con la temperatura.

El equipo está conformado por un cilindro de pared compuesta, una resistencia eléctrica, un motor eléctrico con agitador, un termómetro digital y las conexiones eléctricas (enchufe y cable vulcanizado). El cilindro de pared compuesta posee tres capas, siendo la primera y la tercera capa de acero inoxidable; la segunda capa lo conforma la lana de vidrio o aislante térmico, cuyo fin es reducir en gran medida el flujo de calor perdido por el sistema termodinámico a través de las capas del equipo al aire exterior, cuando se lleve a cabo el proceso de calentamiento.

Los mecanismos básicos de transferencia de calor se aplican al diseño del equipo, con el fin obtener una ecuación que relaciona el flujo de calor perdido por el sistema termodinámico con el espesor de la capa de aislante; lo cual mediante la simulación en una hoja de cálculo de Excel, sirvió para determinar el espesor adecuado del aislante térmico. También se determinaron los parámetros de operación del equipo, cuyos valores se mantuvieron constantes en todos los experimentos que se realizaron en el equipo.

Se realizaron tres experimentos utilizando néctar de cocona, refresco de cocona y néctar de camu camu. En cada experimento se determinó la ecuación del calor específico en función de la temperatura y el calor específico promedio correspondiente al intervalo de temperatura en el que se llevó a cabo el proceso de calentamiento.

## II. INTRODUCCIÓN

El calor específico o capacidad calorífica de un néctar, es una propiedad termofísica que representa la cantidad de energía necesaria para elevar una unidad de temperatura a una unidad de masa y en el Sistema Internacional de Unidades (SI) se expresa en las siguientes unidades ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ó  $\text{J} \cdot \text{k mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) [1, 2]. En el calentamiento o enfriamiento de un néctar, la cantidad de calor suministrada depende de la masa, el calor específico y el incremento de temperatura; para un proceso continuo el calor transferido depende del flujo másico, el calor específico y del cambio de temperatura; por ende el calor específico es un parámetro que refleja la capacidad de predicción de las velocidades de transferencia de calor para el calentamiento o congelamiento de productos alimenticios [1].

Las propiedades termofísicas en el área de los alimentos, sirven para calcular la cantidad de energía que se emplea en un proceso de calentamiento; esto permite establecer puntos críticos para mejorar la eficiencia de equipos y de plantas industriales, lo cual se refleja en un menor costo de procesamiento del alimento [3].

La variación en la temperatura y el contenido del agua en los procesos unitarios afecta generalmente las propiedades termofísicas como densidad, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica. Por lo tanto, los modelos matemáticos que expresan las relaciones de estas propiedades con la temperatura y la concentración, son una alternativa interesante para la implementación de diseños experimentales y computacionales, siendo de mucha utilidad en el diseño de equipos (evaporadores, intercambiadores de calor, filtros y mezcladores) y la automatización de procesos industriales [3].

En el presente trabajo de tesis se plantea, el diseño la construcción y la instalación de un equipo para determinar el calor específico de néctares; para esto se aplicará la primera ley de la termodinámica y los mecanismos básicos de la transferencia de calor. Para diseñar el equipo, básicamente se tiene en cuenta el proceso que se llevará a cabo en el mismo, este proceso consiste en calentar un determinado néctar desde una temperatura inicial (entre  $15^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ ), hasta una temperatura final (entre  $80^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ ). El equipo está conformado por un

cilindro de pared compuesta, una resistencia eléctrica, un motor eléctrico con agitador, un termómetro digital y las conexiones eléctricas. La resistencia eléctrica disipa cierta cantidad de calor, haciendo que la temperatura del néctar varíe con el tiempo, pero no todo el calor que disipa la resistencia se transfiere al néctar, parte de este calor se pierde a través de las paredes del equipo. El motor eléctrico con agitador realiza trabajo de eje sobre el néctar, haciendo que la temperatura en cualquier parte del espacio que ocupa el néctar sea la misma. Se trata de reducir las pérdidas de energía a través de las paredes del equipo, es por eso que el cilindro de pared compuesta tendrá una capa de aislante térmico.

### III. ANTECEDENTES

Desde el año 1983 en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), se han desarrollado proyectos de tesis, que se relacionan con el diseño, construcción e instalación de equipos. De acuerdo a la revisión bibliográfica efectuada, existen varios trabajos de tesis de diseño y construcción de equipos, pero específicamente trabajos similares al que se pretende realizar se refieren a continuación.

Salas [1] realizó un trabajo de diseño y construcción de un equipo con modelo matemático para calcular la capacidad calorífica de alimentos líquidos. Para deducir el modelo matemático se ha hecho la aplicación de la ecuación de balance de energía a un proceso de calentamiento a llevarse a cabo en el equipo; considerándose un sistema termodinámico en estudio, el cual está compuesto por el alimento líquido y la capa de metal que rodea al mismo. Los mecanismos básicos de transferencia de calor fueron aplicados al diseño del equipo, obteniéndose una ecuación que relaciona el flujo de calor perdido por el sistema termodinámico con el espesor de la capa de aislante; lo cual mediante la simulación en una hoja de cálculo de Excel, sirvió para determinar el espesor adecuado del aislante térmico. También se determinaron los parámetros de operación del equipo, cuyos valores se mantuvieron constantes en todos los experimentos que se realizaron en el equipo. En este trabajo se determinó la capacidad calorífica de los siguientes alimentos líquidos: extracto de cocona al 96.16% en peso de agua, néctar de cocona diluido al 98.59% en peso de agua, refresco de aguaje al 92.79% en peso de agua y soluciones azucaradas al 94.03% y 78% en peso de agua.

Moraga [3] realizó la determinación del calor específico de murta (*Ugni molinae* Turcz) y arándano (*Vaccinium corymbosum* L) en un rango de temperatura entre 20 °C y 80 °C por el método de calorimetría diferencial de barrido. En este trabajo se obtuvo los termogramas de los mencionados frutos, lo cual sirvió para determinar los modelos matemáticos que permiten estimar el calor específico en función de la temperatura.

Paima y Ramos [4] realizaron un trabajo de diseño, construcción e instalación de un equipo para medir la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos. En este

trabajo se determinó la conductividad térmica en función de la temperatura para los siguientes alimentos: azúcar blanca, colado de plátano, jamonada de cerdo y esencia de vainilla. Los resultados que presentan los experimentos de estas cuatro materias primas, coinciden con la teoría consultada de que la conductividad térmica aumenta a medida que se incrementa la temperatura.

Bon et al. [5] determinaron la densidad, la capacidad calorífica y la conductividad térmica de la pulpa de mango (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins) como funciones del contenido de humedad y la temperatura, usando modelos lineales multivariados. En este trabajo, se verificó que el contenido de humedad exhibe una mayor influencia que la temperatura en las propiedades estudiadas.

Muramatsu et al. [6] han realizado la estimación de las propiedades termofísicas de tres clases de jugos de frutas (el jugo de uva, el jugo de naranja y el zumo de piña); estas propiedades fueron medidas a varias temperaturas (10 °C a 50 °C) y concentraciones de sólidos (10% a 50%). El calor específico de cada muestra fue estimado de la definición de difusividad térmica. Las ecuaciones de la conductividad térmica y el calor específico de cada muestra fueron representadas por las ecuaciones empíricas como una función de la concentración de sólidos y la temperatura.

Autores como De Dios Alvarado [7] han propuesto modelos matemáticos en los cuales relacionan el calor específico con el contenido de humedad para varios alimentos en un amplio rango de temperatura.

Mediciones del calor específico han sido reportados para varios alimentos como: pan liso por Gupta [8], jugo de vegetales por Choi y Okos [9] y mariscos por Rahman [10].

## **IV. OBJETIVOS**

### **A. OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar, construir e instalar un equipo para determinar el calor específico de néctares.

### **B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Diseñar el proceso de calentamiento a llevarse a cabo en el equipo.
2. Aplicar la primera ley de la termodinámica para deducir un modelo matemático que relacione el calor específico del néctar con los parámetros de operación del equipo.
3. Aplicar los mecanismos básicos de la transferencia de calor para determinar el espesor adecuado del aislante térmico.
4. Determinar los parámetros de operación del equipo.
5. Construir el equipo e instalarlo.
6. Determinar el calor específico de diferentes néctares y comparar los resultados.



## V. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP) no cuenta con equipos que sirvan para determinar propiedades termofísicas de néctares o alimentos líquidos; esto impide que los estudiantes y docentes de la FIQ-UNAP realicen investigación tecnológica sobre propiedades termofísicas de néctares de frutas de la Amazonía Peruana, donde se haga aplicación directa de los cursos de termodinámica y transferencia de calor, pues en la Amazonía Peruana existe un gran número de frutas que para ser procesadas implica tener el conocimiento de sus propiedades termofísicas. Esto incrementa en gran medida la demanda de datos más exactos en las propiedades termofísicas y más sofisticación en el sentido de que es necesario conocer como cambian estas propiedades durante las etapas de un proceso.

Tratando de dar solución a esta problemática se plantea el trabajo de tesis titulado: “Diseño, construcción e instalación de un equipo para determinar el calor específico de néctares”. Al poner en funcionamiento el equipo, los estudiantes de la FIQ-UNAP podrán realizar prácticas en los cursos de termodinámica y transferencia de calor, fomentando de este modo la investigación referente a propiedades termofísicas de néctares de frutas de la Amazonía Peruana. Además el trabajo se complementará programando en Excel las ecuaciones que se deduzcan al hacer la aplicación de la primera ley de la termodinámica y los mecanismos básicos de la transferencia de calor, de manera que se pueda realizar el cálculo rápido del calor específico de un néctar cuando se lleven a cabo los experimentos en el equipo.

Se plantea por lo tanto como uno de los mecanismos más viables para la implementación del mencionado laboratorio de Operaciones y Procesos de la FIQ-UNAP, el aporte de los egresados en lo que se refiere al diseño, construcción e instalación de equipos que permitan realizar prácticas en los cursos de termodinámica y transferencia de calor, de tal modo que los docentes de la (FIQ-UNAP) utilicen estos equipos para afianzar los conocimientos teóricos que imparten en las aulas.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. CALOR ESPECÍFICO

El calor específico de una sustancia se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura un grado. Puede expresarse para 1 g, 1 lb, 1 mol, 1 k mol o 1 lb mol de sustancia. Por ejemplo un calor específico expresado en unidades del SI es  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  y en otras unidades es  $\text{cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\text{cal} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\text{kcal} \cdot \text{k mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\text{btu} \cdot \text{lb}_m^{-1} \cdot ^\circ\text{F}^{-1}$  o  $\text{btu} \cdot \text{lb mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{F}^{-1}$ . Entonces, el valor numérico real del calor específico, se puede expresar en unidades de masa y unidades molares [2], es decir:

$$1.0 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} = 1.0 \text{ btu} \cdot \text{lb}_m^{-1} \cdot ^\circ\text{F}^{-1}. \quad (1.1)$$

$$1.0 \text{ cal} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} = 1.0 \text{ btu} \cdot \text{lb mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{F}^{-1}. \quad (1.2)$$

Los calores específicos son funciones de la temperatura y con frecuencia se expresan mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_p = a + bT. \quad (1.3)$$

$$C_p = a + bT + cT^2. \quad (1.4)$$

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (1.5)$$

Donde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  tienen valores reales.

Puesto que el valor del calor específico varía con la temperatura, es necesario integrar o bien usar un valor promedio adecuado. Existen relaciones simples entre el calor específico a presión constante ( $C_p$ ) y el calor específico a volumen constante ( $C_v$ ), estas son:

$$\text{Líquidos y sólidos: } C_p \approx C_v. \quad (1.6)$$

$$\text{Gases ideales: } C_p = C_v + R. \quad (1.7)$$

Donde  $R$ , es la constante universal de los gases.

Si se conoce la composición química del alimento, el calor específico se puede calcular del siguiente modo [11]:

$$C_{pA} = 1424X_{HC} + 1549X_P + 1625X_{GR} + 847X_{CN} + 4187X_W. \quad (1.8)$$

Donde:

$C_{pA}$ : Calor específico del alimento,  $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

$X_{HC}$ ,  $X_P$ ,  $X_{GR}$ ,  $X_{CN}$  y  $X_W$  son las fracciones másicas de los carbohidratos, proteínas, grasas, cenizas y agua, respectivamente.

## 1.2. PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

El principio básico de todos los balances de energía es la ley de conservación de la energía, la cual dice que la energía no se crea ni se destruye. Esta ley también se conoce como “**primera ley de la termodinámica**” [12, 13]. En su forma más general, la primera ley de la termodinámica señala que la velocidad a la cual las corrientes de entrada llevan energía (cinética + potencial + interna) a un sistema termodinámico, más el flujo de calor neto (transferido al sistema – disipado o perdido por el sistema), menos la velocidad a la cual la energía sale del sistema termodinámico a través de corrientes de salida, menos la velocidad neta a manera de trabajo (efectuado por el sistema – efectuado sobre el sistema), es igual a la velocidad de acumulación de energía en dicho sistema (es decir, acumulación = entradas – salidas). Se define sistema termodinámico una parte del universo que se aísla para su estudio y puede intercambiar materia y energía con su entorno o alrededores a través de sus límites o fronteras, de esta forma el estado del sistema termodinámico queda determinado mediante las variables de estado (temperatura, presión, energía interna, etc). Un sistema

termodinámico puede ser abierto o cerrado según haya o no haya masa que atraviese sus límites durante el periodo de tiempo que cubre el balance de energía [2, 12, 14].

Un sistema termodinámico cerrado es el que puede intercambiar energía pero no materia con el exterior, mientras que si dicho sistema es abierto puede intercambiar materia y energía a la vez. Es posible obtener una ecuación de balance integral de energía para un sistema cerrado entre dos instantes de tiempo. Dado que la energía no puede crearse ni destruirse, los términos de generación y consumo desaparecen, quedando [12, 14, 15].

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida.} \quad (1.9)$$

En la ecuación integral de balance de masa para sistemas cerrados se eliminan los términos de entrada y salida, ya que por definición no hay masa que atraviese los límites de un sistema cerrado. Es posible sin embargo, que la energía se transfiera a través de los límites del sistema como calor o trabajo, de manera que los términos de la derecha de la igualdad en la ecuación (1.9) no pueden eliminarse automáticamente. Tal como sucede con los balances de masa, no obstante, los términos de acumulación resultan iguales al valor final de la cantidad balanceada (en este caso, la energía del sistema) menos el valor inicial de esa cantidad. En consecuencia, la ecuación (1.9) puede expresarse como:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Energía final} \\ \text{del sistema} \\ \text{termodinámico} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Energía inicial} \\ \text{del sistema} \\ \text{termodinámico} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Energía neta transferida} \\ \text{al sistema} \\ \text{termodinámico} \\ \text{(entradas - salidas)} \end{array} \right]. \quad (1.10)$$

Ahora:

$$\text{Energía inicial del sistema termodinámico} = U_i + E_{ki} + E_{pi}.$$

$$\text{Energía final del sistema termodinámico} = U_f + E_{kf} + E_{pf}.$$

$$\text{Energía neta transferida al sistema termodinámico} = Q - W.$$

Donde los subíndices i y f se refieren a los estados inicial y final del sistema;  $U$ ,  $E_k$ ,  $E_p$ ,  $Q$  y  $W$  representan la energía interna, energía cinética, energía potencial, el calor (transferido al sistema – disipado o perdido por el sistema) y trabajo (efectuado por el sistema – efectuado sobre el sistema). Entonces, la ecuación (1.10) queda:

$$(U_f - U_i) + (E_{kf} - E_{ki}) + (E_{pf} - E_{pi}) = Q - W. \quad (1.11)$$

Si se usa el símbolo  $\Delta$  para representar (final – inicial), la ecuación (1.11) queda:

$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W. \quad (1.12)$$

Como puede darse cuenta la ecuación (1.12) es la forma básica de la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado. Cuando se aplica esta ecuación a un sistema cerrado, deberán tenerse en cuenta las siguientes características.

1. La energía interna de un sistema depende casi por completo de la composición química, estado de agregación (sólido, líquido y gaseoso) y temperatura de los materiales del sistema. Es independiente de la presión para los gases ideales y casi independientes de ésta para líquidos y sólidos. Si no hay cambios de temperatura o de fase ni reacciones químicas en un sistema cerrado y si los cambios de presión se aproximan a cero (es decir  $\Delta P \approx 0$ ), entonces  $\Delta U \approx 0$ .
2. Si un sistema y sus alrededores se encuentran a la misma temperatura (o si el sistema se encuentra perfectamente aislado), entonces  $Q = 0$  y el sistema se denomina adiabático.
3. El trabajo sobre o por un sistema cerrado se lleva a cabo por movimiento de sus fronteras contra una fuerza opuesta, o el paso de una corriente eléctrica o radiante a través de dichas fronteras (ejemplos del primer tipo de trabajo son el movimiento de un pistón o la rotación de un eje que atraviesa las fronteras del sistema). Si no hay partes móviles ni corrientes eléctricas ni radiaciones del sistema, entonces  $W = 0$ .

Se tiene en cuenta la ecuación (1.10) al realizar un balance de energía para un intervalo de tiempo que abarca de  $t$  hasta  $t + \Delta t$ , suponiendo que todos los términos de dicha ecuación dependen del tiempo.

$$\begin{aligned}
& [U(t + \Delta t) - U(t)] + [E_k(t + \Delta t) - E_k(t)] \\
& + [E_p(t + \Delta t) - E_p(t)] = (\dot{Q} - \dot{W})\Delta t.
\end{aligned} \tag{1.13}$$

Dividiendo todo entre  $\Delta t$  y evaluando el límite para cuando  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\begin{aligned}
& \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[U(t + \Delta t) - U(t)] + [E_k(t + \Delta t) - E_k(t)]}{\Delta t} \\
& + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[E_p(t + \Delta t) - E_p(t)]}{\Delta t} = (\dot{Q} - \dot{W}).
\end{aligned} \tag{1.14}$$

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE_k}{dt} + \frac{dE_p}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}. \tag{1.15}$$

Donde:

$\dot{Q} = dQ/dt$ : Flujo de calor neto, W

$\dot{W} = dW/dt$ : Rapidez de realizar el trabajo, W

$dU/dt$ ,  $dE_k/dt$  y  $dE_p/dt$  son las velocidades de acumulación de la energía interna, la energía cinética y la energía potencial, respectivamente, W.

### 1.3. MECANISMOS BÁSICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor se puede manifestar por medio de uno o más de los tres mecanismos de transferencia: conducción, convección y radiación.

#### 1.3.1. CONDUCCIÓN

A la mención de la palabra **conducción** debemos evocar de inmediato conceptos de actividad atómica y molecular, pues hay procesos en estos niveles que sustentan este modo de transferencia de calor. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energizadas a las menos energizadas de una sustancia debido a las

interacciones entre las mismas [16]. En un gas las moléculas más calientes, que tienen más energía y movimiento, se encargan de impartir energía a moléculas colindantes que están a niveles energéticos más bajos. La situación es muy similar en los líquidos, aunque las moléculas están menos espaciadas y las interacciones moleculares son más fuertes y frecuentes. De igual manera, en un sólido, la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones reticulares. Los ejemplos de transferencia de calor por conducción son innumerables: en un horno la superficie interior que está en contacto con un gas caliente transfiere calor por conducción a la superficie exterior que está en contacto con el aire exterior, otro ejemplo es la congelación del suelo durante el invierno y la transferencia de energía a través de las paredes de un intercambiador de calor. Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo, para la conducción de calor la ecuación o modelo se conoce como “ley de Fourier” [16].

### 1.3.2. CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido [2]. Además, con frecuencia incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido. Conviene aclarar que hay una diferencia entre la transferencia de calor por convección forzada en la que se provoca el flujo de un fluido sobre una superficie sólida por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico; mientras que la convección libre o natural el flujo de calor es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones de temperatura en el fluido. Esto indica que en la convección forzada el fluido está en movimiento, mientras que en la convección libre el fluido está en reposo.

Para el caso de una tubería que contiene un líquido caliente, el flujo de calor por convección del líquido caliente a la pared interior del tubo puede evaluarse de la forma siguiente:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA(T_L - T_S). \quad (1.16)$$

Donde  $\dot{Q}_{\text{conv}}$  es el flujo de calor en W,  $A$  es el área de corte transversal o normal a la dirección del flujo de calor en  $\text{m}^2$ ,  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $T_L$  es la temperatura del líquido caliente en K y  $T_S$  es la temperatura de la superficie interior del tubo en K. La ecuación (1.16) también se conoce como la “ley de enfriamiento de Newton”.

### 1.3.3. RADIACIÓN

La radiación difiere de la conducción y la convección dado que no se requiere un medio físico para la transferencia. La radiación es la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas, de manera similar a las ondas electromagnéticas que propagan y transfieren la luz, es decir puede transmitirse a través del espacio y del vacío [2]. La radiación es un mecanismo de transferencia de calor muy importante en especial cuando hay grandes diferencias de temperatura, como en un horno de tubos de vapor o en hornos para cocción de alimentos. La evidencia experimental muestra que la transferencia de calor radiante es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, mientras que la convección y la conducción son proporcionales a una diferencia lineal de la temperatura [17]. El proceso de transferencia de calor radiación para la superficie se muestra en la figura 1.1. La radiación que la superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie y la velocidad a la que libera energía por unidad de área se denomina potencia emisiva  $E_b$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), que es establecida por la ley de Stefan-Boltzmann.

$$E_b = \sigma T_s^4. \quad (1.17)$$

Donde  $T_s$  es la temperatura absoluta de la superficie expresada en K,  $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  es la constante de Stefan-Boltzmann que es independiente de la superficie. Dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro.

El flux de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por:



$$E = \varepsilon\sigma T_s^4. \quad (1.18)$$

Donde  $\varepsilon$  es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro, esto depende marcadamente del material de la superficie.

La radiación también puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores. La radiación se origina desde una fuente especial, como el sol, o de otras superficies a las que se expone la superficie de interés. Sin tener en cuenta la fuente, se designa como la irradiación  $G$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), al flux de energía, a la que toda esa radiación incide sobre una superficie.

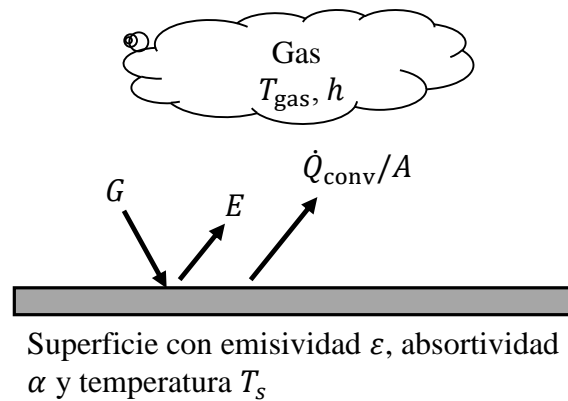
Una parte de la irradiación, o toda, tal vez sea absorbida por la superficie, y así se incrementaría la energía térmica del material. El flux de energía radiante que es absorbida por el área superficial unitaria, se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa denominada absorptividad  $\alpha$ , es decir:

$$G_{\text{abs}} = \alpha G. \quad (1.19)$$

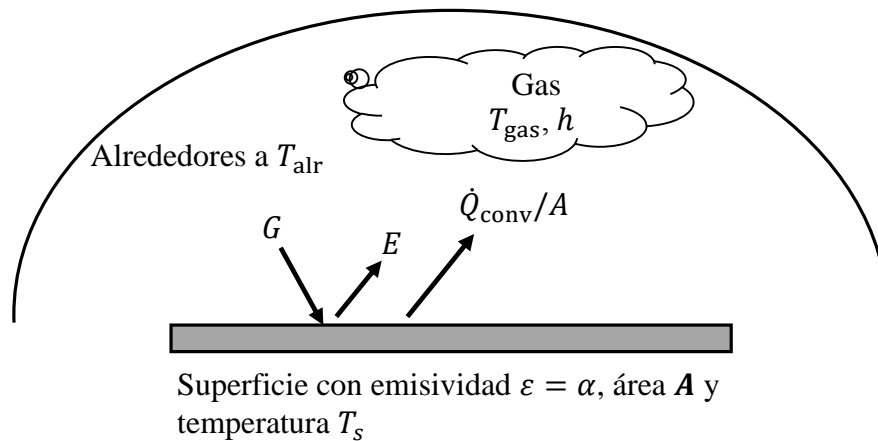
Donde  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Si  $\alpha < 1$  y la superficie es opaca, partes de la irradiación se reflejan. Si la superficie es semitransparente, partes de la irradiación se transmiten. Sin embargo, mientras que la radiación absorbida y emitida aumenta y disminuye, respectivamente, la energía térmica de la materia, la energía reflejada y transmitida no tienen ningún efecto sobre esta energía. El valor de  $\alpha$  depende de la naturaleza de la irradiación así como de la superficie misma. Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña a  $T_s$  y una superficie isotérmica mucho más grande que rodea por completo a la pequeña (figura 1.2). Los alrededores podrían ser, por ejemplo, las paredes de un horno cuya temperatura  $T_{\text{alr}}$  es diferente de la de una superficie rodeada; en este caso la irradiación se aproxima con la emisión de un cuerpo negro a  $T_{\text{alr}}$ , entonces  $G = \sigma T_{\text{alr}}^4$ . Suponiendo que la superficie es tal que  $\alpha = \varepsilon$  (superficie gris), el flujo neto de calor por radiación desde la superficie es:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon A E_b - \alpha A G = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{alr}}^4). \quad (1.20)$$

La ecuación (1.20) proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que gana debido a la absorción de radiación (figura 1.2).



**Figura 1.1.** Intercambio de radiación en la superficie [16].



**Figura 1.2.** Intercambio de radiación entre una superficie y sus alrededores [16].

Modelando el modo de radiación de forma similar a la convección, en este sentido se linealiza la ecuación del flujo de calor por radiación, haciéndola proporcional a la temperatura en lugar de la diferencia entre dos temperaturas a la cuarta potencia. Entonces la ecuación (1.20) se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = h_{\text{rad}}A(T_s - T_{\text{alr}}). \quad (1.21)$$

Comparando las ecuaciones (1.20) y (1.21), se tiene:

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{\text{air}})(T_s^2 + T_{\text{alr}}^2). \quad (1.22)$$

Donde  $h_{\text{rad}}$  es el coeficiente de transferencia de calor por radiación. Tener en cuenta que  $h_{\text{rad}}$  depende marcadamente de la temperatura, mientras que la dependencia del coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  por lo general es pequeña.

