



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA  
AMAZONÍA PERUANA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“DISEÑO CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN  
DE UNA CALDERA PARA LA GENERACIÓN  
DE VAPOR DE AGUA EMPLEANDO  
ENERGÍA ELÉCTRICA”**

**TESIS**

Para Optar el Título de:

**INGENIERO QUIMICO**

Presentado por los Bachilleres:

*Guerra Pinedo Ericsson Pool*

*Montalván Saldaña Wacner Ernan*

*Reátegui Romero Jeffrey*

Asesora:

**Ing. Rosa Isabel Sousa Najar**

**Iquitos – Perú**


**2011**



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA

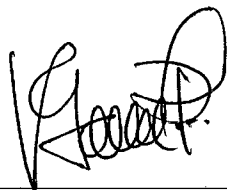
## FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Tesis para optar el título profesional de “INGENIERO QUIMICO” aprobado por unanimidad con calificación de buena, en Sustentación Pública por el jurado nombrado por la facultad de Ingeniería Química conformado por:



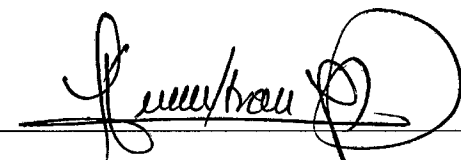
---

Ing. JORGE A. VASQUEZ PINEDO Dr.  
PRESIDENTE.



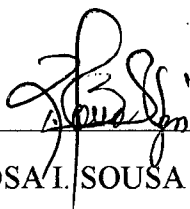
---

Ing. VICTOR GARCIA PEREZ.  
MIEMBRO.



---

Ing. CARLOS E. ARAUJO DAVILA.  
MIEMBRO.



---

Ing. ROSA I. SOUSA NAJAR.  
ASESORA

## **DEDICATORIA:**

***El presente trabajo le dedico:***

***A Dios, al amigo incomparable que siempre me acompaña y está presente en mi vida.***

***A la mujer, que siempre estuvo y esta a mi lado alentándome y orientándome, a seguir adelante con su amor, paciencia, dedicación que es mi madre la señora  
ELIZABETH.***

***A mi padre, el señor JULIO, por su apoyo incondicional, por su presencia permanente, por sus enseñanzas en los valores de la vida, por el tiempo y dedicación que me dio a pesar de los pocos días que estaba conmigo.***

***A mi hermano OMAR, por su compañía, aprecio y que sea para él un camino a seguir en su vida personal y profesional.***

***A mi amigo y fiel compañero, que siempre estuvo a mi lado desde que llego a mi vida y me acompañó durante esta etapa académica hasta la culminación del presente,  
HOOTH.***

***A la flor que nacerá, crecerá y será el motor, motivo y el orgullo de mi superación constante, en mi vida personal y profesional, MI HIJA.***

***A mí amor y compañera, que siempre está a mi lado con sus consejos, orientaciones y siempre impulsándome a la superación, a ser mejor cada día, y que me enseñó a luchar contra la adversidad de la vida, MELISSA.***

***Mi familia y amigos por estar siempre conmigo, en todo momento.***

***Ericsson Pool Guerra Pinedo.***

## **AGRADECIMIENTO:**

*A Dios, por darme la oportunidad a la vida y por hacer posible la realización Del presente trabajo.*

*A la Universidad Nacional De La Amazonía Peruana (UNAP).*

*A la Facultad De Ingeniería Química (FIQ).*

*A los miembros del jurado, Ing. Jorge A. Vásquez Pinedo, Ing. Carlos E. Araujo Dávila, Ing. Víctor García Pérez.*

*A mi familia por el apoyo incondicional a la realización del presente trabajo de tesis.*

*A los Docentes, por sus enseñanzas y por brindarme sus experiencias profesionales.*

*A los compañeros y amigos con quienes compartí gratos momentos.*

*Ericsson Pool Guerra Pinedo.*

## **DEDICATORIA:**

*“Primero es a Dios por darme la vida, mi familia y a mi hijo: Federick Hernán.*

*A mi señor padre: Federico Montalván, por su enseñanza y amor. Por su herencia: mi educación.*

*A mi madre: Dixelia Saldaña por su apoyo todos estos años, por su infinito amor comprensión y por ayudarme a que este momento llegara. Gracias mamá.*

*A mi hijo, motor de mi vida a quien amo y protegeré siempre.*

*A mis hermanos Ketty; Jari; Marcks y Dany por su apoyo.*

*A Milagros amiga y compañera por su entusiasmo y apoyo incondicional para lograr este objetivo.”*

*Muchas Gracias.*

*Wacner Ernan Montalván Saldaña*

*"A mis profesores, compañeros: Ericsson y Jeffrey; amigos...*

*...y todos aquellos que hicieron posible la confección y elaboración de este trabajo de tesis"*

*Muchas Gracias.*

*Wacner Ernan Montalván Saldaña*

**AGRADECIMIENTO:**

*A Dios, por las personas que puso en mi camino.*

*Mis queridos padres, por su confianza y su apoyo en mis años de estudios*

*Mis hermanos por sus apoyos y sus votos de confianza.*

*Mi profesor Jorge Vázquez por su orientación para el desarrollo de la presente.*

*Mi amigo Pedro Rivera, gracias por su orientación.*

*Los profesores, amigos y colegas de la universidad por los momentos inolvidables que hemos vivido.*

*Finalmente a todas las personas que se cruzaron en este camino y que me dieron palabras de aliento y apoyo.*

**Wacner Montalván Saldaña**

**DEDICATORIA:**

*A mis queridos padres, por todo su amor, apoyo en los momentos más difíciles y por su palabra de aliento a quienes me dieron la vida, quienes me guiaron por buen camino y me enseñaron también que es lo mejor. A quienes les debo todo lo que soy*

*A mis hermanos Olga y Jasón, porque de una u otra manera me han apoyado incondicionalmente.*

*A mi futura hija, como un testimonio de gratitud a Dios, porque su presencia será siempre el motivo mas grande que me ha impulsado para lograr esta meta.*

*A mi pareja y futura madre Fiorella por su amor, apoyo y animo que me brinda día a día para alcanzar nuevas metas.*

*A mis compañeros y grandes amigos por esos hermosos años que hemos estado compartiendo momentos inolvidables y felices.*

*Gracias*

*Jeffrey Reátegui Romero.*

## ÍNDICE

<b>ANTECEDENTES</b>	<b>I</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>II</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>III</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>IV</b>
<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO</b>	<b>01</b>
1.1. FUNDAMENTOS DE LOS BALANCES DE MASA	01
1.1.1. CLASIFICACIÓN DE PROCESOS	01
1.1.2. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MASA	02
1.1.2.1. Balances diferenciales	03
1.1.2.2. Balances integrales	04
1.2. ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA	04
1.3. TEORIAS DEL CALOR	08
1.4. MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	09
1.5. LEY DE FOURIER PARA UN CILINDRO HUECO	13
1.6. COMBINACIÓN DE CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN A TRAVÉS DE CILINDROS CONCENTRICOS	14
1.6.1. RESISTENCIAS TÉRMICAS	17
1.7. GROSOR CRÍTICO DEL AISLANTE PARA UN CILINDRO	17
1.8. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE LA CALDERA	19
1.9. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MASA A LA CALDERA	21
1.9.1. BALANCE DE MASA EN EL PROCESO INTERMITENTE	22
1.9.2. BALANCE DE MASA EN EL PROCESO SEMI-INTERMITENTE	22
1.10. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA Y LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR A LA CALDERA	23