La superficie de la [figura 1.2](#), también puede transferir simultáneamente calor por convección a un gas adyacente, para tal caso el flujo de calor total desde la superficie se define como  $\dot{Q}_{\text{total}(s)}$  en W y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{total}(s)} = hA(T_s - T_{\text{gas}}) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{\text{alr}}^4). \quad (1.23)$$

#### 1.4. LEY DE FOURIER PARA LA CONDUCCIÓN DE CALOR

Los tres tipos de procesos de transferencia: transferencia de cantidad de movimiento, transferencia de calor y transferencia de masa, están caracterizados en su aspecto fundamental por el mismo tipo de ecuación básica, la cual puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\text{Velocidad de transferencia de un proceso} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia}}. \quad (1.24)$$

Esta igualdad establece un principio conocido de manera intuitiva: para que se pueda transferir una propiedad como calor o masa, es necesario que exista una fuerza impulsora o potencial que contrarreste la resistencia [2]. La ley de Fourier se fundamenta en la ecuación (1.24).

El flujo de calor por conducción para sólidos y fluidos obedece a la ley de Fourier y se define mediante la siguiente ecuación [2, 16, 17]:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}. \quad (1.25)$$

Donde  $\dot{Q}_{\text{cond}}$  es el flujo de calor por conducción en la dirección  $x$  en W,  $A$  es el área de corte transversal normal a la dirección del flujo de calor en  $\text{m}^2$ ,  $T$  es la temperatura en K,  $x$  la distancia en m y  $k$  es la conductividad térmica en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  en el SI. La cantidad  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura en la dirección  $x$ . El signo negativo de la ecuación (1.25) se incluye debido a que si el flujo de calor es positivo en determinado sentido, la temperatura disminuye en ese sentido.

#### 1.4.1. CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UNA PLACA PLANA O UNA PARED

Para una placa plana o pared con área de corte transversal  $A$  y conductividad térmica  $k$ , el flujo de calor por conducción se puede evaluar haciendo uso de la ecuación (1.25) y de la figura 1.3.

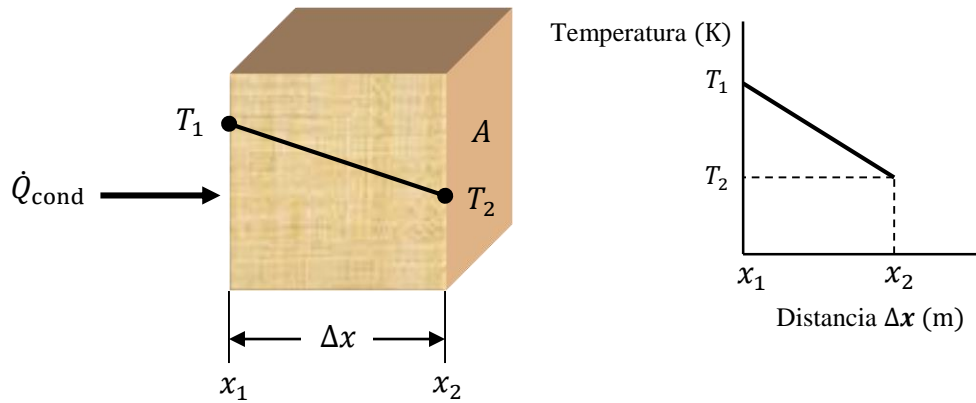
$$\dot{Q}_{\text{cond}} dx = -kA dT. \quad (1.26)$$

Integrando a ambos miembros de la ecuación (1.26) y despejando  $\dot{Q}_{\text{cond}}$ , se obtiene:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} \int_{x_1}^{x_2} dx = -kA \int_{T_1}^{T_2} dT. \quad (1.27)$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{-kA(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}. \quad (1.28)$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{(x_2 - x_1)} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{\Delta x}. \quad (1.29)$$



**Figura 1.3.** Conducción de calor en una pared plana (adaptada de [2] y [16]).

#### 1.4.2. CONDUCCIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UN CILINDRO HUECO

Se considera un cilindro hueco que se muestra en la [figura 1.4](#), con radio interior  $r_1$ , donde la temperatura es  $T_1$ ; un radio externo  $r_2$  a temperatura  $T_2$  y de longitud  $L$ .

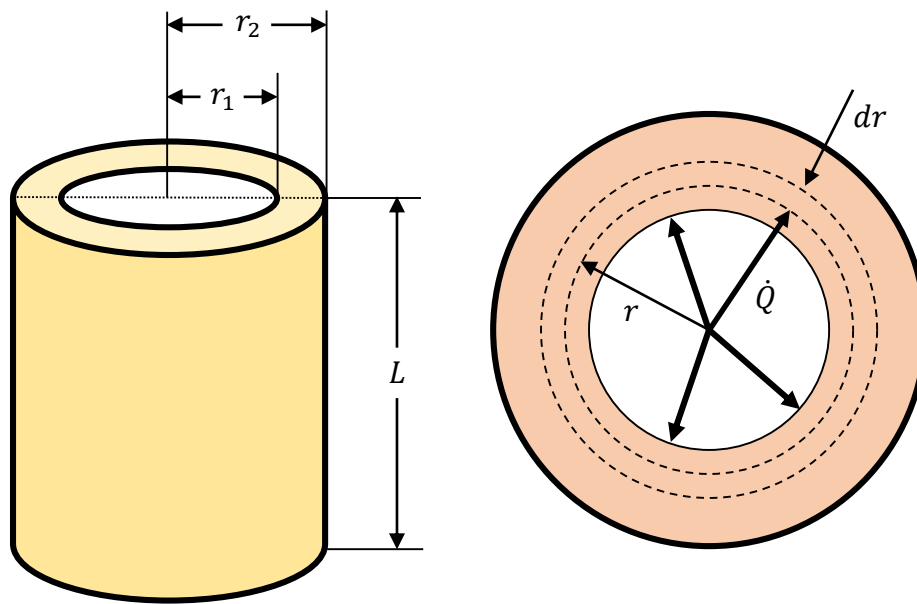
Al aplicar la ley de Fourier se tiene en cuenta que el flujo de calor por conducción  $\dot{Q}_{\text{cond}}$ , es radial desde la superficie interior hasta la exterior, el gradiente de temperatura es  $dT/dr$ , la conductividad térmica es  $k$  y el área de corte transversal normal al flujo de calor es  $A = 2\pi rL$ . Sustituyendo todo esto en la ecuación (1.25), se tiene:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -2\pi rLk \frac{dT}{dr}. \quad (1.30)$$

Integrando la ecuación (1.30)

$$\frac{\dot{Q}_{\text{cond}}}{2\pi L} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -k \int_{T_1}^{T_2} dT.$$

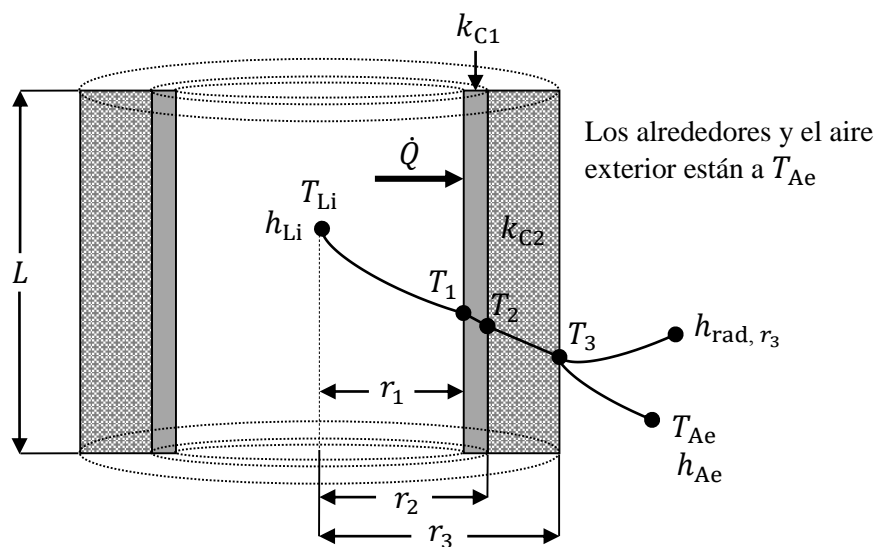
$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{2\pi Lk}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2). \quad (1.31)$$



**Figura 1.4.** Conducción de calor a través de un cilindro hueco (adaptada de [2]).

### 1.5. MECANISMOS COMBINADOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN CILINDRO DE DOS CAPAS

Se tiene un cilindro de pared compuesta por dos capas, y además el cilindro contiene un líquido caliente en su interior y está rodeado exteriormente por aire (figura 1.5).



**Figura 1.5.** Esquema de la transferencia de calor por conducción, convección y radiación en un cilindro de dos capas.

La transferencia de calor del líquido interior a la superficie de radio  $r_1$  (superficie interior de la capa 1) es por convección, se puede hacer uso de la ecuación **(1.16)**.

$$\dot{Q}_{\text{conv, Li} \rightarrow r_1} = 2\pi r_1 L h_{\text{Li}} (T_{\text{Li}} - T_1). \quad (1.32)$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{conv, Li} \rightarrow r_1}}{2\pi r_1 L h_{\text{Li}}} = (T_{\text{Li}} - T_1). \quad (1.33)$$

- $h_{\text{Li}}$  : Coeficiente convectivo para el líquido interior,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$   
 $L$  : Altura del cilindro de dos capas, m  
 $r_1$  : Radio interior de la primera capa, m  
 $\dot{Q}_{\text{conv, Li} \rightarrow r_1}$  : Flujo de calor del líquido interior a la superficie interior de la primera capa, W  
 $T_{\text{Li}}$  : Temperatura del líquido interior,  $^\circ\text{C}$   
 $T_1$  : Temperatura de la superficie interior de la primera capa,  $^\circ\text{C}$

La transferencia de calor de la superficie de radio  $r_1$  a la superficie de radio  $r_2$  (superficie exterior de la capa 1), es por conducción y se puede hacer uso de la ecuación **(1.31)**.

$$\dot{Q}_{\text{cond, } r_1 \rightarrow r_2} = \frac{2\pi L k_{\text{C1}}}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2). \quad (1.34)$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{cond, } r_1 \rightarrow r_2} \ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_{\text{C1}}} = (T_1 - T_2). \quad (1.35)$$

- $k_{\text{C1}}$  : Conductividad térmica de la primera capa,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$   
 $\dot{Q}_{\text{cond, } r_1 \rightarrow r_2}$  : Flujo de calor de la superficie interior a la superficie exterior de la primera capa, W  
 $r_2$  : Radio exterior de la primera capa, también es el radio interior de la segunda capa, m

$T_2$  : Temperatura de la superficie exterior de la primera capa, también es la temperatura de la superficie interior de la segunda capa, °C

De igual manera la transferencia de calor de la superficie de radio  $r_2$ , a la superficie de radio  $r_3$  (superficie exterior de la capa 2), se da por conducción, por lo cual:

$$\dot{Q}_{\text{cond}, r_2 \rightarrow r_3} = \frac{2\pi L k_{C2}}{\ln(r_3/r_2)} (T_2 - T_3). \quad (1.36)$$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{cond}, r_2 \rightarrow r_3} \ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_{C2}} = (T_2 - T_3). \quad (1.37)$$

$k_{C2}$  : Conductividad térmica de la segunda capa,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$\dot{Q}_{\text{conv}, r_2 \rightarrow r_3}$  : Flujo de calor de la superficie interior a la superficie exterior de la segunda capa, W

$r_3$  : Radio exterior de la segunda capa, m

$T_3$  : Temperatura de la superficie exterior de la segunda capa, °C

La transferencia de calor total de la superficie de radio  $r_3$  al aire exterior y a los alrededores es por convección y radiación, respectivamente, entonces:

$$\dot{Q}_{\text{Total } r_3} = \dot{Q}_{\text{conv}, r_3 \rightarrow \text{Aire}} + \dot{Q}_{\text{rad}, r_3 \rightarrow \text{Alrededores}}. \quad (1.38)$$

$$\dot{Q}_{\text{Total } r_3} = 2\pi r_3 L h_{\text{Ae}} (T_3 - T_{\text{Ae}}) + 2\pi r_3 L \varepsilon_{r_3} \sigma (T_3^4 - T_{\text{Ae}}^4). \quad (1.39)$$

De la definición de coeficiente de transferencia de calor por radiación, se tiene:

$$h_{\text{rad}, r_3} = \varepsilon_{r_3} \sigma (T_3 + T_{\text{Ae}}) (T_3^2 + T_{\text{Ae}}^2). \quad (1.40)$$

$h_{\text{Ae}}$  : Coeficiente convectivo para el aire exterior,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$\varepsilon_{r_3}$  : Emisividad de la superficie de radio  $r_3$



- $\dot{Q}_{\text{conv}, r_3 \rightarrow \text{Aire}}$  : Flujo de calor por convección de la superficie de radio  $r_3$  al aire exterior, W
- $\dot{Q}_{\text{rad}, r_3 \rightarrow \text{Alrededores}}$  : Flujo de calor por radiación de la superficie de radio  $r_3$  a los alrededores, W
- $T_{\text{Ae}}$  : Temperatura del aire exterior, °C
- $h_{\text{rad}, r_3}$  : Coeficiente de transferencia de calor por radiación,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

Cuando se haga uso de la ecuación (1.40), las temperaturas deben estar en K.

Reemplazando la ecuación (1.40) en la ecuación (1.39), se tiene:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{Total } r_3} &= 2\pi r_3 L (T_3 - T_{\text{Ae}}) [h_{\text{Ae}} + \varepsilon_{r_3} \sigma (T_3 + T_{\text{Ae}}) (T_3^2 + T_{\text{Ae}}^2)] \\ &= 2\pi r_3 L (T_3 - T_{\text{Ae}}) (h_{\text{Ae}} + h_{\text{rad}, r_3}).\end{aligned}\quad (1.41)$$

Reordenando la ecuación (1.41)

$$\frac{\dot{Q}_{\text{Total } r_3}}{2\pi r_3 L (h_{\text{Ae}} + h_{\text{rad}, r_3})} = (T_3 - T_{\text{Ae}}).\quad (1.42)$$

De acuerdo al esquema de la figura 1.5, se tiene:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{conv}, \text{Li} \rightarrow r_1} = \dot{Q}_{\text{cond}, r_1 \rightarrow r_2} = \dot{Q}_{\text{cond}, r_2 \rightarrow r_3} = \dot{Q}_{\text{Total } r_3}.\quad (1.43)$$

Sumando las ecuaciones (1.33), (1.35), (1.37) y (1.42)

$$\frac{\dot{Q}}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_1 h_{\text{Li}}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_{C1}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_{C2}} + \frac{1}{r_3 (h_{\text{Ae}} + h_{\text{rad}, r_3})} \right] = T_{\text{Li}} - T_{\text{Ae}}.\quad (1.44)$$

Factorizando y despejando  $\dot{Q}$ , se obtiene:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi L(T_{Li} - T_{Ae})}{\frac{1}{r_1 h_{Li}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_{C1}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_{C2}} + \frac{1}{r_3(h_{Ae} + h_{rad, r_3})}}. \quad (1.45)$$

Mediante la ecuación (1.45), se puede calcular el flujo de calor en dirección radial en un cilindro de dos capas, considerando los mecanismos básicos de la transferencia de calor.

## 1.6. RESISTENCIAS TÉRMICAS

Existe una analogía entre la difusión de calor y la carga eléctrica. De la misma forma que se asocia una resistencia eléctrica con la conducción de electricidad, se asocia una resistencia térmica con la conducción de calor [16]. Si se comparan las ecuaciones (1.24) y (1.32), la resistencia térmica para la transferencia de calor del líquido interior a la superficie de radio  $r_1$  (figura 1.5) es:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1 L h_{Li}}. \quad (1.46)$$

De igual manera, si se comparan las ecuaciones (1.24) y (1.34), la resistencia térmica para la transferencia de calor de la superficie de radio  $r_1$  a la superficie de radio  $r_2$  es:

$$R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_{C1}}. \quad (1.47)$$

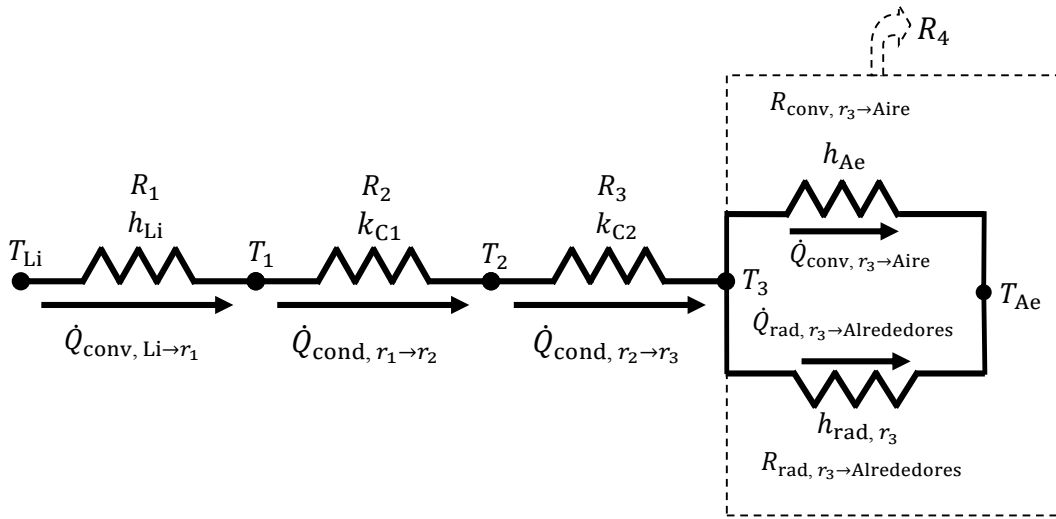
Entonces, con respecto a la ecuación (1.45), las resistencias térmicas son:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_1 L h_{Li}}, R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_{C1}}, R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_{C2}}, R_4 = \frac{1}{2\pi L r_3 (h_{Ae} + h_{rad, r_3})}.$$

Cada medio ofrece una resistencia térmica al flujo de calor, en consecuencia la resistencia térmica total  $\sum R$  es:

$$\sum R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4. \quad (1.48)$$

Por lo tanto, si se considera que el circuito térmico para la [figura 1.5](#) está formado por las cuatro resistencias térmicas, entonces es análogo a un circuito eléctrico en serie, de manera que la resistencia térmica equivalente es igual a la sumatoria de todas las resistencias térmicas, el flujo de calor es correspondiente a la intensidad de la corriente eléctrica y la temperatura al potencial. En consecuencia, el circuito térmico para la [figura 1.5](#) se muestra en la [figura 1.6](#).



**Figura 1.6.** Circuito térmico para un cilindro de dos capas.

Sin embargo, se debe observar que  $R_4$  representa la resistencia térmica equivalente para el circuito térmico formado por las resistencias térmicas de convección (entre la superficie de radio  $r_3$  y el aire exterior) y radiación (entre la superficie de radio  $r_3$  y los alrededores), es decir:

$$\frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_{conv, r_3 \rightarrow Aire}} + \frac{1}{R_{rad, r_3 \rightarrow Alrededores}}. \quad (1.49)$$

Despejando  $R_4$ ,

$$R_4 = \frac{R_{conv, r_3 \rightarrow Aire} R_{rad, r_3 \rightarrow Alrededores}}{R_{conv, r_3 \rightarrow Aire} + R_{rad, r_3 \rightarrow Alrededores}}. \quad (1.50)$$

Observando las ecuaciones (1.38), (1.39) y (1.50),

$$R_{\text{conv}, r_3 \rightarrow \text{Aire}} = \frac{1}{2\pi r_3 L h_{\text{Ae}}}. \quad (1.51)$$

$$R_{\text{rad}, r_3 \rightarrow \text{Alrededores}} = \frac{1}{2\pi r_3 L h_{\text{rad}, r_3}}. \quad (1.52)$$

Reemplazando las ecuaciones (1.51) y (1.52) en la ecuación (1.50), se obtiene:

$$R_4 = \frac{1}{2\pi L r_3 (h_{\text{Ae}} + h_{\text{rad}, r_3})}. \quad (1.53)$$

Ahora, si se reemplaza la ecuación (1.48) en la ecuación (1.45), se obtiene:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\text{Li}} - T_{\text{Ae}}}{\sum R}. \quad (1.54)$$

## 1.7. NÚMEROS ADIMENSIONALES

En la mayoría de las situaciones que implican transferencia de calor en un líquido o gas, por lo general se presenta una transferencia convectiva de calor además de la conductiva [12]. La mayoría de las correlaciones para predecir coeficientes de convección o de película ( $h$ ) son semi-empíricas y dependen de las propiedades físicas del fluido, del tipo y velocidad del fluido, de la diferencia de temperaturas y de la geometría del sistema físico individual considerado. Cuanto más turbulento sea el flujo, más alto será el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Para establecer las relaciones de datos de los coeficientes de transferencia de calor se usan números adimensionales de Reynolds y Prandtl. El número de Prandtl es la relación entre el componente cortante de la difusividad para la cantidad de movimiento ( $\mu/\rho$ ) y la

difusividad de calor  $[k/(\rho C_p)]$  y correlaciona el espesor relativo de la capa hidrodinámica con el de la capa térmica [2, 16].

$$N_{Pr} = \frac{(\mu/\rho)}{[k/(\rho C_p)]} = \frac{C_p \mu}{k}. \quad (1.55)$$

El número de Nusselt adimensional ( $N_{Nu}$ ) se usa para relacionar los datos para el coeficiente de convección con la conductividad térmica del fluido y una dimensión característica [2]. Por ejemplo, para el flujo de fluido dentro de una tubería con diámetro interior ( $D$ ), el número de Nusselt se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$N_{Nu} = \frac{hD}{k}. \quad (1.56)$$

Para la transferencia de calor por convección natural sobre una superficie o placa vertical isotérmica con altura ( $L$ ) inferior a 1 m, el número de Nusselt se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

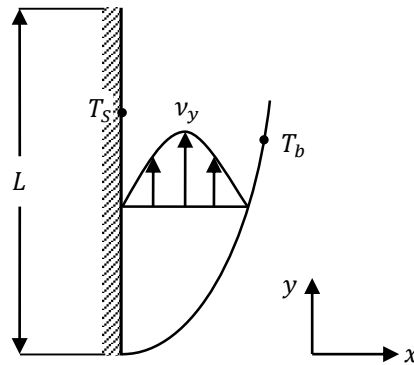
$$N_{Nu} = \frac{hL}{k} = a \left( \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T C_p \mu}{\mu^2 k} \right)^m = a (N_G N_{Pr})^m. \quad (1.57)$$

Donde  $a$  y  $m$  son constantes que se muestran en la [tabla 1.1](#),  $N_G$  es el número de Grashof,  $\rho$  es la densidad en  $\text{kg.m}^{-3}$ ,  $\mu$  es la viscosidad en  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ,  $\Delta T$  es la diferencia positiva de temperaturas entre la pared y la totalidad del fluido o viceversa en K,  $k$  es la conductividad térmica del fluido en  $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $C_p$  es el calor específico del fluido en  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $\beta$  es el coeficiente de expansión del fluido en  $\text{K}^{-1}$  y  $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$ . Todas las propiedades físicas se evalúan a la temperatura de la película  $T_m = (T_s + T_b)/2$  ([figura 1.7](#)).

En general, para un cilindro vertical de longitud o altura ( $L$ ) se usan las mismas ecuaciones de una placa vertical.

**Tabla 1.1.** Constantes para la ecuación (1.57) (adaptada de [2]).

| Geometría física   | $N_G N_{Pr}$  | $a$  | $m$ |
|--|---------------|------|-----|
| Planos y cilindros verticales<br>[altura vertical $L < 1$ m] | $<10^4$       | 1.36 | 1/5 |
|  | $10^4 - 10^9$ | 0.59 | 1/4 |
|  | $>10^9$       | 0.13 | 1/3 |



**Figura 1.7.** Perfil de velocidad de capa límite con transferencia de calor por convección natural desde una placa vertical calentada (adaptada de [2] y [16]).

Para transferencia de calor por convección natural del aire a planos y cilindros verticales, a 1 atm abs de presión se puede utilizar las siguientes ecuaciones que se muestran en la [tabla 1.2](#).

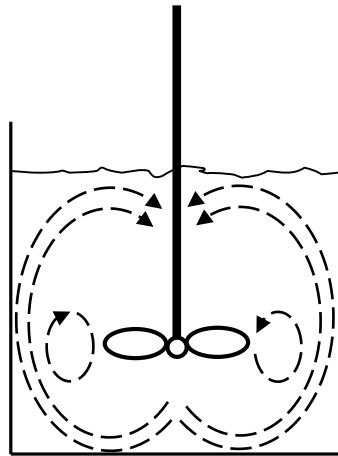
**Tabla 1.2.** Ecuaciones simplificadas para convección natural del aire a planos y cilindros verticales (adaptada de [2]).

| Geometría física                 | $N_G N_{Pr}$                  | $h(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ |
|----------------------------------|-------------------------------|---|
|                                  | Aire a 101.32 kPa (1 atm abs) | $L(\text{m}), \Delta T(\text{K})$                     |
| Planos y cilindros<br>verticales | $10^4 - 10^9$                 | $h = 1.37(\Delta T/L)^{1/4}$                          |
|                                  | $>10^9$                       | $h = 1.24(\Delta T)^{1/3}$                            |

## 1.8. TRANSFERENCIA DE CALOR EN RECIPIENTES AGITADOS

En las industrias químicas de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen en alto grado de la agitación y mezclado eficaz de los fluidos [2]. Por lo general, la agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. Existen varios objetivos en la agitación de fluidos y algunos de ellos son:

- Mezclado de dos líquidos miscibles, tales como alcohol etílico agua.
- Disolución de sólidos en líquidos, tales como azúcar o sal en agua.
- Aumentar la transferencia de calor entre un fluido y una fuente de calentamiento como un serpentín o una resistencia eléctrica.
- Uniformizar la temperatura de un líquido que está siendo calentado dentro de un recipiente.



**Figura 1.8.** Vista general de un tanque con agitador de turbina (adaptada de [2]).

Muchos procesos químicos y biológicos requieren frecuentemente del uso de recipientes agitados. Los líquidos suelen agitarse en recipientes cilíndricos con un propulsor montado en un eje e impulsado por un motor eléctrico [2, 16]. Con mucha frecuencia es necesario enfriar o calentar el contenido del recipiente durante la agitación, esto suele hacerse con superficies de transferencia de calor que pueden tener la forma de chaquetas de

enfriamiento o calentamiento en las paredes, o serpentines de tubería sumergidos en el líquido, o también se emplean resistencias eléctricas.