1.10.1.	BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO INTERMITENTE	23
1.10.2.	BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO SEMI-INTERMITENTE	25
1.10.3.	MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CALDERA	26
1.10.4.	RESISTENCIAS TÉRMICAS PARA LA CALDERA	29
1.10.5.	ESPESOR DE AISLANTE PARA LA CALDERA	30
1.11.	DIAGRAMA DE EVOLUCIÓN PARA LA TEMPERATURA DEL AGUA DENTRO LA CALDERA, MASA DE AGUA DENTRO LA CALDERA Y MASA DEL VAPOR QUE SALE DE LA CALDERA	31
1.12.	VARIABLES MÁS IMPORTANTES DE LA OPERACIÓN	33
1.12.1.	TEMPERATURA INICIAL DEL AGUA EN LA CALDERA	33
1.12.2.	TEMPERATURA FINAL DEL AGUA EN LA CALDERA	33
1.12.3.	TIEMPO QUE DURA EL PROCESO INTERMITENTE	34
1.12.4.	TIEMPO QUE DURA EL PROCESO SEMI-INTERMITENTE	34
1.12.5.	MASA DE AGUA EVAPORADA	34
1.12.6.	MASA DE AGUA EN LA CALDERA EN EL PROCESO SEMI-INTERMITENTE.	34
1.13.	VARIABLES MÁS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.	34
1.13.1.	POTENCIA DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	34
1.13.2.	RESISTENCIAS TÉRMICAS	35
1.13.3.	ESPESOR DE AISLANTE	35
1.13.4.	DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO INTERIOR	35

1.13.5. DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO EXTERIOR	36
1.13.6. ÁREA DE LA TAPA ENTRE LOS DOS CILINDROS	36
1.13.7. ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO INTERIOR	37
1.13.8. ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO EXTERIOR	38
1.13.9. DIMENSIONES DE LAS PLANCHAS DE METAL PARA LA TAPA HERMÉTICA	38
<b>CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</b>	<b>41</b>
2.1. CÁLCULOS DE DISEÑO	41
2.1.1. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	41
2.1.2. CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS	42
2.1.3. CÁLCULO DEL ESPESOR DE AISLANTE	44
2.2. CÁLCULOS DE CONSTRUCCIÓN	45
2.2.1. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO INTERIOR	45
2.2.2. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO EXTERIOR	45
2.2.3. CÁLCULO DEL ÁREA DE LA TAPA ENTRE LOS DOS CILINDROS	45
2.2.4. CÁLCULO DEL ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO INTERIOR	46
2.2.5. CÁLCULO DEL ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO EXTERIOR	46
2.2.6. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS PLANCHAS DE METAL PARA LA TAPA HERMÉTICA	46

<b>CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LA CALDERA</b>	<b>48</b>
3.1. MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS	48
3.2. DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES EMPLEADOS	48
3.3. DESPIECE	50
3.4. DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE SERVICIOS AUXILIARES	54
3.5. DISPOSICIÓN ADECUADA DE LA CALDERA EN EL LABORATORIO	55
<b>CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA CALDERA</b>	<b>56</b>
4.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA	56
4.2. ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA	56
4.3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	57
4.4. MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA	60
4.5. HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	61
<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO</b>	<b>62</b>
5.1. COSTO DE DISEÑO	62
5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN	62
5.3. COSTO DE ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	63
5.4. COSTO DE MATERIALES	63
5.5. OTROS COSTOS	64

5.6.	COSTO TOTAL	64
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		65
6.1.	CONCLUSIONES	65
6.2.	RECOMENDACIONES	66
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		67
<b>ANEXOS</b>		69
<b>FOTOS DEL EQUIPO</b>		81

## I. ANTECEDENTES

Desde el año 1983 en la Facultad de Ingeniería Química de la UNAP, se vienen desarrollando proyectos de tesis que involucran en su contenido, diseño, construcción e instalación de equipos; de acuerdo a la revisión bibliográfica efectuada, existen varios trabajos de tesis que involucran diseño y construcción de equipos, pero específicamente los trabajos similares al que se pretende realizar son:

(BARDALES et al, 2008) han realizado un trabajo de diseño, construcción e instalación de un equipo para la medición de la conductividad térmica de materiales sólidos. FIQ-UNAP. Iquitos- Perú.

(DÍAZ et al, 2007) han realizado un trabajo de diseño construcción e instalación de un evaporador de simple efecto. FIQ-UNAP. Iquitos- Perú.