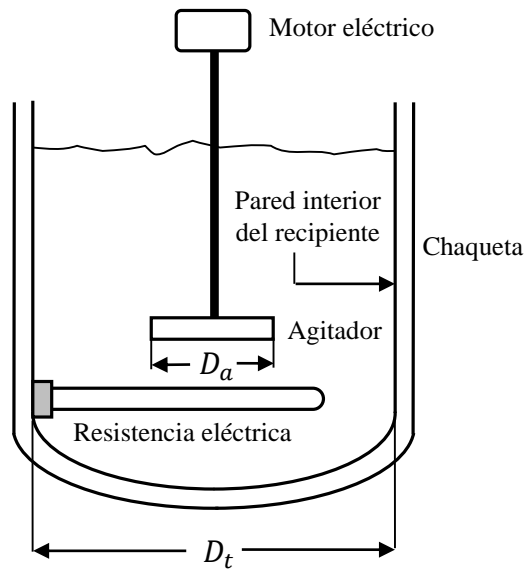
Las correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor, entre líquidos agitados en el interior de un recipiente y la pared interior del mismo, tienen las siguientes formas:

$$N_{Nu} = \frac{hD_t}{k} = a \left( \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \right)^b \left( \frac{C_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_{wall}} \right)^m. \quad (1.58)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor del líquido agitado en la pared interior del tanque en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ,  $D_t$  es el diámetro interior del tanque en m,  $k$  es la conductividad térmica del líquido en  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $D_a$  es el diámetro del agitador en m,  $N$  es la velocidad de rotación en revoluciones por segundo ( $rev \cdot s^{-1}$ ),  $\rho$  es la densidad del líquido en  $kg \cdot m^{-3}$ ,  $C_p$  es el calor específico del líquido en  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$  y  $\mu$  es la viscosidad del líquido en Pa. s. Todas las propiedades del líquido se evalúan a la temperatura general del mismo, excepto  $\mu_{wall}$  que corresponde a la temperatura de la pared interior  $T_w$ . A continuación se mencionan algunas de las correlaciones existentes y el intervalo del número de Reynolds  $\left( N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \right)$ .

- Agitador de paletas sin deflectores  
 $a = 0.36, b = 2/3, m = 0.21, N_{Re} = 300 \text{ a } 3 \times 10^5$ .
- Agitador de turbina con paletas planas sin deflectores  
 $a = 0.54, b = 2/3, m = 0.14, N_{Re} = 300 \text{ a } 3 \times 10^5$ .
- Agitador tipo ancla sin deflectores  
 $a = 1.0, b = 1/2, m = 0.18, N_{Re} = 10 \text{ a } 300$   
 $a = 0.36, b = 2/3, m = 0.18, N_{Re} = 300 \text{ a } 4 \times 10^4$ .





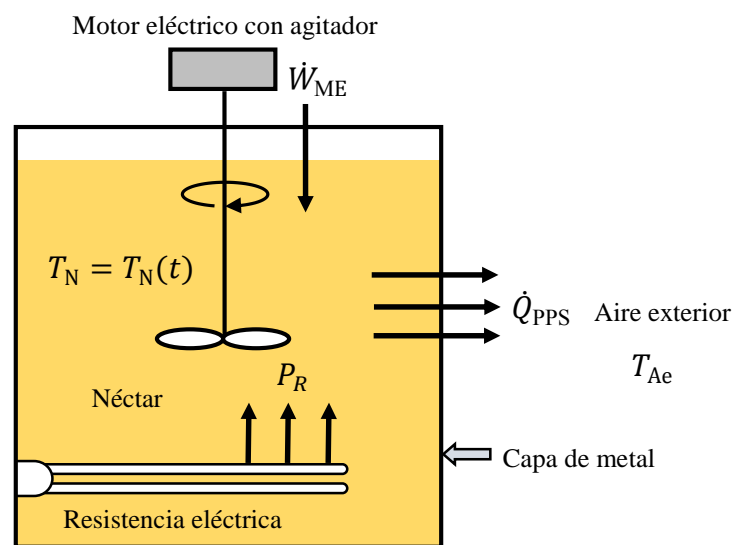
**Figura 1.9.** Transferencia de calor en un recipiente con agitación.

## CAPÍTULO II

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

#### 2.1. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL EQUIPO

Se considera que se tiene un sistema termodinámico, que es representado por un néctar más una capa de metal que rodea al mismo. Una resistencia eléctrica disipa calor, el cual es recibido en gran medida por el sistema termodinámico para variar su energía interna; un motor eléctrico con agitador realiza trabajo de eje sobre el sistema termodinámico, tratando de mantener la temperatura uniforme en todo el espacio ocupado por el néctar. Al iniciarse el calentamiento del néctar su energía interna empieza a variar con respecto al tiempo y por ende su temperatura, una parte del calor que le transfiere la resistencia eléctrica al néctar se pierde a través de la capa de metal hacia el aire exterior (figura 2.1).



**Figura 2.1.** Sistema termodinámico en estudio.

Tratándose de reducir el calor que se disipa a través de la capa de metal, el equipo debe ser enchaquetado con un aislante térmico, para que de este modo la energía que disipa la resistencia eléctrica sea transferida al máximo al néctar.

Un esquema ideal del equipo, se muestra en la [figura 2.2](#). Es notorio en esta figura los componentes principales del equipo, cada uno de los cuales cumplen una función específica cuando se lleva a cabo el proceso de calentamiento, éstos se describen a continuación.

**Cilindro de pared compuesta.** La estructura de este componente está conformada por dos cilindros de acero inoxidable y en medio de los mismos está el aislante térmico (lana de vidrio). El cilindro interior está representado por la capa 1, el espacio ocupado por el aislante térmico está representado por la capa 2 y el cilindro exterior está representado por la capa 3. La capa 1 es la que estará en contacto con el néctar.

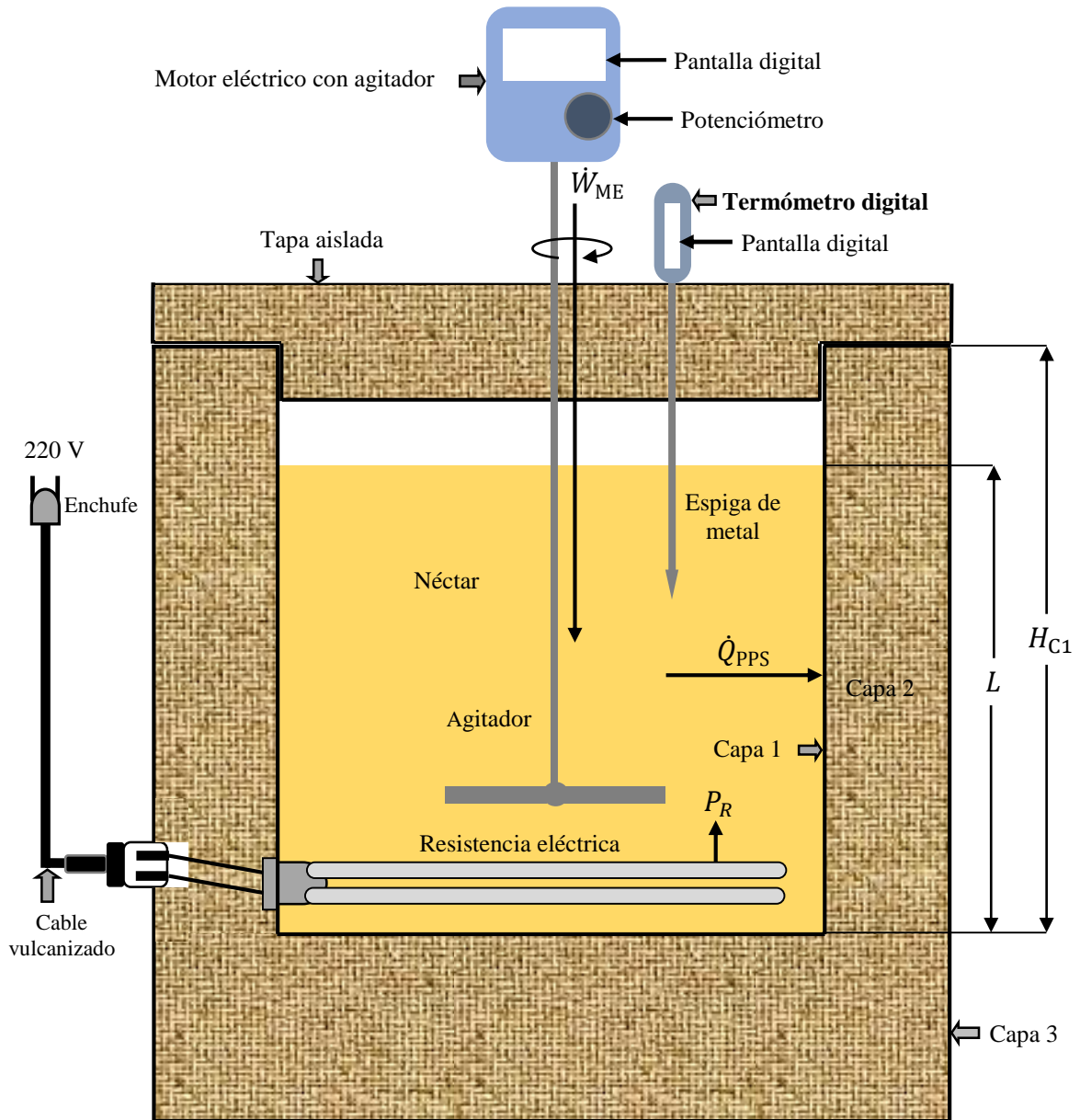
**Resistencia eléctrica.** Este componente es el encargado de ceder energía al néctar, para que de esta forma aumente su temperatura.

**Motor eléctrico con agitador.** La función principal de este componente es realizar trabajo de eje sobre el néctar; de esta forma cuando se lleva a cabo el proceso de calentamiento, la temperatura será uniforme en todo el espacio ocupado por el néctar. Además, este componente posee un potenciómetro y una pantalla digital, mediante los cuales se puede regular y observar los valores de la potencia del motor eléctrico y la velocidad de rotación del agitador.

**Termómetro digital.** Mediante este componente, se realiza la medida de la temperatura del néctar, en el proceso de calentamiento. Las bondades de este componente son: posee una espiga de metal, la cual está en contacto con el néctar para sensor y transmitir la temperatura; en la parte superior tiene una pantalla digital donde se puede visualizar en dos escalas de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$  y  $^{\circ}\text{F}$ ) y con un decimal, la medida realizada.

**Tapa aislada.** Este componente sirve para cerrar el cilindro de pared compuesta y así evitar las pérdidas de calor en dirección vertical, cuando se lleva a cabo el proceso de calentamiento. Se debe realizar dos agujeros en la tapa aislada, para que de este modo entren el agitador y la espiga del termómetro digital en el cilindro de pared compuesta.

**Enchufe y cable vulcanizado.** Estos componentes hacen posible conectar la resistencia eléctrica a cualquier tomacorriente de 220 V.



**Figura 2.2.** Esquema ideal del equipo.

Puede notarse de la [figura 2.2](#), que la construcción del equipo se refiere básicamente a la construcción del cilindro de pared compuesta y la tapa aislada, pues los demás componentes se pueden encontrar comercialmente.

## 2.2. APLICACIÓN DE LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA EN EL DISEÑO DEL EQUIPO

En referencia a la [figura 2.1](#), las energías totales en el sistema termodinámico, para los tiempos  $t$  y  $t + \Delta t$  son  $E_{\text{Sist}}(t)$  y  $E_{\text{Sist}}(t + \Delta t)$ , respectivamente. Entonces, la energía total acumulada en el sistema termodinámico, en el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , es:

$$\Delta E_{\text{Sist}} = E_{\text{Sist}}(t + \Delta t) - E_{\text{Sist}}(t). \quad (2.1)$$

Por la ecuación (1.12), se tiene:

$$\Delta E_{\text{Sist}} = E_{\text{Sist}}(t + \Delta t) - E_{\text{Sist}}(t) = (\dot{Q} - \dot{W})\Delta t. \quad (2.2)$$

Donde:

$\Delta E_{\text{Sist}}$  : Energía total acumulada en el sistema termodinámico, en el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , J

$\dot{Q}$  : Flujo de calor neto (transferido al sistema – perdido o disipado por el sistema), W

$\dot{W}$  : Rapidez con la que se realiza trabajo (por el sistema – sobre el sistema), W

Aplicando el criterio de la primera derivada en la ecuación (2.2)

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{[E_{\text{Sist}}(t + \Delta t) - E_{\text{Sist}}(t)]}{\Delta t} = (\dot{Q} - \dot{W}). \quad (2.3)$$

$$\frac{dE_{\text{Sist}}}{dt} = (\dot{Q} - \dot{W}). \quad (2.4)$$

En forma general se tiene:

$$E_{\text{Sist}} = U_{\text{Sist}} + E_k + E_p. \quad (2.5)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{TAS}} - \dot{Q}_{\text{PPS}}. \quad (2.6)$$

$$\dot{W} = \dot{W}_{RPS} - \dot{W}_{RSS} . \quad (2.7)$$

Donde:

$U_{Sist}$  : Energía interna del sistema, J

$E_k$  : Energía cinética del sistema, J

$E_p$  : Energía potencial del sistema, J

$\dot{Q}_{TAS}$  : Flujo de calor transferido al sistema, W

$\dot{Q}_{PPS}$  : Flujo de calor perdido por el sistema, W

$\dot{W}_{RPS}$  : Rapidez de trabajo realizado por el sistema, W

$\dot{W}_{RSS}$  : Rapidez de trabajo realizado sobre el sistema, W

### Consideraciones

1. El sistema termodinámico en estudio es cerrado, es decir no hay masa que atraviese sus límites o fronteras y además experimenta un proceso de calentamiento el cual no causa ningun cambio en su energía potencial y cinética con respecto al tiempo:  $dE_k/dt = 0$  y  $dE_p/dt = 0$  .

2. La energía interna del sistema termodinámico es función de la masa, el calor específico y la temperatura:

$$U_{Sist} = M_{Sist} C_p T_{Sist} . \quad (2.8)$$

3. La temperatura del sistema termodinámico varia con el tiempo:  $T_{Sist} = T_{Sist}(t)$  .

4. El agitador realiza trabajo de eje y será igual al realizado sobre el néctar:

$$\dot{W} = -\dot{W}_{RSS} = -\dot{W}_{ME} . \quad (2.9)$$

5. La resistencia eléctrica transfiere calor al sistema termodinámico, en consecuencia la potencia real de la resistencia eléctrica será igual al flujo de calor transferido al sistema termodinámico:

$$\dot{Q}_{TAS} = P_R . \quad (2.10)$$

Al reemplazar la ecuación (2.10) en la ecuación (2.6), se obtiene:

$$\dot{Q} = P_R - \dot{Q}_{PPS}. \quad (2.11)$$

Donde:

$M_{Sist}$  : Masa del sistema termodinámico, kg

$C_{p\ Sist}$  : Calor específico del sistema termodinámico,  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

$T_{Sist}$  : Temperatura del sistema termodinámico,  $^{\circ}C$

$P_R$  : Potencia real de la resistencia eléctrica (rapidez de disipación de calor de la resistencia eléctrica), W

$\dot{W}_{ME}$  : Potencia real del motor con agitador (rapidez de trabajo realizado sobre el néctar), W

Al tenerse en cuenta las consideraciones mencionadas y la ecuación (2.11), la ecuación (2.4) queda:

$$\frac{d(M_{Sist} C_{p\ Sist} T_{Sist})}{dt} = (P_R - \dot{Q}_{PPS} + \dot{W}_{ME}). \quad (2.12)$$

Como el néctar es parte del sistema termodinámico, entonces  $T_{Sist} = T_N$ .

En forma similar a la ecuación (1.54), el flujo de calor perdido por el sistema termodinámico, hacia el aire exterior es:

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{T_N - T_{Ae}}{\sum R}. \quad (2.13)$$

El término  $\sum R$ , representa la resistencia térmica total y sus unidades son  $^{\circ}C.W^{-1}$ . Los términos  $\sum R$  y  $\dot{Q}_{PPS}$  se determinan aplicando los mecanismos básicos de la transferencia de calor en el diseño del equipo.

Reemplazando la ecuación (2.13) en la ecuación (2.12)

$$\frac{d(M_{\text{Sist}} C_{p\text{Sist}} T_{\text{N}})}{dt} = P_R - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) + \dot{W}_{\text{ME}}. \quad (2.14)$$

Considerando que el proceso de calentamiento consta de  $n$  etapas; entonces para una etapa cualquiera  $i$  en el que la temperatura del néctar cambia desde  $T_{\text{IN}, i}$  (temperatura inicial) hasta  $T_{\text{fN}, i}$  (temperatura final) (figura 2.3); los términos  $M_{\text{Sist}}$ ,  $C_{p\text{Sist}}$ ,  $\dot{W}_{\text{ME}}$ ,  $T_{\text{Ae}}$  y  $\Sigma R$  se consideran constantes, en consecuencia la ecuación (2.14) quedará expresada como:

$$M_{\text{Sist}} C_{p\text{Sist}} \frac{dT_{\text{N}}}{dt} = P_R - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) + \dot{W}_{\text{ME}}. \quad (2.15)$$

En la ecuación (2.15), se puede observar claramente las formas de energía que están presentes, en un proceso de calentamiento del néctar; estas formas de energía se expresan por unidad de tiempo, es decir como flujo de energía o rapidez de energía. De acuerdo a la ecuación de balance, el término  $M_{\text{Sist}} C_{p\text{Sist}} dT_{\text{N}}/dt$  representa la rapidez de acumulación de energía en el sistema termodinámico durante el proceso de calentamiento,  $P_R + \dot{W}_{\text{ME}}$  representa la rapidez de energía que entra al sistema termodinámico y  $(T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}})/\Sigma R$  la rapidez de energía que sale del sistema termodinámico.

Como la temperatura del néctar es la única variable que depende del tiempo, se puede realizar el siguiente artificio:

$$\frac{dT_{\text{N}}}{dt} = -(\Sigma R) \frac{d}{dt} \left[ P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) \right]. \quad (2.16)$$

Reemplazando (2.16) en (2.15)

$$-(\Sigma R) M_{\text{Sist}} C_{p\text{Sist}} \frac{d}{dt} \left[ P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) \right] = P_R - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) + \dot{W}_{\text{ME}}. \quad (2.17)$$

$$-(\Sigma R) M_{\text{Sist}} C_{p\text{Sist}} \frac{d \left[ P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) \right]}{\left[ P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) \right]} = dt. \quad (2.18)$$



Teniéndose en cuenta la [figura 2.3](#) para integrar la ecuación (2.18), se tiene:

$$-(\Sigma R)M_{\text{Sist}} C_{p\text{Sist}} \int_{T_{\text{iN},i}}^{T_{\text{fN},i}} \frac{d \left[ P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) \right]}{\left[ P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{N}} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right) \right]} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} dt. \quad (2.19)$$

$$-(\Sigma R)M_{\text{Sist}} C_{p\text{Sist}} \ln \left[ \frac{P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{fN},i} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right)}{P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{iN},i} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right)} \right] = t_{i+1} - t_i. \quad (2.20)$$

Despejando  $C_{p\text{Sist}}$  de la ecuación (2.20)

$$C_{p\text{Sist}} = \frac{t_{i+1} - t_i}{\Sigma R M_{\text{Sist}} \ln \left[ \frac{P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{iN},i} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right)}{P_R + \dot{W}_{\text{ME}} - \left( \frac{T_{\text{fN},i} - T_{\text{Ae}}}{\Sigma R} \right)} \right]}. \quad (2.21)$$

Como el sistema termodinámico está compuesto por el néctar y la capa de metal, entonces el calor específico del mencionado sistema es:

$$C_{p\text{Sist}} = \frac{M_{\text{N}} C_{p\text{N}} (T_{\text{m},i}) + M_{\text{C1}} C_{p\text{Ai}}}{M_{\text{Sist}}}. \quad (2.22)$$

De la [figura 2.3](#) se tiene que,

$$t_{\text{Ec},i} = t_{i+1} - t_i. \quad (2.23)$$

$$t_{\text{Tcal}} = t_{n+1} - t_1. \quad (2.24)$$

$$T_{\text{N}}(t_i) = T_{\text{fN},i-1} = T_{\text{iN},i}. \quad (2.25)$$

$$T_{\text{N}}(t_{i+1}) = T_{\text{fN},i} = T_{\text{iN},i+1}. \quad (2.26)$$

$$T_{fN, n} = T_N(t_{Tcal}) = T_N(t_{n+1}). \quad (2.27)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.22) y (2.23) en la ecuación (2.21), se obtiene:

$$C_{pN}(T_{m,i}) = \frac{t_{Ec,i}}{\sum R M_N \ln \left[ \frac{P_R + \dot{W}_{ME} - \left( \frac{T_{iN,i} - T_{Ae}}{\sum R} \right)}{P_R + \dot{W}_{ME} - \left( \frac{T_{fN,i} - T_{Ae}}{\sum R} \right)} \right]} - \frac{M_{C1} C_{pAi}}{M_N}. \quad (2.28)$$

Donde:

$C_{pN}(T_{m,i})$  : Calor específico del néctar, correspondiente a la temperatura promedio  $T_{m,i}$ ,  $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

$M_N$  : Masa del néctar, kg

$C_{pAi}$  : Calor específico de la capa de metal,  $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$

$M_{C1}$  : Masa de la capa de metal, kg

$T_N(t_i)$  : Temperatura del néctar medida en  $t = t_i$

$T_N(t_{i+1})$  : Temperatura del néctar medida en  $t = t_{i+1}$

$T_{Ae}$  : Temperatura del aire exterior,  $^\circ C$

$T_{iN,i}$  : Temperatura inicial del néctar en la etapa  $i$  (figura 2.3),  $^\circ C$

$T_{fN,i}$  : Temperatura final del néctar en la etapa  $i$  (figura 2.3),  $^\circ C$ , también  $T_{fN,i} = T_N(t_{i+1})$  (figura 2.3),  $^\circ C$

$T_{m,i}$  : Temperatura promedio del néctar, correspondiente a la etapa  $i$ , (figura 2.3),  $^\circ C$

$t_{Ec,i}$  : Tiempo que dura la etapa  $i$ , (figura 2.3), s

$T_N(0)$  : Temperatura del néctar al inicio del proceso de calentamiento, es decir en  $t = 0$ , (figura 2.3),  $^\circ C$

$T_N(t_{Tcal})$  : Temperatura del néctar al final del proceso de calentamiento, es decir en  $t = t_{Tcal}$ , (figura 2.3),  $^\circ C$

$t_{Tcal}$  : Tiempo que dura el proceso de calentamiento, (figura 2.3), s

Como la temperatura del néctar varía con el tiempo en todo el proceso de calentamiento:  $T_N = T_N(t)$ , el valor de  $T_{m,i}$  se puede calcular:

$$T_{m,i} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} T_N(t) dt = \frac{1}{t_{EC,i}} \int_{t_i}^{t_{i+1}} T_N(t) dt. \quad (2.29)$$

La ecuación (2.28), representa el modelo matemático mediante el cual se puede calcular el calor específico de un néctar, correspondiente a la temperatura promedio entre  $T_{iN,i}$  y  $T_{fN,i}$ . Es decir, para cada intervalo de temperatura entre  $T_{iN,i}$  y  $T_{fN,i}$ , se debe evaluar la temperatura promedio como se indica en la ecuación (2.29). De esta forma se puede calcular los valores de  $C_{pN}(T_{m,i})$  para las  $n$  etapas del proceso de calentamiento y representarlos gráficamente en función de la temperatura  $T_{m,i}$ . El calor específico promedio del néctar, correspondiente al intervalo de  $T_N(0)$  a  $T_N(t_{Tcal})$ , se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{pm,N [T_N(0) \text{ a } T_N(t_{Tcal})]} = \frac{1}{T_N(t_{Tcal}) - T_N(0)} \int_{T_N(0)}^{T_N(t_{Tcal})} C_{pN}(T_m) dT_m. \quad (2.30)$$

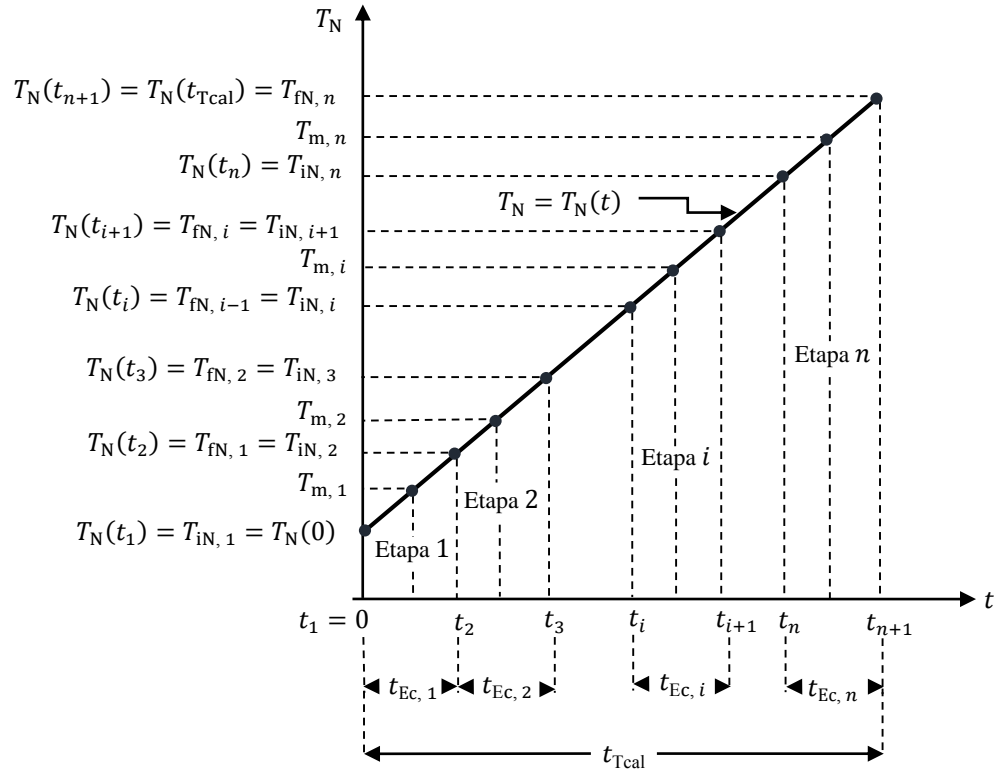
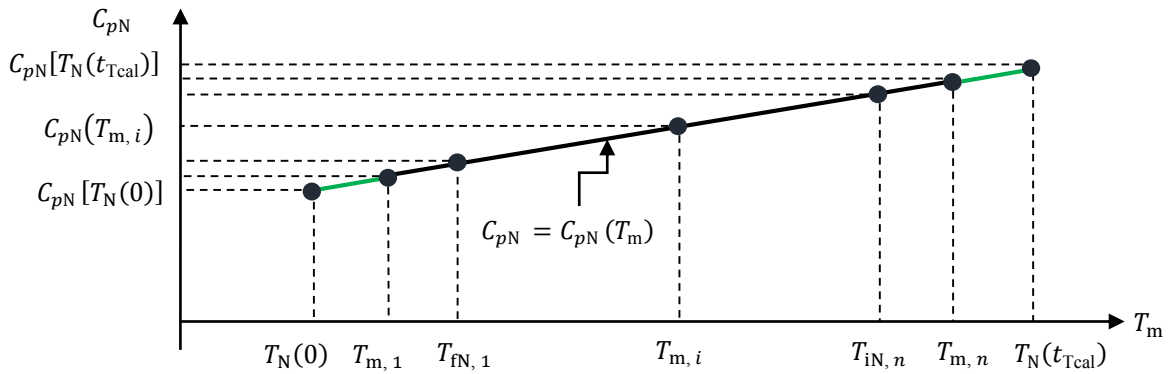


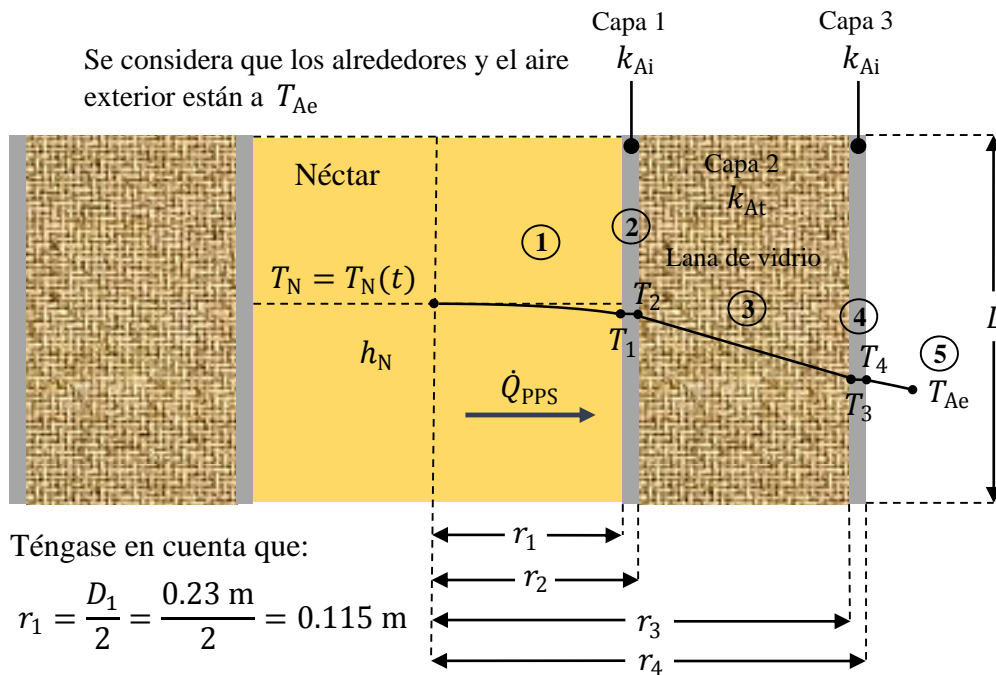
Figura 2.3. Representación gráfica de  $T_N$  versus  $t$ .