(FERNANDEZ et al, 2007) han realizado un trabajo de diseño construcción e instalación de un equipo para la medición de la capacidad calórica de alimentos líquidos. FIQ-UNAP. Iquitos- Perú.

(CHOTA, 1994) ha realizado un trabajo de diseño, construcción e instalación de un equipo de agitación y filtración continua. FIQ-UNAP. Iquitos- Perú.

(RAMIREZ, 1984) ha realizado un trabajo de diseño construcción e instalación de un equipo de transporte de fluidos para el laboratorio de ingeniería química. UNAP. Iquitos-Perú.

## II. INTRODUCCIÓN

Unas de las formas de energía más utilizadas en el campo de la ingeniería química, es la energía térmica. Esta energía se obtiene por medio del vapor de agua realizando operaciones de transferencia de calor y masa, en la cual se deben considerar los balances de materia y energía. Dentro de los profesionales de la ingeniería, es quizás el ingeniero químico el más capacitado para diseñar equipos donde se realicen las operaciones mencionadas. (KERN, 2001; OCON et al, 1967; PERRY, 2001).

En el presente trabajo se plantea una revisión específica de la operación de transferencia de calor, de tal modo que la caldera que se pretende construir, sirva para la producción de vapor de agua, el cual podrá adaptarse a otros equipos como: concentrador de néctares, destilador por arrastre de vapor, etc.

Al diseñar y construir la **caldera para la generación de vapor de agua empleando energía eléctrica**, será necesario determinar el valor de los siguientes parámetros: potencia requerida de las resistencias eléctricas para producir un determinado flujo de vapor y espesor óptimo de aislante para evitar la mayor cantidad de pérdida de calor a través de las paredes de la caldera.

La operación que se llevará a cabo en dicha caldera, consistirá de dos etapas. En la primera etapa se realizará un calentamiento del agua, hasta que esta llegue a su temperatura de ebullición, esta etapa es conocida como transitoria porque la temperatura del agua varía con el tiempo

La segunda etapa es la de evaporación del agua. Esta etapa es conocida como estable, es decir cuando el agua empieza a evaporarse, la temperatura permanece constante.

### **III. OBJETIVOS**

#### **A. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, construir e instalar una caldera para la generación de vapor de agua empleando energía eléctrica

#### **B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar parámetros de diseño de la caldera
- Seleccionar el material adecuado para la construcción de la caldera
- Construir la caldera e instalarla
- Determinar parámetros de operación

#### IV. JUSTIFICACIÓN

La falta de existencia de equipos en el laboratorio de operaciones y de procesos unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, donde el alumno pueda aplicar sus conocimientos de transferencia de calor y balance de energía, justifica el presente trabajo en el que se plantea **el diseño, construcción e instalación de una caldera para la generación de vapor de agua empleando energía eléctrica**

Esta caldera brindará la facilidad de realizar en forma segura operaciones como concentración de néctares y destilación por arrastre de vapor, debido a que funcionará con energía eléctrica y no habrá peligro de que pueda haber una explosión.

Por poseer resistencias eléctricas esta caldera proporcionará un flujo de energía térmica constante y medible porque estará en función del voltaje y amperaje al que trabajaran las resistencias eléctricas; esto haría que las operaciones que se deseen realizar utilizando el vapor producido, se lleven acabo en régimen permanente.

Se plantea por lo tanto como uno de los mecanismos más viables para la implementación del laboratorio de operaciones y de procesos unitarios de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, con el fin de que los docentes y alumnos de la mencionada facultad puedan realizar eficientemente prácticas de los cursos de ingeniería, afianzando de esta manera sus conocimientos teóricos.