**Figura 2.4.** Representación gráfica de  $C_{pN}$  versus  $T_m$ .

### 2.3. MECANISMOS BÁSICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR APLICADOS AL DISEÑO DEL EQUIPO

La aplicación de los mecanismos básicos de la transferencia de calor al diseño del equipo, se realiza con el fin de deducir una ecuación que relacione el flujo de calor perdido por el sistema con el espesor del aislante térmico (figura 2.5).



**Figura 2.5.** Mecanismos básicos de la transferencia de calor en el cilindro de pared compuesta.

La sección 1 comprende del néctar a la superficie interior de la capa 1 (acero inoxidable), la transferencia de calor en esta sección es por convección, entonces por la ecuación (1.16) se tiene:

$$\dot{Q}_{PPS} = 2\pi r_1 L h_N (T_N - T_1). \quad (2.31)$$

$$\frac{\dot{Q}_{PPS}}{2\pi r_1 L h_N} = (T_N - T_1). \quad (2.32)$$

La sección 2 comprende de la superficie interior de la capa 1 (acero inoxidable) a la superficie exterior de la misma capa, la transferencia de calor en esta sección es por conducción, entonces por la ecuación (1.31), se tiene:

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{2\pi L k_{Ai}}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2). \quad (2.33)$$

$$\frac{\dot{Q}_{PPS} \ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_{Ai}} = (T_1 - T_2). \quad (2.34)$$

$$r_2 = r_1 + e_{Ai}. \quad (2.35)$$

Reemplazando (2.35) en (2.34),

$$\frac{\dot{Q}_{PPS} \ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{2\pi L k_{Ai}} = (T_1 - T_2). \quad (2.36)$$

La sección 3 comprende de la superficie interior de la pared 2 (lana de vidrio) a la superficie exterior de la misma pared, la transferencia de calor en esta sección es por conducción, entonces por la ecuación (1.31), se tiene:

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{2\pi L k_{At}}{\ln(r_3/r_2)} (T_2 - T_3). \quad (2.37)$$

$$\frac{\dot{Q}_{PPS} \ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_{At}} = (T_2 - T_3). \quad (2.38)$$

$$r_3 = r_2 + e_{At} = r_1 + e_{Ai} + e_{At}. \quad (2.39)$$

Reemplazando (2.39) en (2.38),

$$\frac{\dot{Q}_{PPS} \ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{2\pi L k_{At}} = (T_2 - T_3). \quad (2.40)$$

La sección 4 comprende de la superficie interior de la pared 3 (acero inoxidable) a la superficie exterior de la misma pared, la transferencia de calor en esta sección es por conducción, entonces:

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{2\pi L k_{Ai}}{\ln(r_4/r_3)} (T_3 - T_4). \quad (2.41)$$

$$\frac{\dot{Q}_{PPS} \ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_{Ai}} = (T_3 - T_4). \quad (2.42)$$

$$r_4 = r_3 + e_{Ai} = r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}. \quad (2.43)$$

Reemplazando (2.43) en (2.42),

$$\frac{\dot{Q}_{PPS} \ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{2\pi L k_{Ai}} = (T_3 - T_4). \quad (2.44)$$

La sección 5 comprende de la superficie exterior de la pared 3 (acero inoxidable) al aire exterior con los alrededores, en este caso la transferencia de calor es por convección y radiación, de la misma forma que en la ecuación (1.41), se tiene:

$$\dot{Q}_{PPS} = 2\pi r_4 L (T_4 - T_{Ae}) (h_{Ae} + h_{rad, r_4}). \quad (2.45)$$

$$\frac{\dot{Q}_{PPS}}{2\pi(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})L(h_{Ae} + h_{rad, r_4})} = (T_4 - T_{Ae}). \quad (2.46)$$

Para este caso,

$$h_{rad, r_4} = \varepsilon_{r_4} \sigma (T_4 + T_{Ae})(T_4^2 + T_{Ae}^2). \quad (2.47)$$

Sumando las ecuaciones (2.32), (2.36), (2.40), (2.44) y (4.46), se tiene:

$$\frac{\dot{Q}_{PPS}}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_1 h_N} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{k_{Ai}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{k_{At}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{k_{Ai}} + \frac{1}{(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})(h_{Ae} + h_{rad, r_4})} \right] = T_N - T_{Ae}. \quad (2.48)$$

Despejando  $\dot{Q}_{PPS}$ ,

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{2\pi L (T_N - T_{Ae})}{\left[ \frac{1}{r_1 h_N} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{k_{Ai}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{k_{At}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{k_{Ai}} + \frac{1}{(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})(h_{Ae} + h_{rad, r_4})} \right]}. \quad (2.49)$$

Donde:

$r_1$  : Radio interior del cilindro interior, 0.115 m (asumido)

$r_2$  : Radio exterior del cilindro interior, también radio interior de la capa de lana de vidrio, m

$r_3$  : Radio exterior de la capa de lana de vidrio, también radio interior del cilindro exterior, m

$r_4$  : Radio exterior del cilindro exterior, m

$L$  : Altura del néctar en el cilindro de pared compuesta, 0.19 m (asumido)

- $e_{Ai}$  : Espesor de la capa 1 y la capa 3 (acero inoxidable),  $1.5 \times 10^{-3}$  m  
 $e_{At}$  : Espesor de la capa 2 (aislante térmico o lana de vidrio), m  
 $h_N$  : Coeficiente de convección del néctar,  $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$   
 $h_{Ae}$  : Coeficiente de convección del aire exterior,  $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$   
 $h_{rad, r_4}$  : Coeficiente de transferencia de calor por radiación,  $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$   
 $k_{Ai}$  : Conductividad térmica del acero inoxidable (para la capa 1 y la capa 3),  $14.9 W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$  [16]  
 $k_{At}$  : Conductividad del aislante térmico (lana de vidrio),  $0.045 W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$  [2]

La resistencia térmica global para el cilindro de pared compuesta es:

$$\sum R = \frac{1}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_1 h_N} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{k_{Ai}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{k_{At}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{k_{Ai}} + \frac{1}{(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})(h_{Ae} + h_{rad, r_4})} \right]. \quad (2.50)$$

Entonces, la ecuación (2.49) también se puede expresar como la ecuación (1.54), es decir:

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{(T_N - T_{Ae})}{\sum R}.$$

En la figura 2.5 se tiene un circuito térmico en serie de  $T_N$  a  $T_4$ , entonces el flujo de calor perdido por el sistema también se puede evaluar mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{2\pi L(T_N - T_4)}{\left[ \frac{1}{r_1 h_N} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{k_{Ai}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{k_{At}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{k_{Ai}} \right]}. \quad (2.51)$$

Expresando la ecuación (1.58) para el néctar, se tiene:



$$h_N = a \left( \frac{D_a^2 N \rho_N}{\mu_N} \right)^b \left( \frac{C_{pN} \mu_N}{k_N} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_N}{\mu_{Nwall}} \right)^m \frac{k_N}{D_1}. \quad (2.52)$$

Se considera lo siguiente:

1. La temperatura del aire exterior es,  $T_{Ae} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
2. Las propiedades físicas del aire exterior, se evalúan a  $28 \text{ }^\circ\text{C} = 303.15 \text{ K}$ ,  $\rho_{Ae} = 1.164 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_{pAe} = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\mu_{Ae} = 1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $k_{Ae} = 0.0269 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\beta_{Ae} = \frac{1}{(28+273.15)} \text{ K}^{-1} = 3.77 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 5 \text{ K}$  [2]
3. El diámetro del agitador es,  $D_a = 0.07 \text{ m}$ .
4. Considerando que la temperatura del néctar es uniforme en todo el espacio que ocupa, en consecuencia también lo será la viscosidad:  $\mu_N \approx \mu_{Nwall}$ .
5. La conductividad térmica del néctar es,  $k_N = 0.559 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  [2]
6. La viscosidad del néctar es,  $\mu_N = 2.12 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  [2]
7. La velocidad de rotación del agitador es,  $N = 400 \text{ rpm} = 6.667 \text{ rev} \cdot \text{s}^{-1}$ . El número de Reynolds será,  $N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho_N}{\mu_N} = \frac{(0.07)^2 (6.667) (1050)}{2.12 \times 10^{-3}} = 1.62 \times 10^4$ .
8. El agitador es de paletas y el cilindro interior no tiene deflectores, entonces:  
 $a = 0.36$ ,  $b = 2/3$ ,  $m = 0.21$ .

Adecuando el producto  $N_G N_{Pr}$  de la ecuación (1.57) a la figura 2.5, se tiene:

$$N_G N_{Pr} = \frac{L^3 \rho_{Ae}^2 g \beta_{Ae} \Delta T C_{pAe} \mu_{Ae}}{\mu_{Ae}^2 k_{Ae}}. \quad (2.53)$$

Determinando el valor de  $N_G N_{Pr}$ , se tiene:

$$= ((B8^3) * (H7^2) * (B9) * H3 * H8 / (H4^2)) * (H6 * H4 / H5) \quad (2.53)$$

|    | A   | B                                   | C                                   | D  | E  | F                                    | G   | H                                   | I                                   |
|----|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|--------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 2  |   |                                     |                                     |  |  |                                      |   |                                     |                                     |
| 3  | $T_{Ae}$  | 25                                  | °C                                  | $D_a$  | 0.07   | m                                    | $\beta_{Ae}$  | 0.00377145                          | $K^{-1}$                            |
| 4  | $T_m$   | 28                                  | °C                                  | $N$  | 6.667  | rev.s <sup>-1</sup>                  | $\mu_{Ae}$  | 0.0000185                           | Pa.s                                |
| 5  | $T_N$   | 80                                  | °C                                  | $\rho_N$   | 1050   | kg.m <sup>-3</sup>                   | $k_{Ae}$  | 0.0269                              | W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>  |
| 6  | $e_{Ai}$  | 0.0015                              | m                                   | $C_{pN}$   | 3900   | J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> | $C_{pAe}$   | 1005                                | J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |
| 7  | $k_{Ai}$  | 14.9                                | W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> | $\mu_N$  | 0.00212  | Pa.s                                 | $\rho_{Ae}$   | 1.164                               | kg.m <sup>-3</sup>                  |
| 8  | $L$   | 0.19                                | m                                   | $k_N$  | 0.559  | W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup>  | $\Delta T$  | 5                                   | K                                   |
| 9  | $g$   | 9.81                                | m.s <sup>-2</sup>                   | $D_1$  | 0.23   | m                                    |   |                                     |                                     |
| 10 |   |                                     |                                     |  |  |                                      | $h_N = 0.36 \left( \frac{D_a^2 N \rho_N}{\mu_N} \right)^{2/3} \left( \frac{C_{pN} \mu_N}{k_N} \right)^{1/3} \frac{k_N}{D_1} \quad (2.55)$ |                                     |                                     |
| 11 | $h_{Ae} = 1.37 (\Delta T / L)^{1/4} \quad (2.54)$ |                                     |                                     | $N_G N_{Pr} = \frac{L^3 \rho_{Ae}^2 g \beta_{Ae} \Delta T C_{pAe} \mu_{Ae}}{\mu_{Ae}^2 k_{Ae}} \quad (2.53)$ |  |                                      |   |                                     |                                     |
| 12 |   |                                     |                                     |  |  |                                      |   | $h_N$                               |                                     |
| 13 |   | $h_{Ae}$                            |                                     | $N_G N_{Pr}$   | Note que: W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> = W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> |                                      |   | W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> |                                     |
| 14 |   | W.m <sup>-2</sup> .°C <sup>-1</sup> |                                     | 3.47E+06   |  |                                      |   | 1373.899                            |                                     |
| 15 |   | 3.103                               |                                     |  |  |                                      |   |                                     |                                     |

**Figura 2.6.** Simulación realizada para determinar el valor de  $N_G N_{Pr}$ .

En la [figura 2.6](#), la celda D14 muestra que el valor obtenido para  $N_G N_{Pr}$  es igual a:  $3.47 \times 10^6$ .

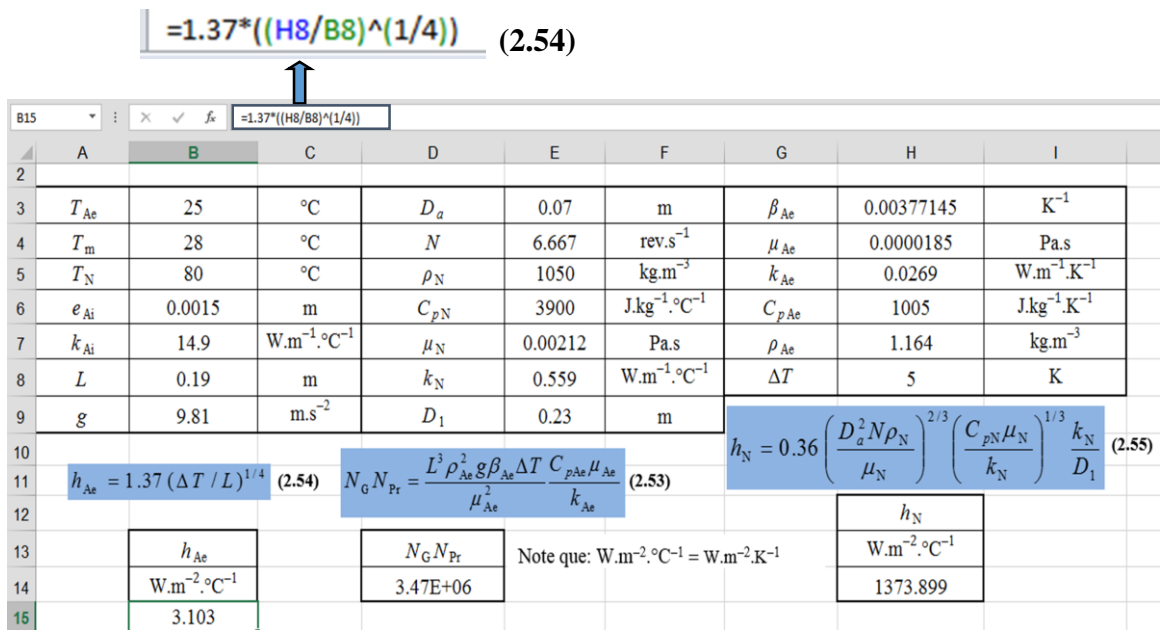
De acuerdo a la [tabla 1.2](#), se tiene que si  $10^4 < N_G N_{Pr} < 10^9$ , la ecuación para el cálculo de  $h_{Ae}$  es:

$$h_{Ae} = 1.37 (\Delta T / L)^{1/4}. \quad (2.54)$$

De la consideración **8**, la ecuación (2.52) queda:

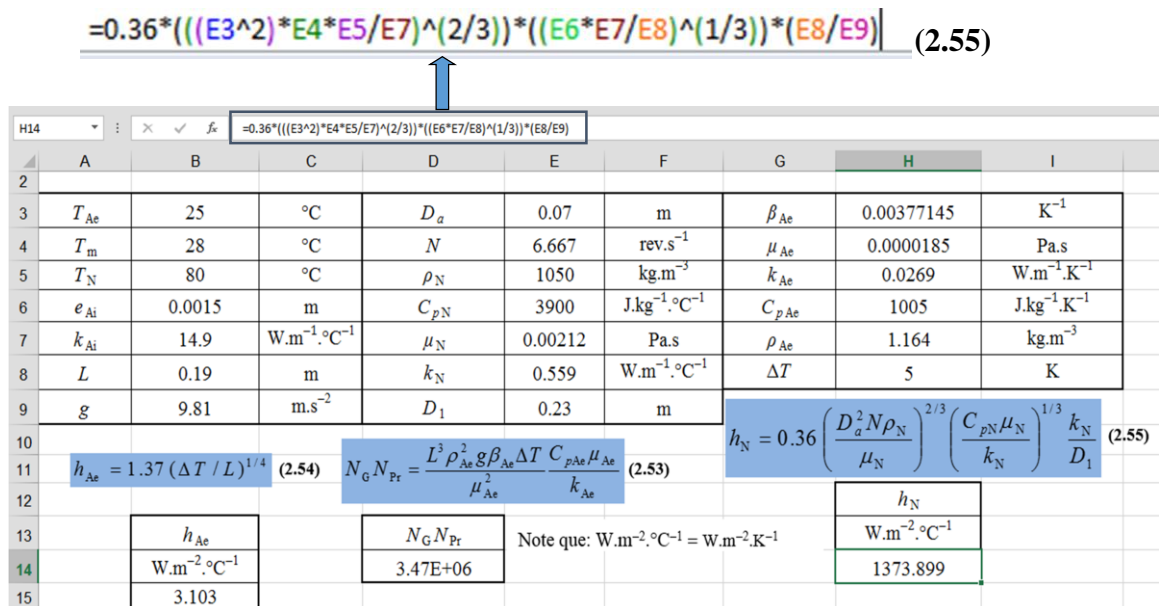
$$h_N = 0.36 \left( \frac{D_a^2 N \rho_N}{\mu_N} \right)^{2/3} \left( \frac{C_{pN} \mu_N}{k_N} \right)^{1/3} \frac{k_N}{D_1}. \quad (2.55)$$

Evaluándose ahora los valores de  $h_{Ae}$  y  $h_N$  haciendo uso de las ecuaciones (2.54) y (2.55), respectivamente. Estas ecuaciones se programan y simulan en una hoja de Excel, tal como se indican en las [figuras 2.7 y 2.8](#).



**Figura 2.7.** Simulación realizada para determinar el valor de  $h_{Ae}$ .

En la [figura 2.7](#), la celda B15 muestra el valor obtenido para  $h_{Ae}$ , que es igual a: 3.103 W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>.



**Figura 2.8.** Simulación realizada para determinar el valor de  $h_N$ .

En la [figura 2.8](#), la celda H14 muestra el valor obtenido para  $h_N$ , que es igual a: 1373.899 W.m<sup>-2</sup>.°C<sup>-1</sup>.

## 2.4. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ADECUADO PARA EL AISLANTE TÉRMICO

Para determinar el espesor adecuado para el aislante térmico, primero se considera que el cilindro de pared compuesta (figuras 2.5 y 2.2) no tiene aislante térmico y sólo está conformado por la primera capa de acero inoxidable; es decir el radio y la temperatura de la superficie que está en contacto con el aire exterior y los alrededores son  $r_2 = r_1 + e_{Ai}$  y  $T_2 = 76^\circ\text{C}$  (asumida para determinar  $\dot{Q}_{PPS}$ ), respectivamente. Para tal caso el flujo de calor perdido por el sistema, se puede evaluar mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{PPS} = \frac{2\pi L(T_N - T_2)}{\left[ \frac{1}{r_1 h_N} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{k_{Ai}} \right]} \quad (2.56)$$

La programación y simulación de la ecuación (2.56), se indica en la figura 2.9.

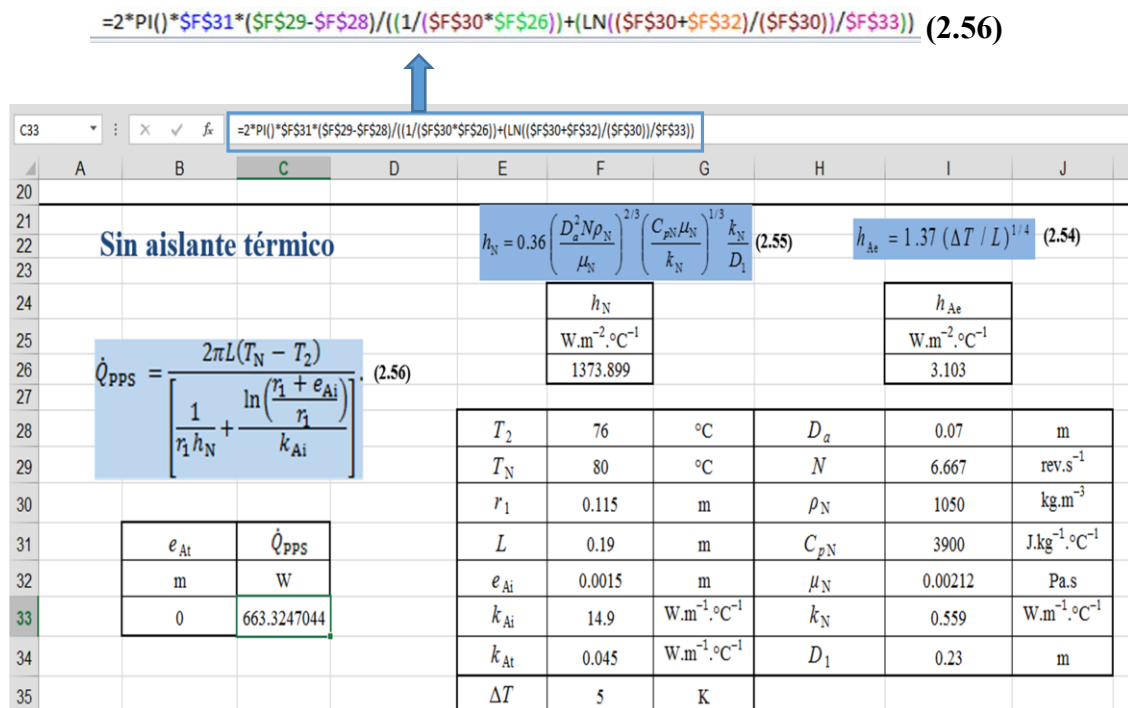
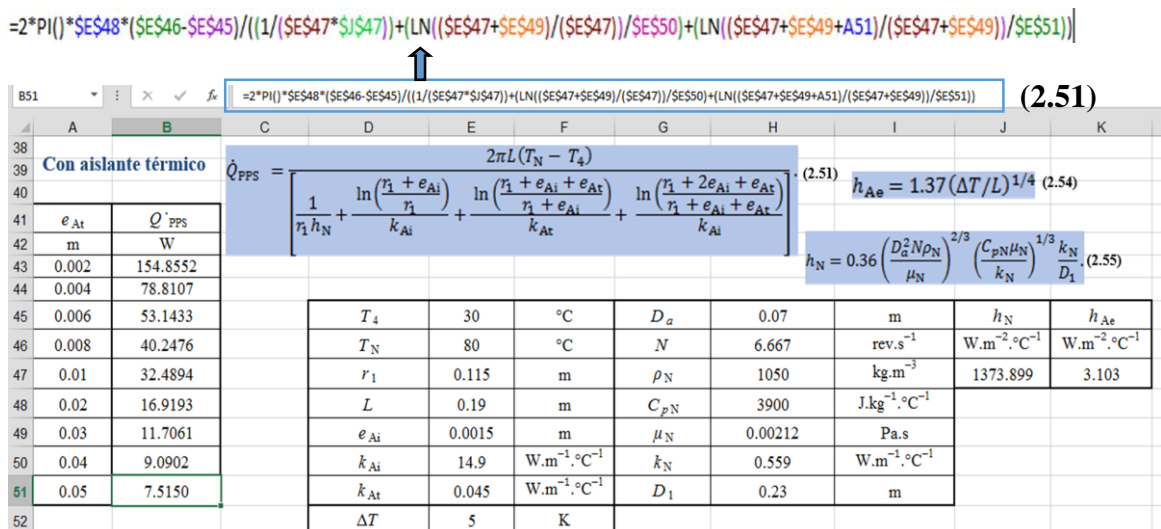


Figura 2.9. Simulación realizada para determinar el valor de  $Q_{PPS}$ , considerando  $e_{At} = 0$ .

En la [figura 2.9](#), la celda C33 muestra el valor obtenido para  $\dot{Q}_{PPS}$ , que es igual a: 663.3247 W, cuando  $e_{At} = 0$ .

Se asumió el valor de  $T_2 = 76 \text{ }^\circ\text{C}$ , debido que el néctar y la primera capa de acero inoxidable tienen resistencias térmicas muy pequeñas, de manera que el calor fluirá con mayor facilidad a través de las superficies de la primera capa. En consecuencia, la diferencia entre la temperatura del néctar y la temperatura de la superficie exterior de la primera capa tendrá un valor relativamente pequeño, es decir  $T_N - T_2 = (80 - 76) \text{ }^\circ\text{C} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ahora, considerando que el cilindro de pared compuesta es como se indicó en la [figura 2.5](#). En este caso se utiliza la ecuación (2.51) para calcular el flujo de calor perdido por el sistema  $\dot{Q}_{PPS}$ ; la cual se programa y simula en Excel, con el fin de observar la disminución del flujo de calor perdido por el sistema  $\dot{Q}_{PPS}$ , a medida que se aumenta el espesor del aislante térmico. Debe notarse que para este caso, el radio y la temperatura de la superficie que está en contacto con el aire exterior y los alrededores son  $r_4 = r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}$  y  $T_4 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (asumida para determinar  $\dot{Q}_{PPS}$ ), respectivamente. Se asumió el valor de  $T_4 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , debido a que la capa del aislante térmico ofrece una resistencia térmica muy alta, de esta forma el calor fluirá con bastante dificultad a través de las capas del cilindro de pared compuesta; al aumentar la resistencia térmica, también aumentará la diferencia ( $T_N - T_4$ ), por lo cual  $(T_N - T_4) = (80 - 30) \text{ }^\circ\text{C} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

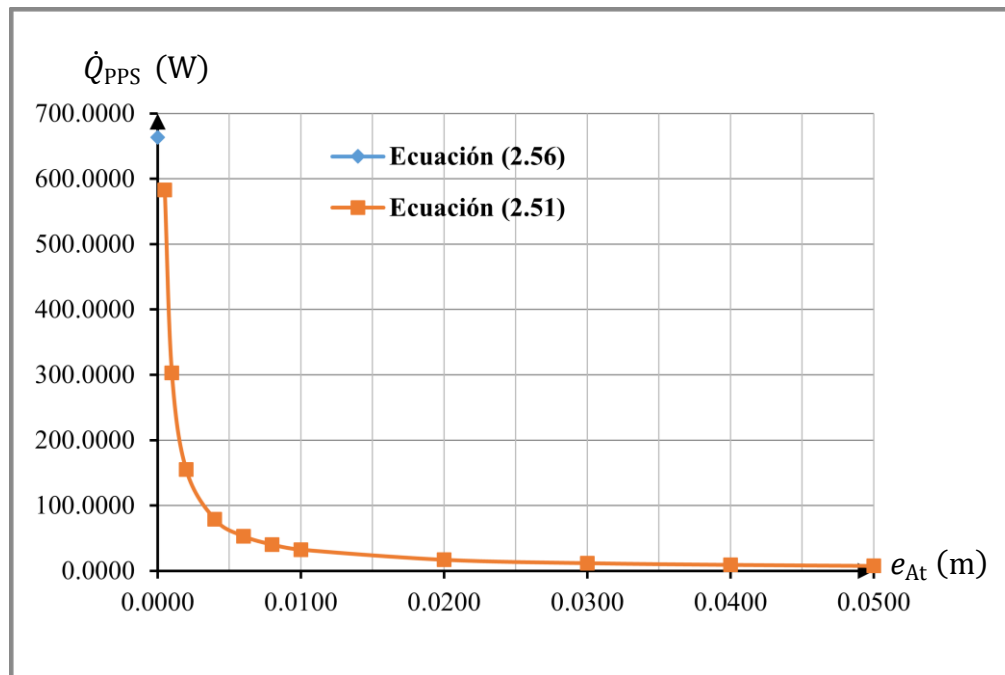


**Figura 2.10.** Simulación realizada para determinar los valores de  $\dot{Q}_{PPS}$ , considerando diferentes valores de  $e_{At}$ .

**Tabla 2.1.** Resultados obtenidos mediante simulación de las ecuaciones (2.56) y (2.51).

| $e_{At}$ (m) | $\dot{Q}_{PPS}$ (W) |
|--------------|---------------------|
| 0            | 663.3247            |
| 0.0005       | 583.0882            |
| 0.001        | 302.7909            |
| 0.002        | 154.8552            |
| 0.004        | 78.8107             |
| 0.006        | 53.1433             |
| 0.008        | 40.2476             |
| 0.01         | 32.4894             |
| 0.02         | 16.9193             |
| 0.03         | 11.7061             |
| 0.04         | 9.0902              |
| 0.05         | 7.5150              |

Graficando los resultados de la [tabla 2.1](#), se obtiene la [figura 2.11](#).



**Figura 2.11.** Representación gráfica de  $\dot{Q}_{PPS}$  versus  $e_{At}$ .

De la [figura 2.11](#) se puede observar muy claramente, que a medida que se aumenta el espesor del aislante térmico  $e_{At}$ , disminuye el flujo de calor perdido por el sistema  $\dot{Q}_{PPS}$ . Al simular con la ecuación (2.56), se podrá notar que al aumentar la velocidad de rotación

del agitador  $N$ , el coeficiente de convección del néctar aumenta considerablemente, esto trae como consecuencia un aumento exagerado del flujo de calor perdido por el sistema; la explicación a esto es que como no se tiene aislante térmico, la resistencia térmica global es muy pequeña. Al simular con la ecuación (2.51), se podrá notar que por más que se aumente la velocidad de rotación del agitador y aumente considerablemente el coeficiente de convección del néctar, se tendrá un efecto no apreciable sobre el flujo de calor perdido por el sistema; esto se debe a que se tiene una capa de aislante térmico, lo cual hace que la resistencia térmica global sea bastante grande. Sin embargo, también es notorio que cada vez que se aumenta el espesor del aislante térmico, el flujo de calor perdido por el sistema disminuye cada vez menos. De todo este análisis se ha determinado de que el espesor adecuado para el aislante térmico es  $e_{At} = 0.05$  m, pues para esta condición el flujo de calor perdido por el sistema es  $\dot{Q}_{PPS} = 7.5150$  W (bastante pequeño en comparación a 663.3247 W).

## 2.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA TÉRMICA GLOBAL

La resistencia térmica global se determina haciendo uso de la ecuación (2.50), para lo cual previamente se requiere conocer el coeficiente de transferencia de calor por radiación  $h_{rad, r_4}$ .

El flujo de calor perdido por el sistema  $\dot{Q}_{PPS}$  también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_{PPS} = \dot{Q}_{conv, r_4 \rightarrow Aire} + \dot{Q}_{rad, r_4 \rightarrow Alrededores} \quad (2.57)$$

Donde:

$\dot{Q}_{conv, r_4 \rightarrow Aire}$  : Flujo de calor por convección de la superficie de radio  $r_4$  al aire exterior, W

$\dot{Q}_{rad, r_4 \rightarrow Alrededores}$  : Flujo de calor por radiación de la superficie de radio  $r_4$  a los alrededores, W

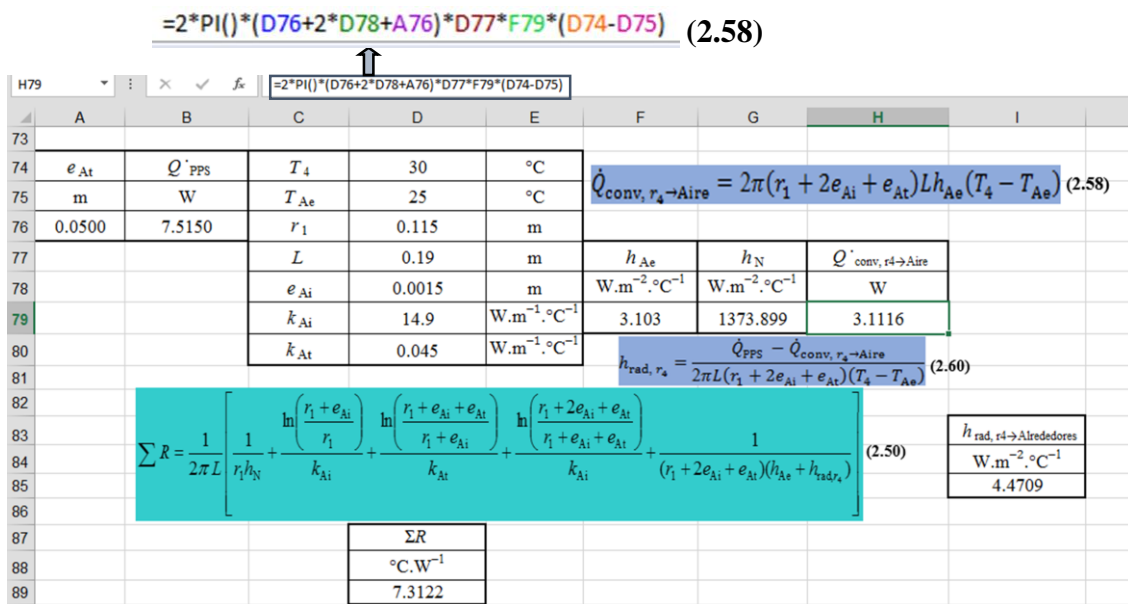
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{conv}, r_4 \rightarrow \text{Aire}} &= 2\pi r_4 L h_{\text{Ae}} (T_4 - T_{\text{Ae}}) \\ &= 2\pi (r_1 + 2e_{\text{Ai}} + e_{\text{At}}) L h_{\text{Ae}} (T_4 - T_{\text{Ae}}).\end{aligned}\quad (2.58)$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}, r_4 \rightarrow \text{Alrededores}} = 2\pi \overbrace{(r_1 + 2e_{\text{Ai}} + e_{\text{At}})}^{r_4} L h_{\text{rad}, r_4} (T_4 - T_{\text{Ae}}).\quad (2.59)$$

Combinando las ecuaciones (2.57) y (2.59), se tiene:

$$h_{\text{rad}, r_4} = \frac{\dot{Q}_{\text{PPS}} - \dot{Q}_{\text{conv}, r_4 \rightarrow \text{Aire}}}{2\pi L (r_1 + 2e_{\text{Ai}} + e_{\text{At}}) (T_4 - T_{\text{Ae}})}.\quad (2.60)$$

Para la condición  $e_{\text{At}} = 0.05$  m,  $\dot{Q}_{\text{PPS}} = 7.5150$  W y  $T_4 = 30^\circ\text{C}$ , se evalúa  $\dot{Q}_{\text{conv}, r_4 \rightarrow \text{Aire}}$



**Figura 2.12.** Simulación realizada para determinar el valor de  $\dot{Q}_{\text{conv}, r_4 \rightarrow \text{Aire}}$ .

En la [figura 2.12](#), la celda H79 muestra que el valor obtenido para  $\dot{Q}_{\text{conv}, r_4 \rightarrow \text{Aire}}$  es igual a: 3.1116 W.

De la misma forma se determina el valor de  $h_{\text{rad}, r_4}$



$$=(B76-H79)/(2*PI()*(D76+2*D781+A76)*D77*(D74-D75)) \quad (2.60)$$

|     |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|---|-----------|----------|--------|--------------------|---|--------------------|-----------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 185 | =(B76-H79)/(2*PI()*(D76+2*D781+A76)*D77*(D74-D75))  |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 73  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 74  | $e_{At}$  | $Q_{PPS}$ | $T_4$    | 30     | °C                 | $\dot{Q}_{conv, r_4 \rightarrow Aire} = 2\pi(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})Lh_{Ae}(T_4 - T_{Ae}) \quad (2.58)$                                 |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 75  | m   | W         | $T_{Ae}$ | 25     | °C                 |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 76  | 0.0500  | 7.5150    | $r_1$    | 0.115  | m                  |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 77  |   |           | $L$      | 0.19   | m                  | $h_{Ae}$  | $h_N$              | $Q'_{conv, r_4 \rightarrow Aire}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 78  |   |           | $e_{Ai}$ | 0.0015 | m                  | $W.m^{-2}.°C^{-1}$  | $W.m^{-2}.°C^{-1}$ | W                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 79  |   |           | $k_{Ai}$ | 14.9   | $W.m^{-1}.°C^{-1}$ | 3.103   | 1373.899           | 3.1116                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 80  |   |           | $k_{At}$ | 0.045  | $W.m^{-1}.°C^{-1}$ | $\dot{h}_{rad, r_4} = \frac{Q_{PPS} - \dot{Q}_{conv, r_4 \rightarrow Aire}}{2\pi L(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})(T_4 - T_{Ae})} \quad (2.60)$ |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 81  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 82  | $\sum R = \frac{1}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_1 h_N} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{k_{Ai}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{k_{At}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{k_{Ai}} + \frac{1}{(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})(h_{Ae} + h_{rad, r_4})} \right] \quad (2.50)$ |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 83  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 84  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 85  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 86  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 87  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 88  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 89  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Figura 2.13. Simulación realizada para determinar el valor de  $h_{rad, r_4}$ .

En la figura 2.13, la celda I85 muestra el valor obtenido para  $h_{rad, r_4}$ , que es igual a:  $4.4709 \text{ W.m}^{-2}.°C^{-1}$ . Determinando el valor de  $\sum R$ , se tiene:

$$=((1/(S76*SG79))+LN((S76+S78)/(S76))/S79)+LN((S76+S78+A76)/(S76+S78))/S80+LN((S76+2*S78+A76)/(S76+S78+A76))/S79+(1/((S76+2*S78+A76)*(S79+S85)))/(2*PI()*S77) \quad (2.50)$$

|     |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----|---|-----------|----------|--------|--------------------|---|--------------------|-----------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| D89 | =((1/(S76*SG79))+LN((S76+S78)/(S76))/S79)+LN((S76+S78+A76)/(S76+S78))/S80+LN((S76+2*S78+A76)/(S76+S78+A76))/S79+(1/((S76+2*S78+A76)*(S79+S85)))/(2*PI()*S77)  |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 73  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 74  | $e_{At}$  | $Q_{PPS}$ | $T_4$    | 30     | °C                 | $\dot{Q}_{conv, r_4 \rightarrow Aire} = 2\pi(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})Lh_{Ae}(T_4 - T_{Ae}) \quad (2.58)$                                 |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 75  | m   | W         | $T_{Ae}$ | 25     | °C                 |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 76  | 0.0500  | 7.5150    | $r_1$    | 0.115  | m                  |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 77  |   |           | $L$      | 0.19   | m                  | $h_{Ae}$  | $h_N$              | $Q'_{conv, r_4 \rightarrow Aire}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 78  |   |           | $e_{Ai}$ | 0.0015 | m                  | $W.m^{-2}.°C^{-1}$  | $W.m^{-2}.°C^{-1}$ | W                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 79  |   |           | $k_{Ai}$ | 14.9   | $W.m^{-1}.°C^{-1}$ | 3.103   | 1373.899           | 3.1116                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 80  |   |           | $k_{At}$ | 0.045  | $W.m^{-1}.°C^{-1}$ | $\dot{h}_{rad, r_4} = \frac{Q_{PPS} - \dot{Q}_{conv, r_4 \rightarrow Aire}}{2\pi L(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})(T_4 - T_{Ae})} \quad (2.60)$ |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 81  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 82  | $\sum R = \frac{1}{2\pi L} \left[ \frac{1}{r_1 h_N} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{k_{Ai}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{k_{At}} + \frac{\ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{k_{Ai}} + \frac{1}{(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At})(h_{Ae} + h_{rad, r_4})} \right] \quad (2.50)$ |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 83  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 84  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 85  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 86  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 87  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 88  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 89  |   |           |          |        |                    |   |                    |                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Figura 2.14. Simulación realizada para determinar el valor de  $\sum R$ .

## 2.6. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA NOMINAL DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA

Para determinar la potencia nominal de la resistencia eléctrica, se realiza un balance de energía sobre un sistema termodinámico, que en este caso se considera que está formado por el néctar y la capa de acero inoxidable N° 304 que cubre al mismo. Se desea variar la temperatura del néctar desde 20 °C hasta 80 °C en 25 min = 1500 s, considerándose además que dicho sistema es totalmente adiabático. Es decir, todo el calor que disipa la resistencia eléctrica es aprovechado por el sistema termodinámico para variar su temperatura. De la misma forma que en la sección 2.2  $T_N = T_{Sist}$ .

$$\left( \begin{array}{l} \text{Rapidez de calor disipado} \\ \text{por la resistencia eléctrica} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Rapidez de calor absorbido} \\ \text{por el sistema termodinámico} \end{array} \right). \quad (2.61)$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{Rapidez de calor disipado} \\ \text{por la resistencia eléctrica} \end{array} \right) = P_N. \quad (2.62)$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{Rapidez de calor absorbido} \\ \text{por el sistema termodinámico} \end{array} \right) = M_{Sist} C_{pSist} \frac{dT_N}{dt}. \quad (2.63)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.62) y (2.63) en la ecuación (2.61), se tiene:

$$P_N = M_{Sist} C_{pSist} \frac{dT_N}{dt}. \quad (2.64)$$

Para integrar la ecuación (2.64), se supone que  $P_N$  y  $C_{pSist}$  no varían con el tiempo, entonces la ecuación (2.64) queda:

$$P_N \int_0^{t_{Tcal}} dt = M_{Sist} C_{pSist} \int_{T_i}^{T_f} dT_N. \quad (2.65)$$

$$P_N = \frac{M_{Sist} C_{pSist} (T_f - T_i)}{t_{Tcal}}. \quad (2.66)$$

Donde:

- $P_N$  : Potencia nominal de la resistencia eléctrica, W  
 $T_i$  : Temperatura del néctar al inicio del calentamiento, 20 °C  
 $T_f$  : Temperatura del néctar al final del calentamiento, 80 °C  
 $t_{Tcal}$  : Tiempo que dura el calentamiento, 1500 s

Remplazando la ecuación (2.22) en (2.66), se tiene:

$$P_N = \frac{(M_N C_{pN} + M_{C1} C_{pAi})(T_f - T_i)}{t_{Tcal}}. \quad (2.67)$$

Se considera que la masa del néctar a tratarse es 8.3 kg, de manera que el calentamiento sea lento y se pueda tomar varias medidas de la temperatura.

Donde:

- $M_N$  : Masa del néctar, 8.3 kg  
 $C_{pN}$  : Calor específico del néctar, correspondiente a la temperatura promedio entre 20 °C y 80 °C, 3900 J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup> (jugo de piña a 90% en peso de agua) [6]  
 $C_{pAi}$  : Calor específico del acero inoxidable N° 304, 477 J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup> [16]

De acuerdo a la figura 2.15, el volumen ocupado por el espesor de la capa de acero inoxidable es igual al volumen de la parte lateral más el volumen de la base y más el volumen de la tapa, es decir:

$$V_{eC1} = \left[ 2 \left( \frac{\pi}{4} D_2^2 e_{Ai} \right) + \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) H_{C1} \right]. \quad (2.68)$$

Teniendo en cuenta la relación,  $H_{C1} = 1.24L = 1.02D_1$  (véase la tabla 3.1), se tiene:

$$M_{C1} = V_{eC1} \rho_{Ai} = \frac{\pi}{4} [2(D_2^2 e_{Ai}) + (D_2^2 - D_1^2)(1.02D_1)] \rho_{Ai}. \quad (2.69)$$

Donde:

$\rho_{Ai}$  : Densidad del acero inoxidable N° 304,  $7900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [16]

$H_{C1}$  : Altura de la capa 1 o cilindro interior, m

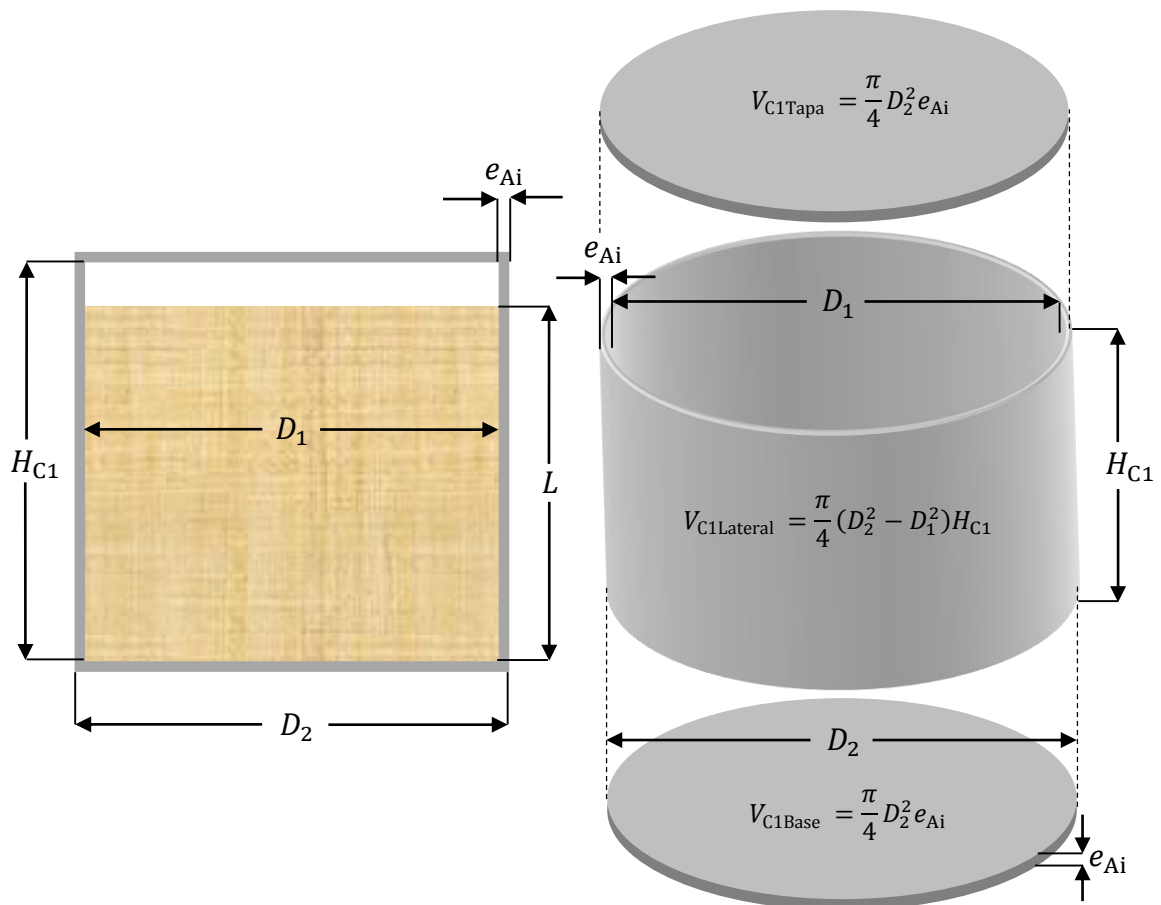
Determinando el valor de  $M_{C1}$  con la ecuación (2.69),

$$M_{C1} = \frac{\pi}{4} \{ 2(0.233)^2 (1.5 \times 10^{-3}) + [(0.233)^2 - (0.23)^2] (1.02)(0.23) \} (7900) \text{ kg}$$

$$M_{C1} = 3.032 \text{ kg} .$$

Aplicando la ecuación (2.67) para determinar  $P_N$ ,

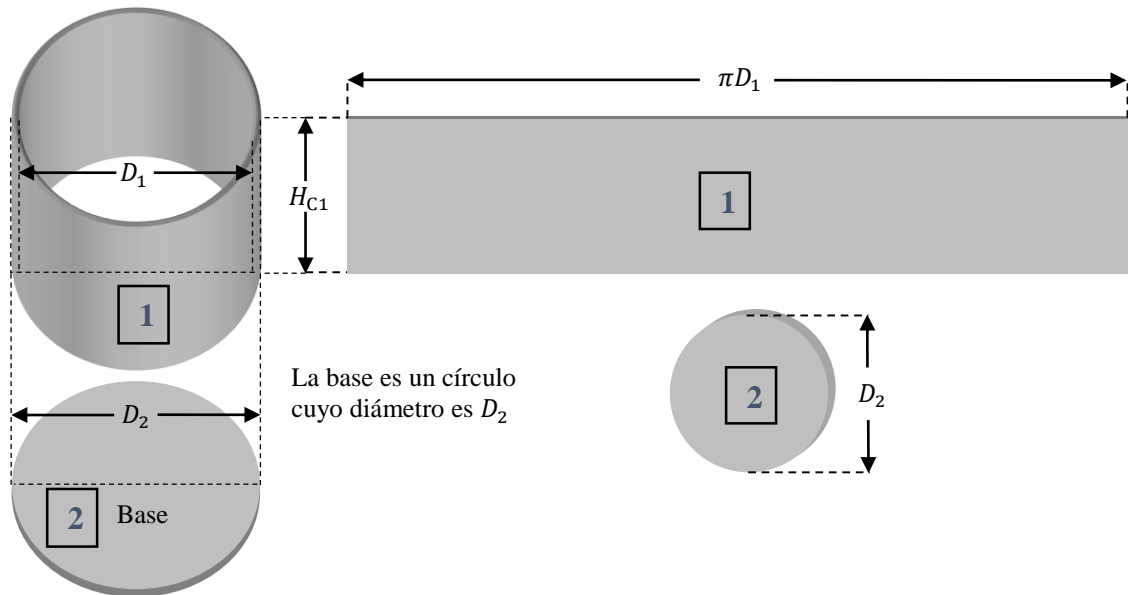
$$P_N = \frac{[(8.3)(3900) + (3.032)(477)](80 - 20)}{(1500)} \text{ W} = 1352.651 \text{ W}$$



**Figura 2.15.** Esquema de la capa de acero inoxidable que cubre al néctar.

## 2.7. DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL CILINDRO DE PARED COMPUESTA

Antes de empezar a construir el mencionado equipo, es importante determinar las dimensiones de los elementos que conforman el cilindro de pared compuesta.