## **CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.**

### **1.1. FUNDAMENTOS DE LOS BALANCES DE MASA.**

La naturaleza impone ciertas restricciones que deben tomarse en cuenta cuando se diseña un nuevo proceso o durante el análisis de uno ya existente. Resulta imposible, por ejemplo especificar una entrada de 5000 kilogramos de jugo de caña a un evaporador y una salida de 20000 kilogramos de la misma cantidad

La base de esta observación radica en la ley de la conservación de la masa, la cual establece que la masa no puede crearse ni destruirse. Para entender mejor esto es necesario tener en cuenta los aspectos que se explican en las secciones 1.1.1 y 1.1.2

#### **1.1.1. CLASIFICACIÓN DE PROCESOS.**

Según (FELDER et al, 1981) los procesos químicos pueden clasificarse como intermitentes o de lote (batch), continuos o semi-intermitentes (semibatch) y ya sea como en régimen permanente o en régimen transitorio. Antes de formular un balance de masa sobre un sistema de proceso, debe de conocerse en cuál de estas categorías se clasifica el proceso.

- a) **Proceso intermitente:** Se carga la alimentación a un sistema al inicio del proceso, eliminándose los productos de una sola vez algún tiempo después. La masa no atraviesa los límites del sistema entre el momento de alimentación y el momento de vaciado del producto.
- b) **Proceso continuo:** Las entradas y salidas fluyen continuamente durante toda la duración del proceso.

c) **Proceso semi-intermitente** : Las entradas son casi instantáneas, mientras que las salidas son continuas o viceversa.

Si el valor de alguna de las variables de un proceso (temperatura, presión, volumen, flujos, etc.) no sufre modificaciones a lo largo del tiempo, a excepción de posibles pequeñas fluctuaciones alrededor de los valores medios constantes, se dice que el proceso se realiza en **régimen permanente**.

Si alguna de las variables de proceso cambia su valor con el tiempo, se dice que el proceso se realiza en **régimen transitorio**.

### 1.1.2. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MASA.

Supongamos que un componente tanto en la corriente de alimentación como de salida de una unidad de proceso continua, y que en un esfuerzo para determinar si la unidad está funcionando tal como se pensó al diseñarla, se miden los flujos máxicos de ese componente en ambas corrientes, hallándose que no son las mismas. Existen sólo cuatro explicaciones posibles para justificar la diferencia observada entre los flujos medidos.

1. La unidad pierde al componente por alguna parte
2. Se está consumiendo el componente como reactivo, ó se está generando como producto dentro de la unidad de proceso.
3. Se está acumulando el componente dentro de la unidad, posiblemente al absorberse sobre las paredes.
4. Las mediciones contienen errores.

Si las mediciones son correctas y no hay fugas, las otras posibilidades de generación o consumo en una reacción y acumulación dentro de la unidad de proceso son las únicas explicaciones posibles que justifican la diferencia entre los flujos de entrada y salida.

Se puede expresar un balance de un componente en un sistema en la siguiente forma general.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (1.1)$$

Esta ecuación general puede formularse para cualquier material que entra o abandona cualquier sistema de proceso: puede aplicarse a la masa total del contenido del sistema ó a cualquier especie atómica ó molecular involucrada en el proceso.

### 1.1.2.1. Balances diferenciales.

Supongamos que una especie  $A$  se encuentra involucrada en un proceso. Sean  $\hat{q}_{ent}$  y  $\hat{q}_{sal}$  los ritmos a los cuales  $A$  entra y abandona el proceso al cruzar sus fronteras y  $(\hat{r}_{gen}$  y  $\hat{r}_{con})$  los ritmos de generación y consumo de  $A$  dentro del sistema debido a una reacción química. Cualquiera o todas las variables mencionadas pueden variar con el tiempo.