**Figura 2.16.** Esquema del cilindro interior.

Mediante la ecuación (2.39) se puede evaluar  $r_3$ , entonces  $D_3$  es:

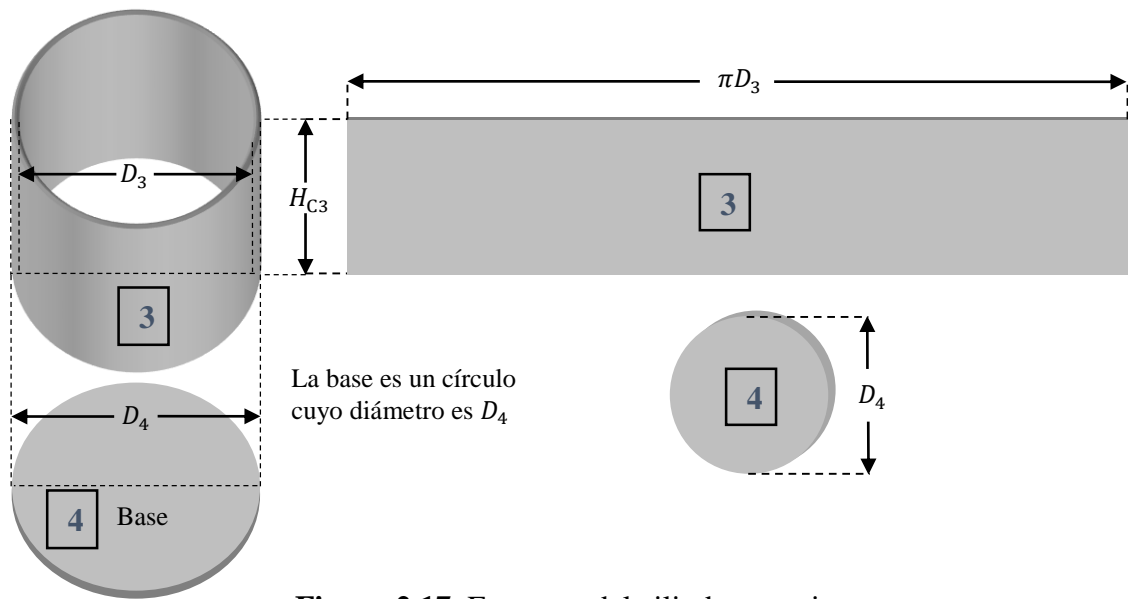
$$D_3 = 2r_3 = 2(r_1 + e_{Ai} + e_{At}). \quad (2.70)$$

De igual forma, el diámetro exterior del cilindro exterior es,

$$D_4 = D_3 + 2e_{Ai} = 2(r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}). \quad (2.71)$$

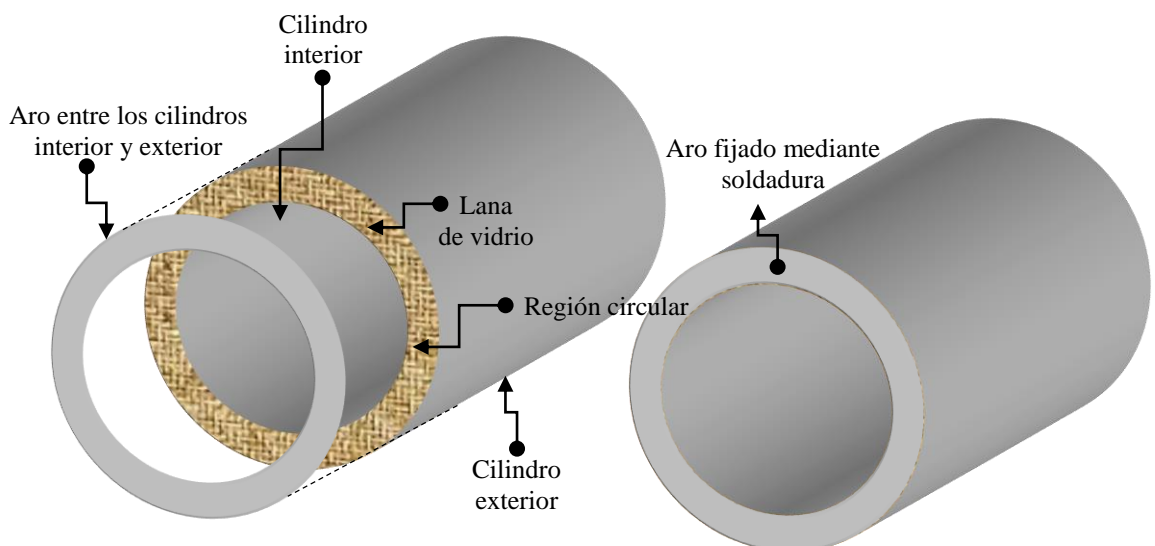
Para la altura del cilindro exterior se considera,

$$H_{C3} = 0.97D_4. \quad (2.72)$$

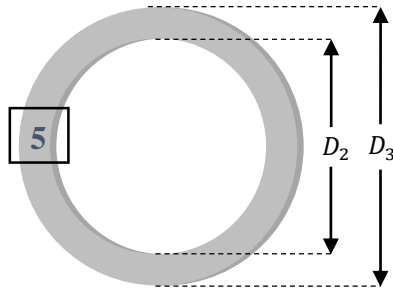


**Figura 2.17.** Esquema del cilindro exterior.

Después de cubrirse con lana de vidrio, el espacio entre los cilindros interior y exterior, se puede observar que queda una región circular la cual es cubierta mediante la fijación de un aro de acero inoxidable (figura 2.18). El esquema del mencionado aro, se muestra en la figura 2.19.

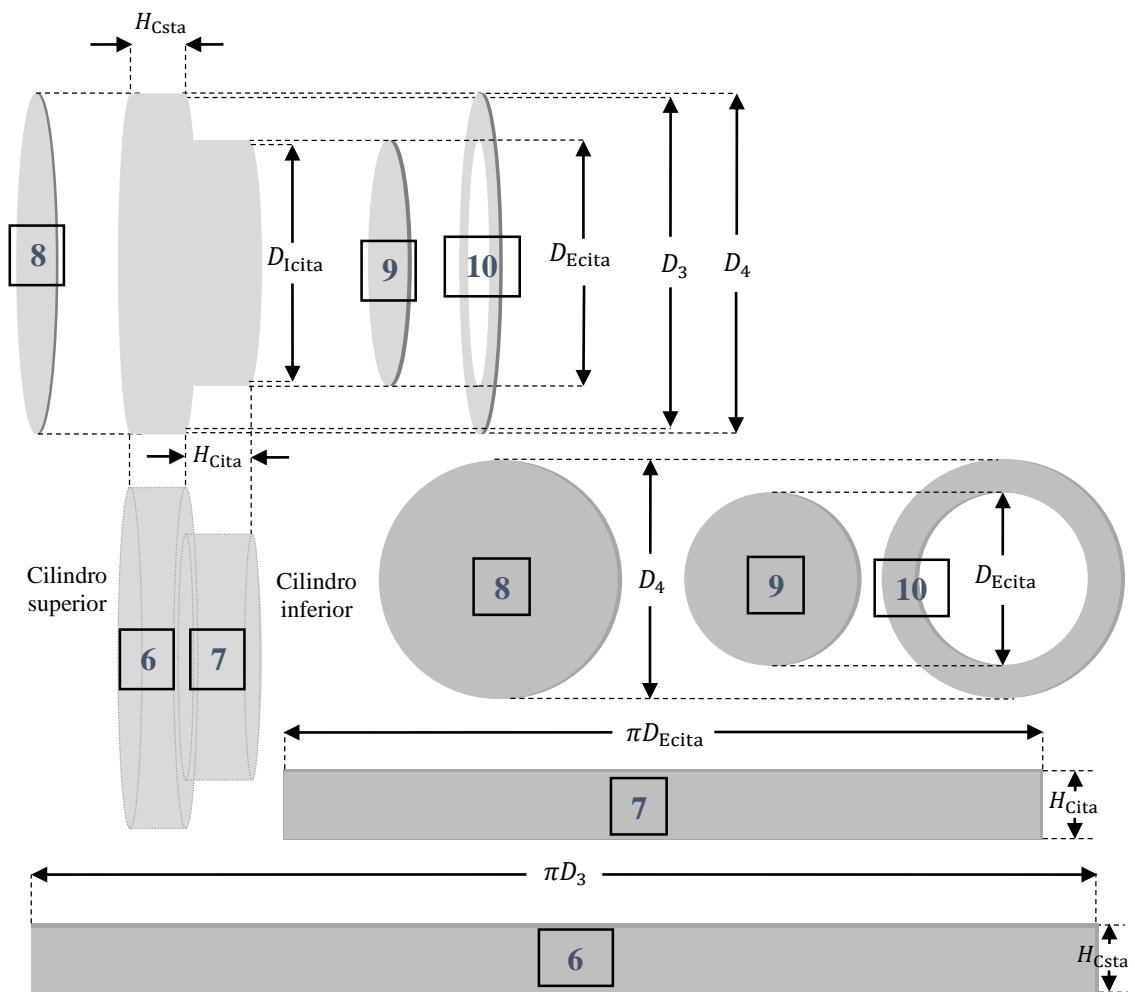


**Figura 2.18.** Fijación del aro entre los cilindros interior y exterior.



**Figura 2.19.** Esquema del aro entre los cilindros interior y exterior.

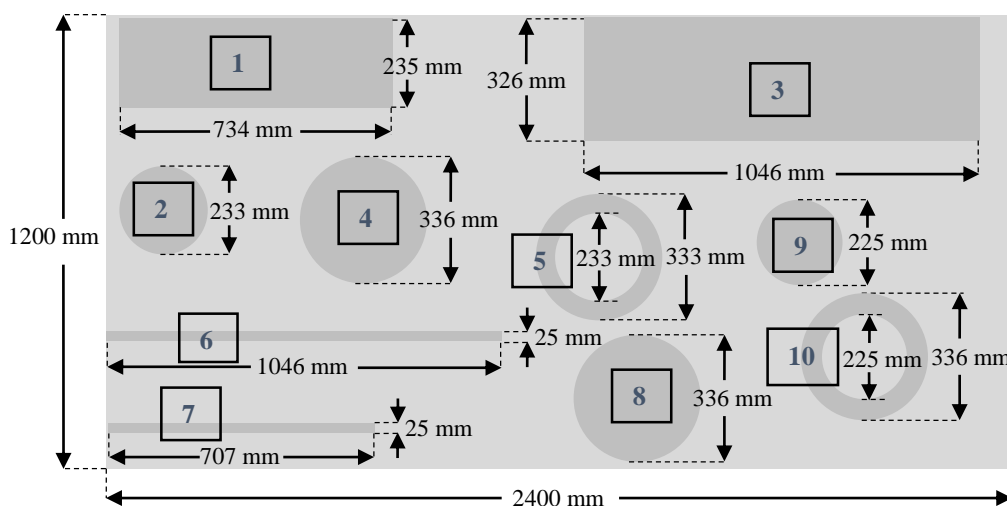
La tapa aislada, está conformada por dos cilindros (inferior y superior), el interior de ambos cilindros se cubre con lana de vidrio y luego se tapa con los círculos 8 y 9 (véase la [figura 2.20](#)).



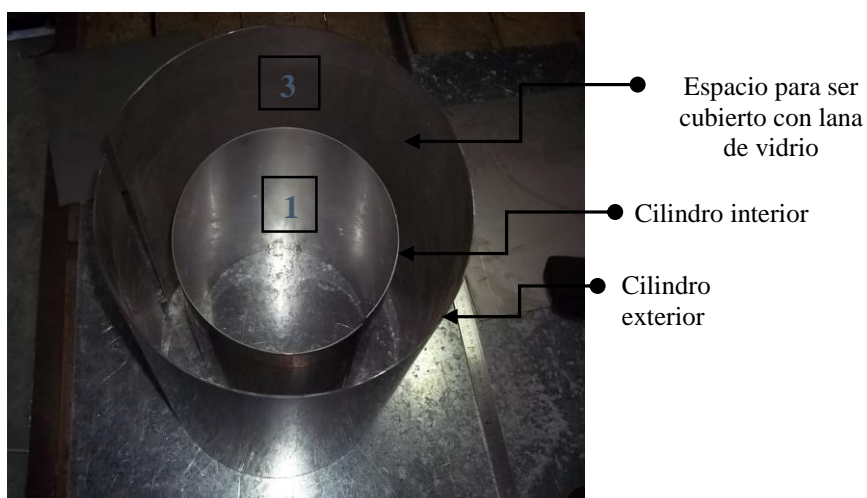
**Figura 2.20.** Esquema de la tapa aislada.

## 2.8. CONSTRUCCIÓN DEL CILINDRO DE PARED COMPUESTA

Para construir el cilindro de pared compuesta, se debe realizar los trazos de las regiones que se muestran en las [figuras 2.16, 2.17, 2.19 y 2.20](#), las cuales se han representado por números del **1** al **10**. Todos los trazos se realizan en una plancha de acero inoxidable N° 304, que se encuentra comercialmente con las siguientes dimensiones: largo = 2400 mm, ancho = 1200 mm y espesor = 1.5 mm ([figura 2.21](#)). Por ejemplo, el cilindro interior es el resultado de trazar y rolar la región **1**; después se traza la región **2** y se suelda a la región **1**, de esta forma se construye el cilindro interior con su base ([figura 2.23](#)).

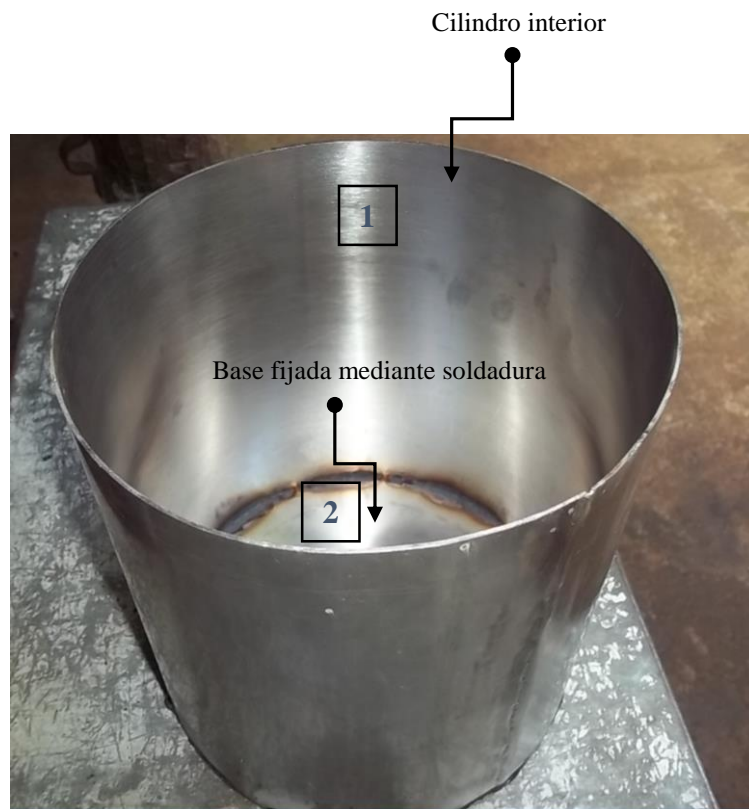


**Figura 2.21.** Trazos realizados para la construcción del cilindro de pared compuesta.



**Figura 2.22.** Regiones 1 y 3, después de ser roladas.





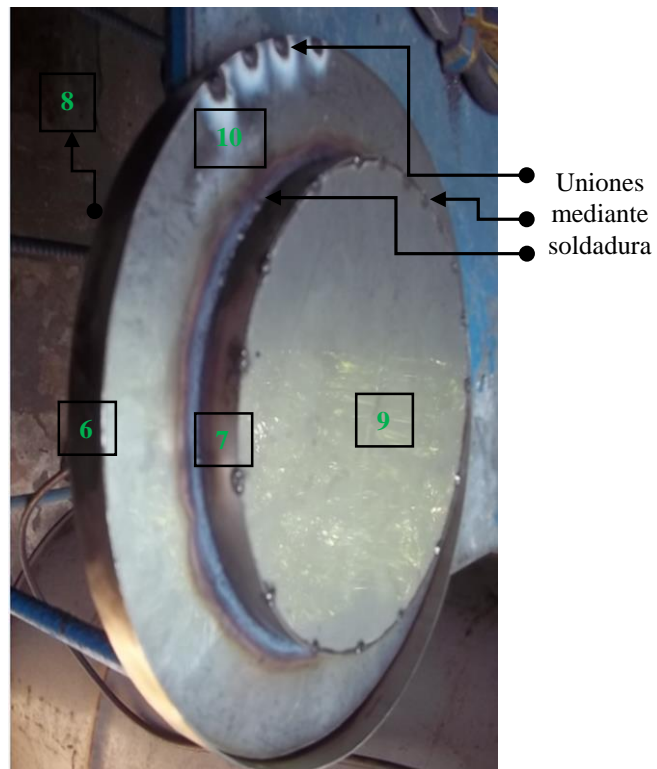
**Figura 2.23.** Cilindro interior con su base.



**Figura 2.24.** Aro entre los cilindros interior y exterior.



**Figura 2.25.** Espacio entre los cilindros interior y exterior, cubierto con lana de vidrio.



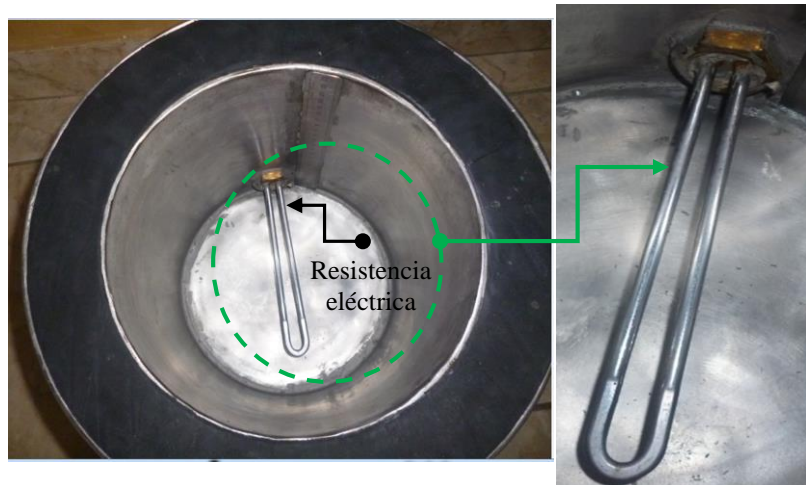
**Figura 2.26.** Acoplamiento de las regiones que forman la tapa aislada.



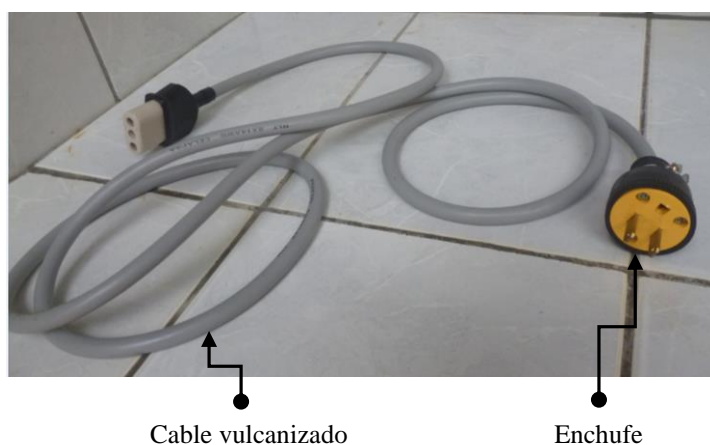
**Figura 2.27.** Cilindro de pared compuesta.



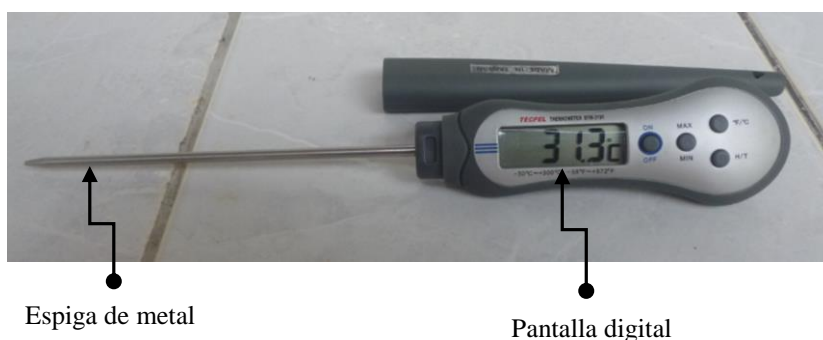
**Figura 2.28.** Tapa aislada.



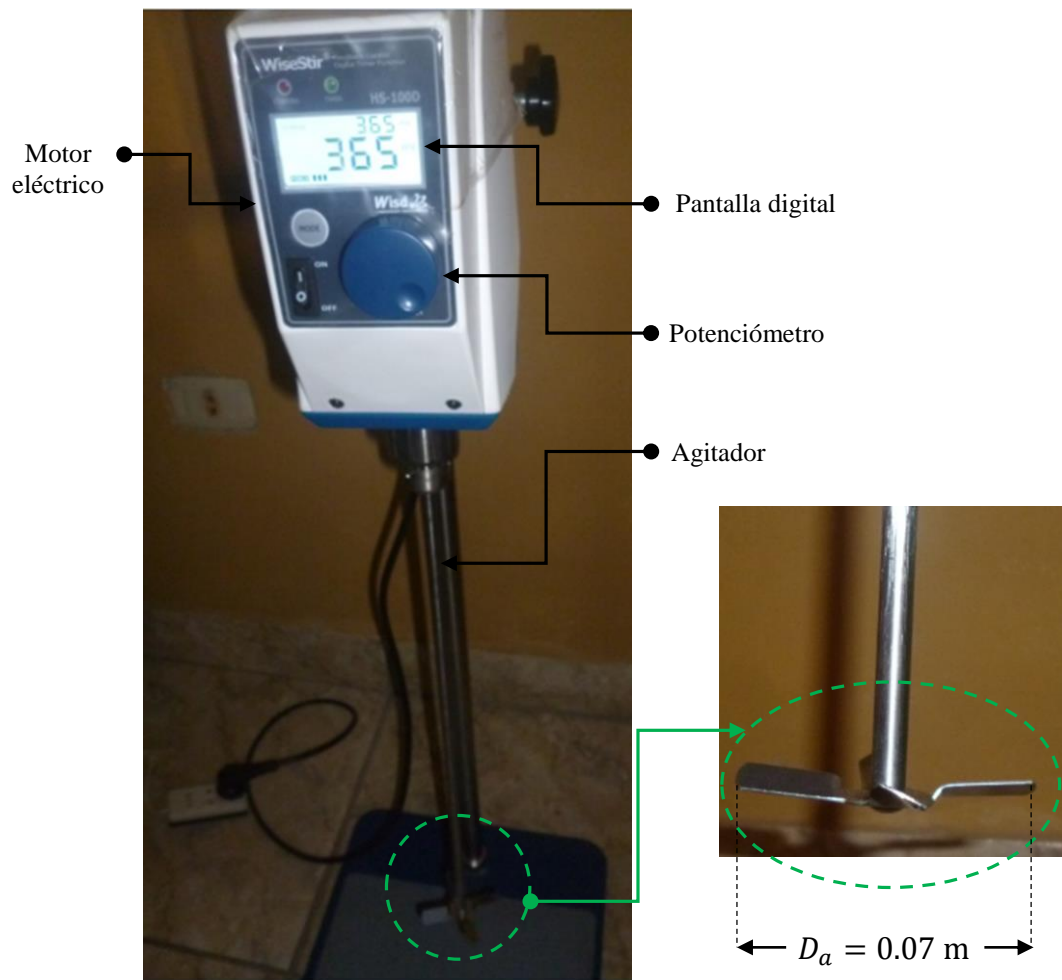
**Figura 2.29.** Resistencia eléctrica.



**Figura 2.30.** Enchufe y cable vulcanizado.



**Figura 2.31.** Termómetro digital.



**Figura 2.32.** Motor eléctrico con agitador.

## CAPÍTULO III

### INSTALACIÓN DEL EQUIPO

#### 3.1. DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO

**Tabla 3.1.** Dimensiones del cilindro interior.

| Parámetro         | Nomenclatura | Valor en mm | Ecuación empleada     | Material                      |
|-------------------|--------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|
| Diámetro interior | $D_1$        | 230         | $D_1 = 2r_1$          | Acero<br>inoxidable<br>N° 304 |
| Diámetro exterior | $D_2$        | 233         | $D_2 = D_1 + 2e_{Ai}$ |                               |
| Espesor           | $e_{Ai}$     | 1.5         | -----                 |                               |
| Altura            | $H_{C1}$     | 235         | $H_{C1} = 1.02D_1$    |                               |

**Tabla 3.2.** Dimensiones del cilindro exterior.

| Parámetro         | Nomenclatura | Valor en mm | Ecuación empleada | Material                      |
|-------------------|--------------|-------------|-------------------|-------------------------------|
| interior          | $D_3$        | 333         | <b>(2.70)</b>     | Acero<br>inoxidable<br>N° 304 |
| Diámetro interior |              |             |                   |                               |
| Diámetro exterior | $D_4$        | 336         | <b>(2.71)</b>     |                               |
| Espesor           | $e_{Ai}$     | 1.5         | -----             |                               |
| Altura            | $H_{C3}$     | 326         | <b>(2.72)</b>     |                               |

**Tabla 3.3.** Dimensiones del aro entre los cilindros interior y exterior.

| Parámetro         | Nomenclatura | Valor en mm | Material                   |
|-------------------|--------------|-------------|----------------------------|
| Diámetro interior | $D_2$        | 233         | Acero inoxidable<br>N° 304 |
| Diámetro exterior | $D_3$        | 333         |                            |
| Espesor           | $e_{Ai}$     | 1.5         |                            |

**Tabla 3.4.** Dimensiones de la tapa aislada.

| Cilindro superior |              |             |                            |
|-------------------|--------------|-------------|----------------------------|
| Parámetro         | Nomenclatura | Valor en mm | Material                   |
| Diámetro interior | $D_3$        | 333         | Acero inoxidable<br>N° 304 |
| Diámetro exterior | $D_4$        | 336         |                            |
| Espesor           | $e_{Ai}$     | 1.5         |                            |
| Altura            | $H_{Csta}$   | 25          |                            |
| Cilindro inferior |              |             |                            |
| Parámetro         | Nomenclatura | Valor en mm | Material                   |
| Diámetro interior | $D_{Icita}$  | 222         | Acero inoxidable<br>N° 304 |
| Diámetro exterior | $D_{Ecita}$  | 225         |                            |
| Espesor           | $e_{Ai}$     | 1.5         |                            |
| Altura            | $H_{Cita}$   | 25          |                            |

**Tabla 3.5.** Especificaciones técnicas del motor eléctrico con agitador.

| Parámetro  | Unidades   |
|--|--|
| Voltaje  | 220 V  |
| Potencia nominal   | (85 a 130) W   |
| Velocidad de rotación del agitador   | (200 a 2000) rpm   |
| Volumen de líquido a tratar  | (2 a 20) L   |
| Viscosidad máxima del líquido  | $150 \times 10^{-3}$ Pa.s  |
| Diámetro del agitador  | 0.07 m   |
| Cantidad de aspas del agitador   | 4  |
| Relaciones geométricas del diámetro del agitador con respecto al diámetro del cilindro interior y la altura del néctar | $\frac{D_a}{D_1} = \frac{0.07}{0.23} \approx 0.3$ $\frac{D_a}{L} = \frac{0.07}{0.19} \approx 0.37$ |

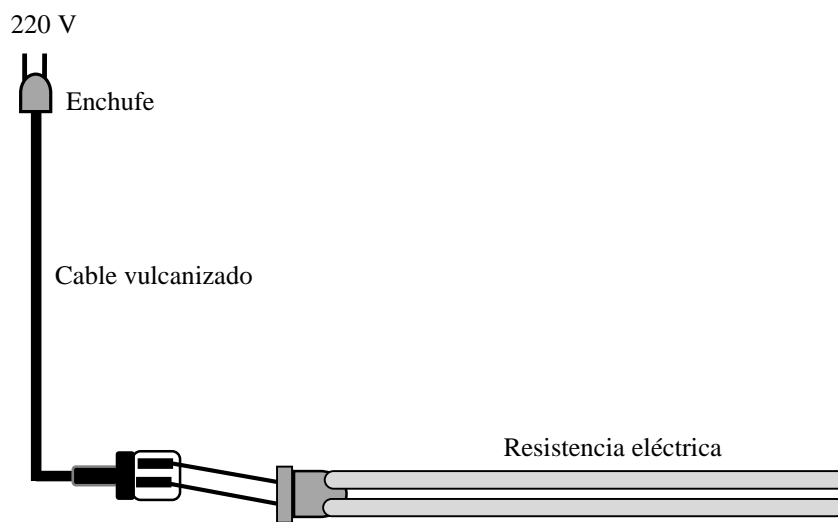
**Tabla 3.6.** Especificaciones técnicas de la resistencia eléctrica.

| Parámetro        | Unidades |
|------------------|----------|
| Voltaje          | 230 V    |
| Potencia nominal | 1500 W   |

**Tabla 3.7.** Especificaciones técnicas del termómetro digital.

|                          |                                   |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Rango de medición        | -50 °C a 300 °C o -58 °F a 572 °F |
| Unidades de temperatura: | °C y °F                           |
| Tiempo de detección      | 1 s                               |

### 3.2. DIAGRAMA DE INSTALACIÓN ELÉCTRICA



**Figura 3.1.** Diagrama de instalación eléctrica.

### 3.3. DISPOSICIÓN ADECUADA DEL EQUIPO EN EL LABORATORIO

Para trabajar cómodamente, el equipo se debe ubicar en el laboratorio en un ambiente que tenga las siguientes dimensiones: largo = 2 m, ancho = 2 m y alto = 3.5 m. Además, este ambiente debe contar por lo menos con lo siguiente:

- Un grifo para el suministro de agua
- Dos tomacorrientes de 220 V cada uno, para conectar la resistencia eléctrica y el motor eléctrico.



## CAPÍTULO IV

### EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

#### 4.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

Los parámetros de operación del equipo son los siguientes términos:  $\sum R$ ,  $\dot{W}_{ME}$  y  $P_R$ . Sin embargo el valor el valor de  $\sum R$  ya se determinó en la sección 2.5, pues de acuerdo a la ecuación (2.50) depende específicamente de las dimensiones y las propiedades físicas de los elementos que forman el cilindro de pared compuesta.

La potencia de la resistencia eléctrica es una medida de su capacidad para disipar energía de forma irreversible [18, 19]. Para el caso de una resistencia eléctrica, la potencia entregada es:

$$P_R = VI f_C = V \left( \frac{V}{R_e} \right) f_C = \frac{V^2}{R_e} f_C. \quad (4.1)$$

Donde:

$V$  : Voltaje en voltio (V)

$I$  : Intensidad de la corriente eléctrica en ampere (A)

$R_e$  : Resistencia eléctrica en ohmio ( $\Omega$ )

$P_R$  : Potencia entregada por la resistencia eléctrica en watt (W)

$f_C$  : Factor de corrección de la resistencia eléctrica, adimensional

De acuerdo a la ecuación (4.1), para determinar el valor de  $P_R$ , se debe conocer los valores de  $V$  y  $R_e$ , los cuales se pueden medir haciendo uso de un multímetro digital; sin embargo también es necesario conocer  $f_C$ . Para esto se realiza un experimento empleando agua pura, reemplazando al néctar. En este caso para aplicar la ecuación (2.28); se considera que se lleva a cabo un proceso de calentamiento, en el que el calor específico promedio del agua es  $C_{pmw} = 4187 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  y las temperaturas inicial y final del agua en el proceso

de calentamiento son  $T_W(0)$  y  $T_W(t_{Tcal})$ , respectivamente. Entonces, la ecuación (2.28) queda expresada como:

$$C_{pmW} = \frac{t_{Tcal}}{\sum R M_W \ln \left[ \frac{P_R + \dot{W}_{ME} - \left( \frac{T_W(0) - T_{Ae}}{\sum R} \right)}{P_R + \dot{W}_{ME} - \left( \frac{T_W(t_{Tcal}) - T_{Ae}}{\sum R} \right)} \right]} - \frac{M_{C1} C_{pAi}}{M_W}. \quad (4.2)$$

Los demás términos que están al lado derecho de la ecuación (4.2), ya se definieron en la sección 2.2.

Al combinar las ecuaciones (4.1) y (4.2), se obtiene:

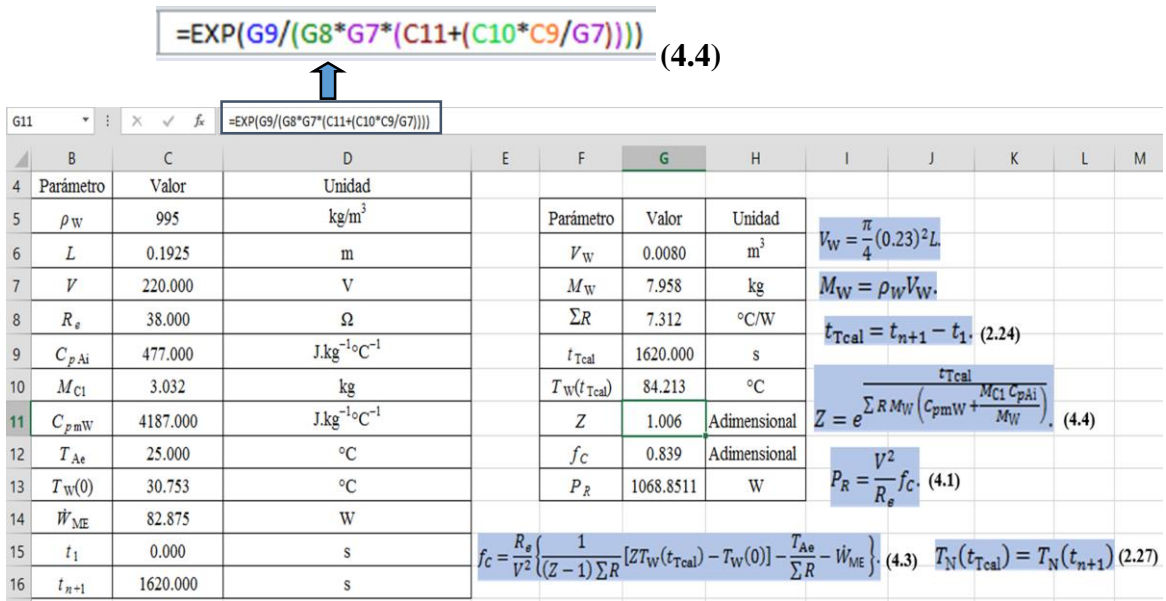
$$f_c = \frac{R_e}{V^2} \left\{ \frac{1}{(Z-1) \sum R} [Z T_W(t_{Tcal}) - T_W(0)] - \frac{T_{Ae}}{\sum R} - \dot{W}_{ME} \right\}. \quad (4.3)$$

Donde el valor de  $Z$  (parámetro adimensional), se calcula mediante la siguiente ecuación:

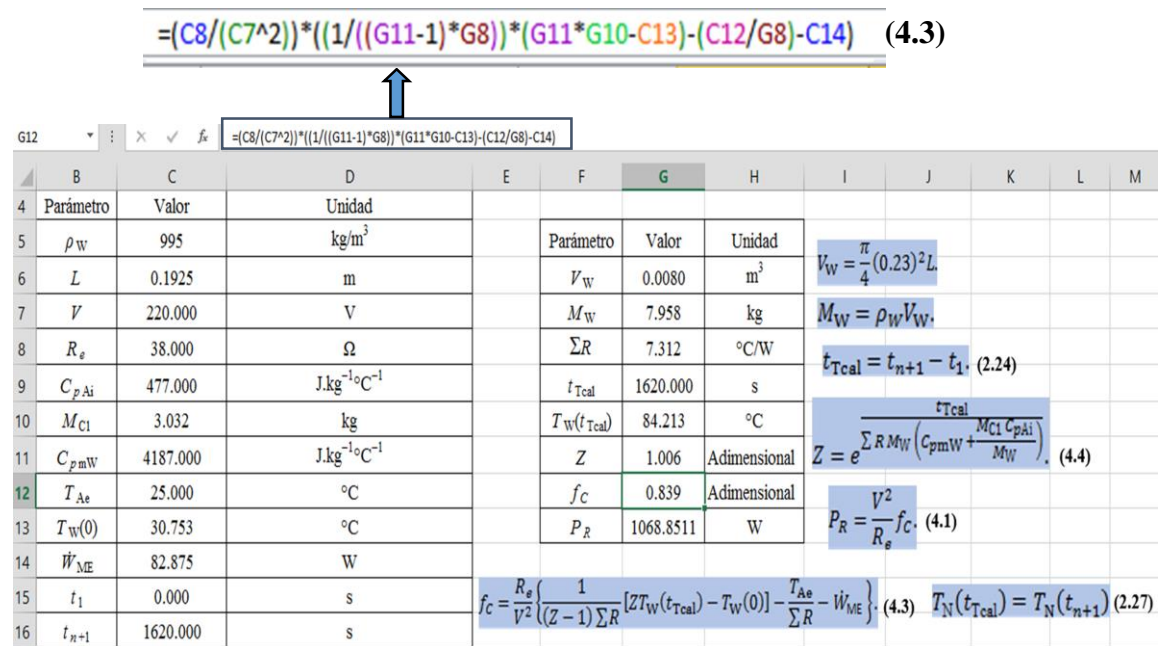
$$Z = e^{\frac{t_{Tcal}}{\sum R M_W \left( C_{pmW} + \frac{M_{C1} C_{pAi}}{M_W} \right)}}. \quad (4.4)$$

Tengase en cuenta que si el voltaje de la resistencia eléctrica se mantiene constante en  $V = 220$  V, el valor de la potencia  $P_R$  también se mantendrá en un valor constante.

En el experimento que se realizó empleando agua pura, se observó en la pantalla digital del motor eléctrico que,  $\dot{W}_{ME} = 97.5 \times 0.85$  W = 82.875 W. El voltaje y ohmiaje de la resistencia eléctrica, medidos con un multímetro digital fueron,  $V = 220$  V y  $R_e = 38$   $\Omega$ , respectivamente. También, en este experimento la altura, la densidad, el volumen y la masa del agua resultaron,  $L = 0.1925$  m,  $\rho_W = 995$  kg.m<sup>-3</sup>,  $V_W = 0.008$  m<sup>3</sup>  $M_W = 7.958$  kg. En la [figura 4.1](#), se muestra la simulación realizada para determinar el valor de  $Z$ , lo cual es necesario para determinar el valor de  $f_c$  ([figura 4.2](#)).



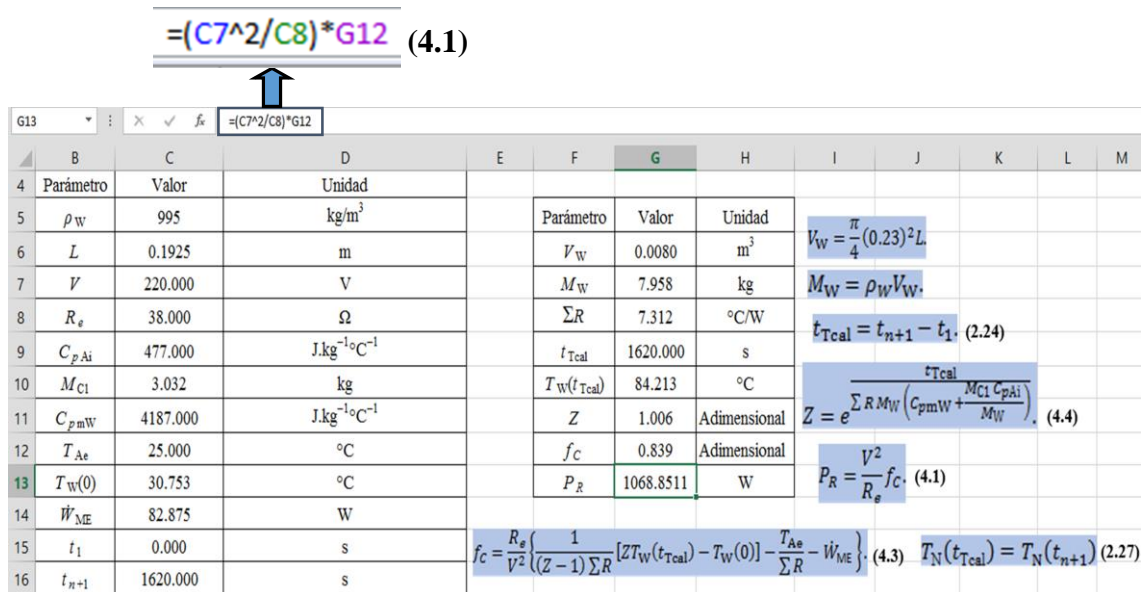
**Figura 4.1.** Simulación realizada para determinar el valor de  $Z$ .



**Figura 4.2.** Simulación realizada para determinar el valor de  $f_c$ .

En las figuras 4.1 y 4.2, se muestran en la celdas G11 y G12 los resultados obtenidos para  $Z$  y  $f_c$ , que son iguales a 1.006 y 0.839, respectivamente.

Como ya se conoce los valores de  $V$ ,  $R_e$  y  $f_c$ , se aplica la ecuación (4.1) para determinar el valor de  $P_R$  (figura 4.3).



**Figura 4.3.** Simulación realizada para determinar el valor de  $P_R$ .

A continuación se tabulan los valores obtenidos de los parámetros de operación (tabla 4.1), de manera que estos valores se utilicen en los siguientes experimentos a llevarse a cabo en el equipo.

**Tabla 4.1.** Resultados de los parámetros de operación del equipo.

| Parámetro      | Valor     | Unidad | Forma de obtención |
|----------------|-----------|--------|--------------------|
| $\sum R$       | 7.312     | °C/W   | (2.50)             |
| $\dot{W}_{ME}$ | 82.875    | W      | Lectura            |
| $P_R$          | 1068.8511 | W      | (4.1)              |

## 4.2. PERFIL DE TEMPERATURA EN EL CILINDRO DE PARED COMPUESTA

A manera de verificar si el diseño y construcción del cilindro de pared compuesta es correcta, se determina el perfil de temperatura. Esto permite observar en que medida

disminuye la temperatura desde  $T_N$  hasta  $T_4$ . Despejando las temperaturas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  de las ecuaciones (2.34), (2.37), (2.40) y (2.44), respectivamente, se tiene:

$$T_1 = T_N - \frac{\dot{Q}_{PPS}}{2\pi r_1 L h_N}. \quad (4.5)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{Q}_{PPS} \ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai}}{r_1}\right)}{2\pi L k_{Ai}}. \quad (4.6)$$

$$T_3 = T_2 - \frac{\dot{Q}_{PPS} \ln\left(\frac{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai}}\right)}{2\pi L k_{At}}. \quad (4.7)$$

$$T_4 = T_3 - \frac{\dot{Q}_{PPS} \ln\left(\frac{r_1 + 2e_{Ai} + e_{At}}{r_1 + e_{Ai} + e_{At}}\right)}{2\pi L k_{Ai}}. \quad (4.8)$$

El flujo de calor perdido por el sistema  $\dot{Q}_{PPS}$  se puede evaluar para cualquier valor de  $T_N$  mediante la ecuación (2.13). Como el valor de  $T_N$  cambia con el tiempo en un proceso de calentamiento, entonces los valores de  $\dot{Q}_{PPS}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$  también cambiarán con el tiempo, es de esta forma que se obtiene un perfil de temperatura para cada instante de tiempo. El perfil de temperatura transitorio en el cilindro de pared compuesta, se obtiene tabulando y graficando los valores de  $T$  en función del radio  $r$  y en diferentes tiempos  $t$ , como se muestra en la [tabla 4.2](#) y en la [figura 4.4](#). Para realizar este procedimiento se tiene en cuenta que:

$$T_N \leq T \leq T_4. \quad (4.9)$$

$$0 \leq r \leq r_4. \quad (4.10)$$

El perfil de temperatura en el cilindro de pared compuesta, se determina haciendo uso de las ecuaciones (4.5), (4.6), (4.7) y (4.8), en las cuales adicionalmente también se

requiere de la ecuación (2.13) para determinar el valor de  $\dot{Q}_{PPS}$  y de la ecuación de  $T_N$  en función de  $t$  (obtenida mediante mínimos cuadrados).

Para el experimento realizado con agua pura, la tabulación de la temperatura  $T$  en función del radio  $r$  en el cilindro de pared compuesta, para diferentes tiempos  $t$ , están en la tabla 4.2.

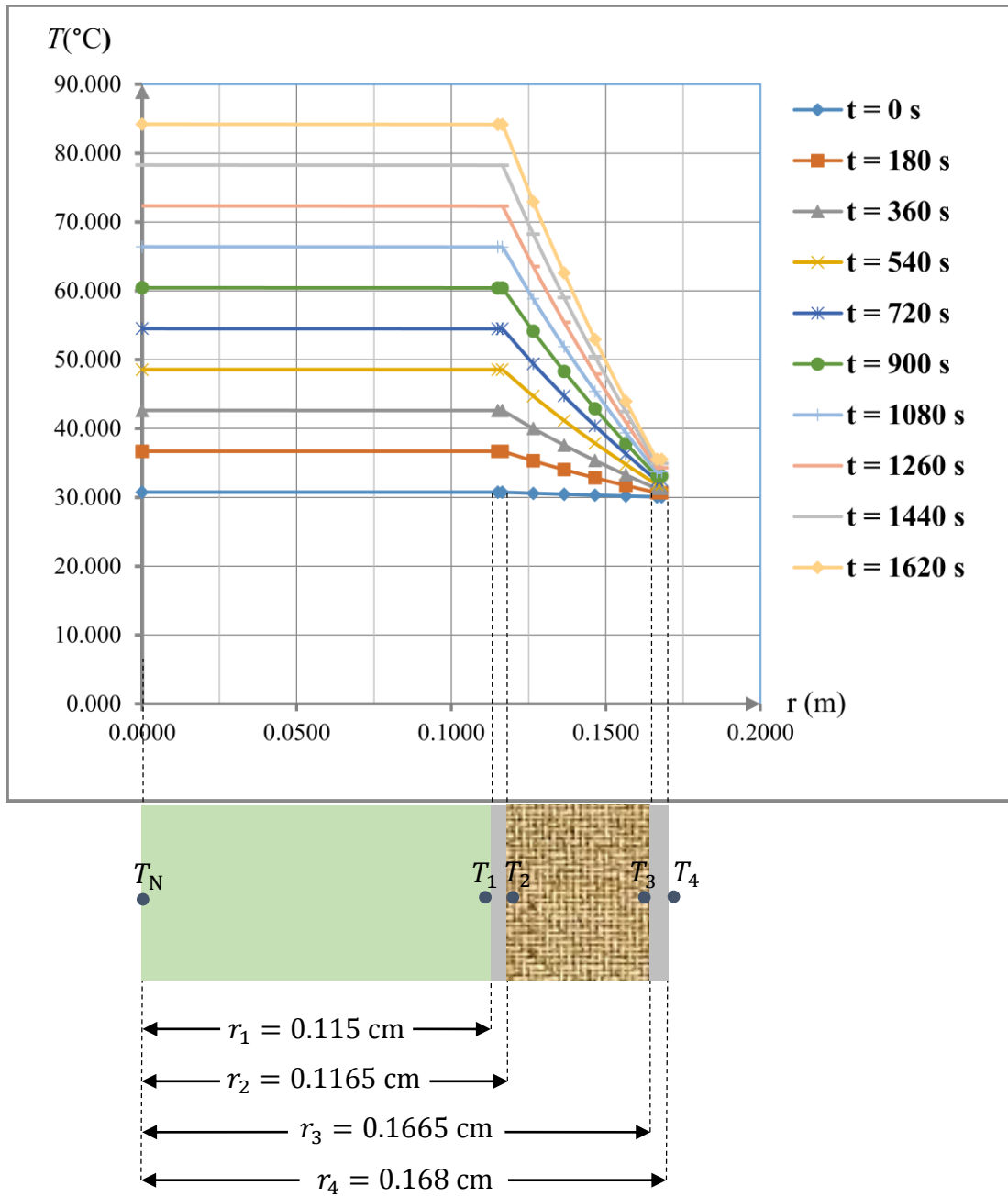
**Tabla 4.2.** Tabulación de los datos para la elaboración del perfil de temperatura, en el cilindro de pared compuesta.

| $T(^{\circ}\text{C})$ |                         | $r(\text{m})$  | $\dot{Q}_{PPS} (\text{W})$ | $t(\text{s})$         |
|-----------------------|-------------------------|----------------|----------------------------|-----------------------|
| $T_N = 30.753$        | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación                   | Perfil en $t_1 = 0$   |
| $T_1 = 30.752$        | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)                     |                       |
| $T_2 = 30.752$        | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 0.1030                     |                       |
| $T_3 = 30.077$        | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |                            |                       |
| $T_4 = 30.077$        | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |                            |                       |
| $T_N = 36.693$        | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación                   | Perfil en $t_2 = 180$ |
| $T_1 = 36.688$        | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)                     |                       |
| $T_2 = 36.688$        | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 0.9153                     |                       |
| $T_3 = 30.682$        | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |                            |                       |
| $T_4 = 30.682$        | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |                            |                       |
| $T_N = 42.633$        | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación                   | Perfil en $t_3 = 360$ |
| $T_1 = 42.624$        | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)                     |                       |
| $T_2 = 42.623$        | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 1.7277                     |                       |
| $T_3 = 31.288$        | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |                            |                       |
| $T_4 = 31.287$        | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |                            |                       |
| $T_N = 48.573$        | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación                   | Perfil en $t_4 = 540$ |
| $T_1 = 48.560$        | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)                     |                       |
| $T_2 = 48.558$        | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 2.5400                     |                       |
| $T_3 = 31.893$        | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |                            |                       |
| $T_4 = 31.892$        | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |                            |                       |
| $T_N = 54.513$        | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación                   | Perfil en $t_5 = 720$ |
| $T_1 = 54.495$        | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)                     |                       |
| $T_2 = 54.493$        | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 3.3523                     |                       |
| $T_3 = 32.498$        | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |                            |                       |
| $T_4 = 32.497$        | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |                            |                       |
| $T_N = 54.513$        | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación                   | Perfil en $t_6 = 900$ |
| $T_1 = 60.453$        | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)                     |                       |
| $T_2 = 60.431$        | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 4.1647                     |                       |
| $T_3 = 33.104$        | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |                            |                       |
| $T_4 = 33.102$        | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |                            |                       |

|                |                         |                |          |                           |
|----------------|-------------------------|----------------|----------|---------------------------|
| $T_N = 66.393$ | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación | Perfil en $t_7 = 1080$    |
| $T_1 = 66.367$ | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)   |                           |
| $T_2 = 66.363$ | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 4.9770   |                           |
| $T_3 = 33.709$ | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |          |                           |
| $T_4 = 33.707$ | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |          |                           |
| $T_N = 72.333$ | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación | Perfil en $t_9 = 1260$    |
| $T_1 = 72.303$ | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)   |                           |
| $T_2 = 72.299$ | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 5.7894   |                           |
| $T_3 = 34.314$ | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |          |                           |
| $T_4 = 34.312$ | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |          |                           |
| $T_N = 78.273$ | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación | Perfil en $t_9 = 1440$    |
| $T_1 = 78.238$ | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)   |                           |
| $T_2 = 78.234$ | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 6.6017   |                           |
| $T_3 = 34.920$ | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |          |                           |
| $T_4 = 34.917$ | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |          |                           |
| $T_N = 84.213$ | $T_N = 0.033t + 30.753$ | $r = 0$        | Ecuación | Perfil en $t_{10} = 1620$ |
| $T_1 = 84.174$ | Ecuación (4.5)          | $r_1 = 0.1150$ | (2.13)   |                           |
| $T_2 = 84.169$ | Ecuación (4.6)          | $r_2 = 0.1165$ | 7.4140   |                           |
| $T_3 = 35.525$ | Ecuación (4.7)          | $r_3 = 0.1665$ |          |                           |
| $T_4 = 35.522$ | Ecuación (4.8)          | $r_4 = 0.1680$ |          |                           |

Los datos de la [tabla 4.2](#) se grafican y se obtiene el perfil de temperatura en el cilindro de pared compuesta, como se muestra en la [figura 4.4](#), de las cuales se observa que al inicio del proceso de calentamiento ( $t_1 = 0$ ), el valor de  $T_N = 30.753$  °C se aproxima al valor de  $T_4 = 30.077$  °C.

Al continuar el proceso de calentamiento, el valor de  $T_N$  se incrementa considerablemente hasta llegar a 84.213 °C; sin embargo el valor de  $T_4$  no crece considerablemente durante el proceso de calentamiento, esto se debe al espesor del aislante térmico, lo cual hace que se tenga una diferencia considerable entre  $T_N$  y  $T_4$  a medida que aumenta el tiempo.



**Figura 4.4.** Perfil de temperatura en el cilindro de pared compuesta, en el experimento con agua pura.



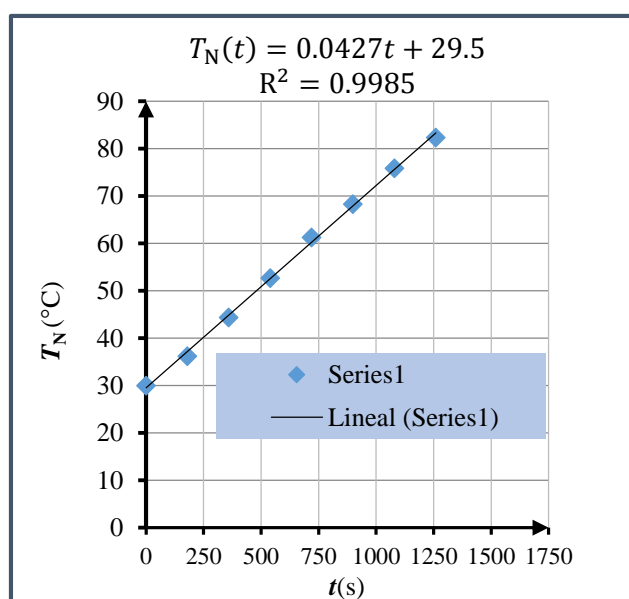
### 4.3. EXPERIMENTOS REALIZADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Después de realizar el experimento con agua pura, se realizaron tres experimentos adicionales usando los siguientes néctares: néctar de cocona, refresco de cocona y néctar de camu camu.

#### Experimento 1 [néctar de cocona (*Solanum sessiliflorum*)]

**Tabla 4.3.** Tabulación de  $T_N$  versus el tiempo  $t$ , en el experimento 1.

| Mediciones $i$ | $t$ (s) | Temperatura medida | Temperatura calculada con la ecuación: $T_N(t) = 0.0427t + 29.5$ |
|----------------|---------|--------------------|--|
|                |         | $T_N$ (°C)         | $T_N$ (°C)   |
| 1              | 0       | 30                 | 29.5   |
| 2              | 180     | 36.2               | 37.186   |
| 3              | 360     | 44.4               | 44.872   |
| 4              | 540     | 52.7               | 52.558   |
| 5              | 720     | 61.3               | 60.244   |
| 6              | 900     | 68.3               | 67.930   |
| 7              | 1080    | 75.9               | 75.616   |
| 8              | 1260    | 82.4               | 83.302   |



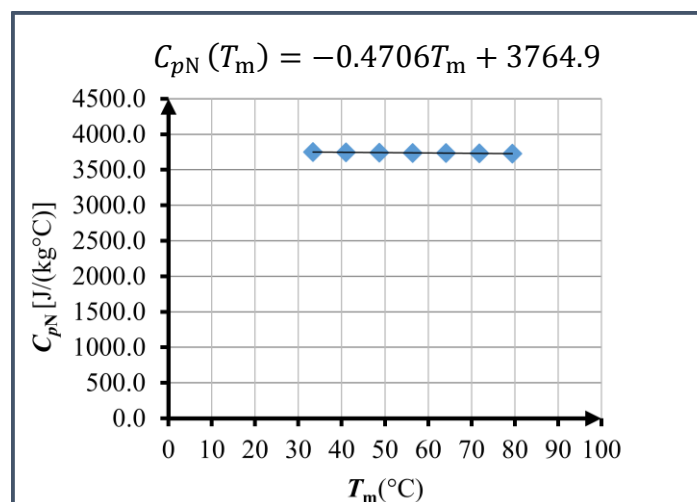
**Figura 4.5.** Representación gráfica de  $T_N$  versus  $t$ , en el experimento 1.

**Tabla 4.4.** Resultados de la altura, densidad, volumen y masa del néctar en el experimento 1.

| Parámetro | Valor  | Unidad              | Forma de obtención               |
|-----------|--------|---------------------|----------------------------------|
| $L$       | 0.156  | m                   | Lectura                          |
| $\rho$    | 1050   | kg. m <sup>-3</sup> | Relación entre masa y volumen    |
| $V_N$     | 0.0065 | m <sup>3</sup>      | $V_N = \frac{\pi}{4} (0.23)^2 L$ |
| $M_N$     | 6.805  | kg                  | $M_N = \rho_N V_N$ .             |

**Tabla 4.5.** Tratamiento de datos y resultados del calor específico del néctar, obtenidos mediante el modelo matemático en el experimento 1.

| Etapa | $t_i$ | $t_{i+1}$ | Ec (2.23)  | Ec (2.25)  | Ec (2.26)  | Ec (2.29) | Ec (2.28)                           |
|-------|-------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-------------------------------------|
|       |       |           | $t_{Ec,i}$ | $T_{iN,i}$ | $T_{fN,i}$ | $T_{m,i}$ | $C_{pN}(T_{m,i})$                   |
| $i$   | s     | s         | s          | °C         | °C         | °C        | J.kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> |
| 1     | 0     | 180       | 180        | 29.500     | 37.186     | 33.343    | 3749.257                            |
| 2     | 180   | 360       | 180        | 37.186     | 44.872     | 41.029    | 3745.640                            |
| 3     | 360   | 540       | 180        | 44.872     | 52.558     | 48.715    | 3742.023                            |
| 4     | 540   | 720       | 180        | 52.558     | 60.244     | 56.401    | 3738.406                            |
| 5     | 720   | 900       | 180        | 60.244     | 67.930     | 64.087    | 3734.789                            |
| 6     | 900   | 1080      | 180        | 67.930     | 75.616     | 71.773    | 3731.172                            |
| 7     | 1080  | 1260      | 180        | 75.616     | 83.302     | 79.459    | 3727.555                            |



**Figura 4.6.** Representación gráfica de  $C_{pN}$  versus  $T_m$ , en el experimento 1.

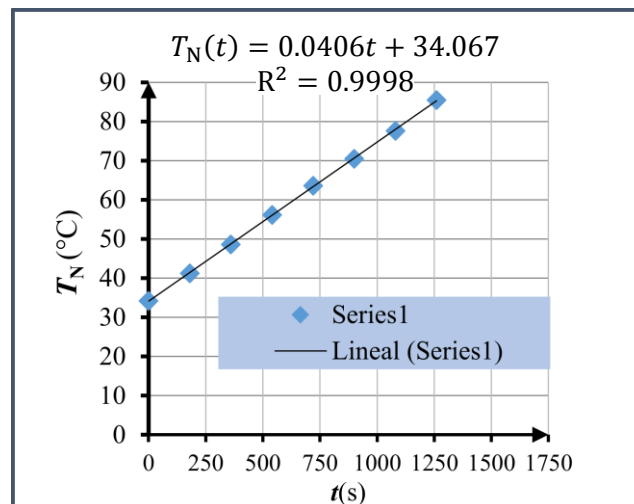
**Tabla 4.6.** Resultado del calor específico del néctar, mediante la ecuación (2.30), en el experimento 1.

|                                   |
|-----------------------------------|
| <b>Ec (2.30)</b>                  |
| $C_{pm, N}$ [29.5 °C a 83.302 °C] |
| $J.kg^{-1}°C^{-1}$                |
| 3738.3577                         |

**Experimento 2** [refresco de cocona (*Solanum sessiliflorum*) diluido]

**Tabla 4.7.** Tabulación de  $T_N$  versus el tiempo  $t$ , en el experimento 2.

| Mediciones $i$ | $t$ (s) | Temperatura<br>medida | Temperatura calculada<br>con la ecuación: $T_N = 0.0406t + 34.067$ |
|----------------|---------|-----------------------|--|
|                |         | $T_N(°C)$             | $T_N(°C)$  |
| 1              | 0       | 34.2                  | 34.067   |
| 2              | 180     | 41.2                  | 41.375   |
| 3              | 360     | 48.6                  | 48.683   |
| 4              | 540     | 56.1                  | 55.991   |
| 5              | 720     | 63.6                  | 63.299   |
| 6              | 900     | 70.5                  | 70.607   |
| 7              | 1080    | 77.6                  | 77.915   |
| 8              | 1260    | 85.5                  | 85.223   |



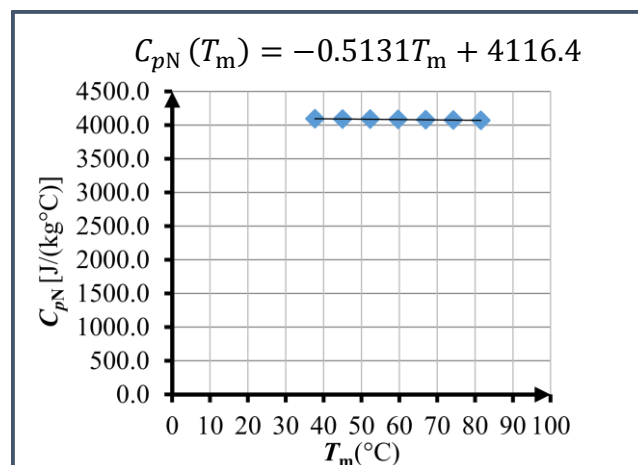
**Figura 4.7.** Representación gráfica de  $T_N$  versus  $t$ , en el experimento 2.

**Tabla 4.8.** Resultados de la altura, densidad, volumen y masa del néctar en el experimento 2.

| Parámetro | Valor  | Unidad              | Forma de obtención               |
|-----------|--------|---------------------|----------------------------------|
| $L$       | 0.150  | m                   | Lectura                          |
| $\rho$    | 1000   | kg. m <sup>-3</sup> | Relación entre masa y volumen    |
| $V_N$     | 0.0066 | m <sup>3</sup>      | $V_N = \frac{\pi}{4} (0.23)^2 L$ |
| $M_N$     | 6.565  | kg                  | $M_N = \rho_N V_N$ .             |

**Tabla 4.9.** Tratamiento de datos y resultados del calor específico del néctar, obtenidos mediante el modelo matemático en el experimento 2.

|       |       |           | Ec (2.23)   | Ec (2.25)   | Ec (2.26)   | Ec (2.29)  | Ec (2.28)                           |
|-------|-------|-----------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------------------------------|
| Etapa | $t_i$ | $t_{i+1}$ | $t_{Ec, i}$ | $T_{iN, i}$ | $T_{fN, i}$ | $T_{m, i}$ | $C_{pN}(T_{m, i})$                  |
| $i$   | s     | s         | s           | °C          | °C          | °C         | J.kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> |
| 1     | 0     | 180       | 180         | 34.067      | 41.375      | 37.721     | 4097.083                            |
| 2     | 180   | 360       | 180         | 41.375      | 48.683      | 45.029     | 4093.334                            |
| 3     | 360   | 540       | 180         | 48.683      | 55.991      | 52.337     | 4089.584                            |
| 4     | 540   | 720       | 180         | 55.991      | 63.299      | 59.645     | 4085.834                            |
| 5     | 720   | 900       | 180         | 63.299      | 70.607      | 66.953     | 4082.084                            |
| 6     | 900   | 1080      | 180         | 70.607      | 77.915      | 74.261     | 4078.334                            |
| 7     | 1080  | 1260      | 180         | 77.915      | 85.223      | 81.569     | 4074.584                            |



**Figura 4.8.** Representación gráfica de  $C_{pN}$  versus  $T_m$ , en el experimento 2.

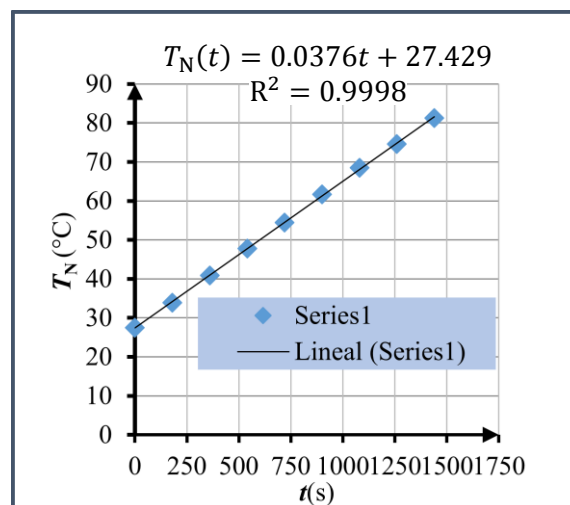
**Tabla 4.10.** Resultado del calor específico del néctar, mediante la ecuación (2.30), en el experimento 2.

|                                     |
|-------------------------------------|
| <b>Ec (2.30)</b>                    |
| $C_{pm, N}$ [34.067 °C a 85.223 °C] |
| $J.kg^{-1}°C^{-1}$                  |
| 4085.7962                           |

**Experimento 3** [néctar de camu camu (*Myrciaria dubia*)]

**Tabla 4.11.** Tabulación de  $T_N$  versus el tiempo  $t$ , en el experimento 3.

| Mediciones $i$ | $t$ (s) | Temperatura medida | Temperatura calculada                                   |
|----------------|---------|--------------------|---|
|                |         | $T_N$ (°C)         | con la ecuación: $T_N = 0.0376t + 27.429$<br>$T_N$ (°C) |
| 1              | 0       | 27.5               | 27.429  |
| 2              | 180     | 33.9               | 34.197  |
| 3              | 360     | 40.9               | 40.965  |
| 4              | 540     | 47.8               | 47.733  |
| 5              | 720     | 54.5               | 54.501  |
| 6              | 900     | 61.7               | 61.269  |
| 7              | 1080    | 68.5               | 68.037  |
| 8              | 1260    | 74.6               | 74.805  |
| 9              | 1440    | 81.3               | 81.573  |



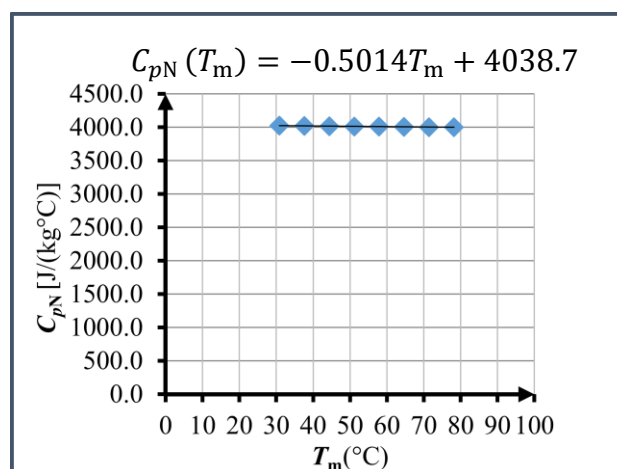
**Figura 4.9.** Representación gráfica de  $T_N$  versus  $t$ , en el experimento 3.

**Tabla 4.12.** Resultados de la altura, densidad, volumen y masa del néctar en el experimento 3.

| Parámetro | Valor  | Unidad                          | Forma de obtención               |
|-----------|--------|---------------------------------|----------------------------------|
| $L$       | 0.172  | m                               | Lectura                          |
| $\rho$    | 1015   | $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | Relación entre masa y volumen    |
| $V_N$     | 0.0071 | $\text{m}^3$                    | $V_N = \frac{\pi}{4} (0.23)^2 L$ |
| $M_N$     | 7.253  | kg                              | $M_N = \rho_N V_N$ .             |

**Tabla 4.13.** Tratamiento de datos y resultados del calor específico del néctar, obtenidos mediante el modelo matemático en el experimento 3.

|        |       |           | Ec (2.23)   | Ec (2.25)          | Ec (2.26)          | Ec (2.29)          | Ec (2.28)   |
|--------|-------|-----------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|
| Etapas | $t_i$ | $t_{i+1}$ | $t_{Ec, i}$ | $T_{iN, i}$        | $T_{fN, i}$        | $T_{m, i}$         | $C_{pN}(T_{m, i})$  |
| $i$    | s     | s         | s           | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $^{\circ}\text{C}$ | $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ |
| 1      | 0     | 180       | 180         | 27.429             | 34.197             | 30.813             | 4023.203  |
| 2      | 180   | 360       | 180         | 34.197             | 40.965             | 37.581             | 4019.809  |
| 3      | 360   | 540       | 180         | 40.965             | 47.733             | 44.349             | 4016.415  |
| 4      | 540   | 720       | 180         | 47.733             | 54.501             | 51.117             | 4013.021  |
| 5      | 720   | 900       | 180         | 54.501             | 61.269             | 57.885             | 4009.628  |
| 6      | 900   | 1080      | 180         | 61.269             | 68.037             | 64.653             | 4006.234  |
| 7      | 1080  | 1260      | 180         | 68.037             | 74.805             | 71.421             | 4002.840  |
| 8      | 1260  | 1440      | 180         | 74.805             | 81.573             | 78.189             | 3999.446  |



**Figura 4.10.** Representación gráfica de  $C_{pN}$  versus  $T_m$ , en el experimento 3.

**Tabla 4.14.** Resultado del calor específico del néctar, mediante la ecuación (2.30), en el experimento 3.

|                                     |
|-------------------------------------|
| Ec (2.30)                           |
| $C_{pm, N}$ [27.429 °C a 74.805 °C] |
| $J.kg^{-1}°C^{-1}$                  |
| 4013.0699                           |

En las figuras 4.6, 4.8 y 4.10, se observa la representación gráfica de  $C_{pN}$  versus  $T_m$  para los experimentos 1, 2, y 3, respectivamente. Esto a su vez permitió en cada uno de los experimentos, obtener una ecuación de  $C_{pN}$  en función de  $T_m$ , mediante la cual se puede evaluar el calor específico del néctar en un amplio rango de temperatura.

Se puede observar de los experimentos realizados, que el valor de  $C_{pm}$  resulta más cercano a  $4187 J.kg^{-1}°C^{-1}$ , cuanto más diluido se encuentre el néctar. Por ejemplo, al comparar el néctar de cocona con el refresco de cocona:  $C_{pm, N}$  [29.5 °C a 83.302 °C] =  $3738.3577 J.kg^{-1}°C^{-1}$  (néctar) <  $C_{pm, N}$  [34.067 °C a 85.223 °C] =  $4085.7962 J.kg^{-1}°C^{-1}$  (refresco).

Cabe recalcar que en los tres experimentos realizados, se han usado los siguientes valores  $M_{C1} = 3.032 kg$ ,  $C_{pAi} = 477 J.kg^{-1}°C^{-1}$ ,  $T_{Ae} = 25 °C$ ,  $\sum R = 7.312 °C/W$ ,  $\dot{W}_{ME} = 82.875 W$  y  $P_R = 1068.851 W$ , al aplicar la ecuación (2.28).

De todo esto se concluye que el contenido de agua de un néctar, aporta el mayor porcentaje en el valor del calor específico, tal como lo muestran los estudios realizados por Bon et al. [5] y Muramatsu et al. [6]. Sin embargo, para un proceso donde se realice enfriamiento o calentamiento de un néctar, es más conveniente expresar el calor específico en función de la temperatura; pues en muchos procesos térmicos, la cantidad de calor suministrado depende directamente del rango de temperatura en el que se lleven a cabo.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE COSTO

#### 5.1. COSTO DE DISEÑO

**Tabla 5.1.** Costo de diseño.

| Servicio   | Cantidad | Precio unitario (S/.) | Precio total (S/.) |
|--|----------|-----------------------|--------------------|
| Consultoría y asesoramiento especializado en el desarrollo del informe final | -        | 1200                  | 1200               |
| <b>Total</b>   |          |                       | <b>1200</b>        |

#### 5.2. COSTO DE MATERIALES Y EQUIPOS

**Tabla 5.2.** Costo de materiales y equipos.

| Artículo   | Cantidad | Precio unitario (S/.) | Precio total (S/.) |
|--|----------|-----------------------|--------------------|
| Plancha de acero inoxidable N° 304<br>(1.2 m × 2.4 m × 1.5 mm) | 1        | 455                   | 455                |
| Cable vulcanizado N° 2 × 16                                    | 2 m      | 4                     | 8                  |
| Enchufe  | 1        | 3.5                   | 3.5                |
| Soldadura de acero inoxidable 3/32                             | (1/2) kg | 48                    | 24                 |
| Lija de agua 1000  | 2        | 3                     | 6                  |
| Silicona de alta temperatura                                   | 1        | 8                     | 8                  |
| Enchufe para horno   | 1        | 3                     | 3                  |
| Motor eléctrico con agitador                                   | 1        | 2450                  | 2450               |
| Resistencia eléctrica  | 1        | 65                    | 65                 |
| Termómetro digital   | 1        | 140                   | 140                |
| <b>Total</b>   |          |                       | <b>3162.5</b>      |



### 5.3. COSTO DE INSTALACIÓN Y MANO DE OBRA

**Tabla 5.3.** Costo de instalación y mano de obra.

| Servicio  | Precio unitario (S/.) | Precio total (S/.) |
|---|-----------------------|--------------------|
| Construcción del cilindro de pared compuesta (incluye el soldado y rolado de las planchas de metal) | 450                   | 450                |
| Conexión de la resistencia eléctrica  | 30                    | 30                 |
| <b>Total</b>  |                       | <b>480</b>         |

### 5.4. OTROS COSTOS

**Tabla 5.4.** Otros costos.

| Artículo                      | Cantidad | Precio unitario (S/.) | Precio total (S/.) |
|-------------------------------|----------|-----------------------|--------------------|
| Impresiones del informe final | 10       | 25                    | 250                |
| Encuadernados                 | 10       | 20                    | 200                |
| Pasajes                       | -        | 300                   | 300                |
| <b>Total</b>                  |          |                       | <b>750</b>         |

### 5.5. COSTO TOTAL

$$\text{Costo total (S/.)} = 1200 + 3162.5 + 480 + 750 = 5592.5$$

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó e instaló un equipo para determinar el calor específico de néctares, cumpliendo de esta forma con el objetivo general.
- 1. Se diseñó el proceso de calentamiento a llevarse a cabo en el equipo (véase las secciones 2.1 y 2.2).
- 2. Se aplicó la primera ley de la termodinámica y se dedujo la ecuación (2.28), la cual representa el modelo matemático que relaciona el calor específico del néctar con los parámetros de operación del equipo (véase la sección 2.2).
- 3. Se aplicó los mecanismos básicos de la transferencia de calor al diseño del equipo, deduciéndose de esta forma la ecuación (2.51) que relaciona el flujo de calor perdido por el sistema con el espesor del aislante térmico. Seguidamente en la sección 2.4, se realizó la simulación de la ecuación (2.51), determinándose que el espesor adecuado del aislante térmico es  $0.05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$  (véase la sección 2.3).
- 4. Se determinó los parámetros de operación del equipo, cuyos valores se mantuvieron constantes en los tres experimentos que se realizaron (véase la tabla 4.1).
- 5. Se construyó el cilindro de pared compuesta, del cual se muestra en detalle el proceso de construcción de cada uno de sus componentes (cilindro interior, cilindro exterior, aro entre los dos cilindros y la tapa aislada) (véase la sección 2.8).
- 6. Se realizó tres experimentos, en los cuales se determinó una ecuación que realaciona el calor específico del néctar con la temperatura. Posteriormente se integro esta ecuación y se determinó el calor específico promedio del néctar, correspondiente al intervalo de temperatura en el que se llevó a cabo el proceso de calentamiento (véase la sección 2.8).

## 6.2. RECOMENDACIONES

- No apoyarse sobre el cilindro de pared compuesta con las manos mojadas cuando se esté realizando algún experimento en el equipo, esto con el fin de evitar accidentes como descargas eléctricas.
- Tener cuidado con las conexiones eléctricas, ya que una mala conexión puede ocasionar daños en el funcionamiento del motor eléctrico.
- Se debe realizar un mantenimiento periódico que garantice el buen funcionamiento y la vida útil de los componentes del equipo. Esto comprende la revisión permanente de la resistencia eléctrica, el motor eléctrico y el termómetro digital.
- Se recomienda realizar estudios en el futuro con otros néctares de frutas, en los cuales se haga aplicación del análisis multivariante para determinar la ecuación del calor específico en función de la temperatura y el contenido de agua presente en el néctar. Esto permitirá comparar los resultados obtenidos mediante el modelo matemático (ecuación (2.28)) con los resultados obtenidos en los estudios realizados por Salas [1], Moraga [3], Bon et al. [5] y Muramatsu et al. [6].
- Se recomienda elaborar un software en lenguaje visual para calcular el calor específico de néctares, jarabes y refrescos, el cual tenga como algoritmo de cálculo las ecuaciones deducidas en la sección 2.2. Al llevarse a cabo un experimento en el equipo, esto permitirá obtener en forma rápida y precisa las ecuaciones y gráficas de la temperatura en función del tiempo y el calor específico en función de la temperatura.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Salas F., “Diseño y construcción de un equipo con modelo matemático para calcular la capacidad calorífica de alimentos líquidos”, Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ciencias con Mención en Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química y Textil, Lima-Perú, 2014.
- [2] Geankoplis C. J., “Procesos de transporte y principios de procesos de separación”, 4a. edición, México, Grupo Patria Cultural, 2006.
- [3] Moraga J. A., “Determinación del Calor Específico de Murta (*Ugni molinae* Turcz) y Arándano (*Vaccinium corymbosum* L)”, Tesis presentada como parte de los requisitos para optar el grado de Licenciado en Ciencia de los alimentos, Universidad Austral de Chile, Escuela de Ingeniería en Alimentos, 2008.
- [4] Paima L. y Ramos R., “Diseño, construcción e instalación de un equipo para medir la conductividad térmica de alimentos sólidos y pastosos”, Trabajo final de carrera para optar el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Industrias Alimentarias, Iquitos-Perú, 2013.
- [5] Bon J., Váquiro H., Benedito J., Telis-Romero., “Thermophysical properties of mango pulp (*Mangifera indica* L. cv. Tommy Atkins)”, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jfoodeng](http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng), Journal of Food Engineering 97 (2010) 563–568.
- [6] Muramatsu Y., Sakaguchi E., Orikasa T., Tagawa A., “Simultaneous estimation of the thermophysical properties of three kinds of fruit juices based on the measured result by a transient heat flow probe method”, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/jfoodeng](http://www.elsevier.com/locate/jfoodeng), Journal of Food Engineering 96 (2010) 607–613.
- [7] De Dios Alvarado J., “Specific Heat of Dehydrated Pulps of Fruits”, Journal of Food Engineering 14 (1991) 189–195.

- [8] Gupta T. R., “Specific heat of Indian unleavened flat bread (chapati) at various stages of cooking”, *Journal of Process Engineering* 13 (1990) 217–227.
- [9] Choi Y., Okos M. R., “Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods”, Elsevier Applied Science, London, In *Food Engineering and Process Application* 1 (1986) 93-101.
- [10] Rahman S., “Food properties handbook”, Edited by C. R. C. S. i. C. F. Sciences, University of Massachusetts, 1995.
- [11] Orozco M., “Operaciones Unitarias”, México, Limusa Wiley, 1998.
- [12] Felder R. M., Rousseau R. W., “Principios elementales de los procesos químicos”, 3a. edición, México, Limusa Wiley, 2005, págs. 8–30, 316–319, 366–367, 611–612, 639–641.
- [13] Smith J. M., Van Ness H. C., Abbott M. M., “Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química”, 7a. edición, México, McGraw-Hill, 2007, págs. 22, 44–52, 56-59.
- [14] Himmelblau D. M., “Principios Básicos y Cálculos en Ingeniería Química”, 6a. edición, México, Prentice-Hall, 1997, págs. 391–404.
- [15] Valiente A., Tlaczin R. P., “Problemas de Balances de Materia y Energía”, 1a. edición, México, Alhambra Mexicana, 1991, págs. 117–119.
- [16] Incropera F. P., DeWitt D. P., “Fundamentos de Transferencia de Calor”, 4a. edición, México, Prentice-Hall, 1999, págs. 4–8, 76–78, 827.
- [17] Pitts D. R., Sissom L. E., “Transferencia de Calor”, 1a. edición, Bogotá-Colombia, McGraw-Hill, 1980, pág. 2.

- [18] Edminister J. C., “Circuitos Eléctricos”, 2a. edición, México, McGraw-Hill, 1993, págs. 12 –13.
- [19] Kern D. Q., “Procesos de Transferencia de Calor”, 32a. reimpresión, México, Grupo Patria Cultural, 2001, págs. 19–29.

# ANEXOS

**Anexo 1.** Vista completa del equipo.





**Anexo 2.** Cargando el equipo para el experimento con néctar de cocona.



**Anexo 3.** Cargando el equipo para el experimento con néctar de camu camu.