Formulemos ahora un balance sobre  $A$  para un periodo de tiempo que abarca desde  $t$  hasta  $t + \Delta t$ , suponiendo que  $\Delta t$  es lo suficientemente pequeño como para que las cantidades  $\hat{q}_{ent}$ ,  $\hat{q}_{sal}$ ,  $\hat{r}_{gen}$  y  $\hat{r}_{con}$  puedan considerarse como constantes, dado que finalmente permitiremos que  $\Delta t$  se aproxime a cero. Los términos de un balance sobre  $A$  pueden calcularse fácilmente.

$$\text{Entrada} = \hat{q}_{ent} \Delta t$$

$$\text{Salida} = \hat{q}_{sal} \Delta t$$

$$\text{Generación} = \hat{r}_{gen} \Delta t$$

$$\text{Consumo} = \hat{r}_{con} \Delta t$$

También se supone que la masa de  $A$  en el sistema se modifica con el tiempo, por lo tanto la masa de  $A$  acumulada en el intervalo de tiempo que abarca desde  $t$  hasta  $t + \Delta t$  será:  $M_A(t + \Delta t) - M_A(t)$

Entonces, la ecuación de balance para  $A$  quedará:

$$M_A(t + \Delta t) - M_A(t) = \left( \hat{q}_{ent} + \hat{r}_{gen} - \hat{q}_{sal} - \hat{r}_{cons} \right) \Delta t$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_A(t + \Delta t) - M_A(t)}{\Delta t} = \hat{q}_{ent} + \hat{r}_{gen} - \hat{q}_{sal} - \hat{r}_{cons} = \frac{dM_A}{dt}$$

$$\frac{dM_A}{dt} = \hat{q}_{ent} + \hat{r}_{gen} - \hat{q}_{sal} - \hat{r}_{cons} \quad (1.2)$$

### 1.1.2.2. Balances integrales.

Reconsideremos la forma del balance diferencial dada en la ecuación (1.2). Esta ecuación puede reformularse como:

$dM_A = (\hat{q}_{ent} + \hat{r}_{gen} - \hat{q}_{sal} - \hat{r}_{cons}) dt$ , e integrarse a partir de un tiempo inicial  $t_0$  a un tiempo posterior  $t_f$ , para obtener:

$$\int_{M_{inicial}}^{M_{final}} dM = \int_{t_0}^{t_f} (\hat{q}_{ent} + \hat{r}_{gen} - \hat{q}_{sal} - \hat{r}_{cons}) dt \quad (1.3)$$

Con esta ecuación, se puede calcular la masa del componente  $A$  dentro del sistema de proceso, para cualquier tiempo.

## 1.2. ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA.

Un sistema se conoce como abierto o cerrado según haya o no haya masa que atraviese los límites del sistema durante el periodo de tiempo que cubre el balance de energía. (FELDER et al, 1981).

Un sistema intermitente resulta, por definición, cerrado, mientras que los sistemas continuos o semicontinuos son abiertos. 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.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} \quad (1.4)$$

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 como calor o trabajo, de manera que los términos de la derecha de la igualdad en la ecuación (1.4) no pueden eliminarse automáticamente, tal como sucede con los balances de masa. Sin embargo, 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 (1.4) puede expresarse como:

$$\begin{aligned} \text{Energía final} - \text{Energía inicial} &= \text{Energía neta} \\ \text{del sistema} \quad \text{del sistema} \quad &\text{Transferida al sistema} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Ahora:

$$\text{Energía inicial del sistema} = U_{i \text{ sist}} + E_{k i \text{ sist}} + E_{p i \text{ sist}}$$

$$\text{Energía final del sistema} = U_{f \text{ sist}} + E_{k f \text{ sist}} + E_{p f \text{ sist}}$$

$$\text{Energía neta transferida} = Q + W$$

Donde los subíndices *i* y *f* se refieren a los estados inicial final del sistema y  $U_{\text{sist}}$ ,  $E_{k \text{ sist}}$ ,  $E_{p \text{ sist}}$ ,  $W$ ,  $Q$  representan la energía interna, energía cinética, energía potencial, trabajo (efectuado sobre el sistema – efectuado por el sistema) y calor (transferido al sistema – disipado por el sistema).

La ecuación (1.5) queda:

$$(U_{f \text{ sist}} - U_{i \text{ sist}}) + (E_{k f \text{ sist}} - E_{k i \text{ sist}}) + (E_{p f \text{ sist}} - E_{p i \text{ sist}}) = Q + W \quad (1.6)$$

Como puede darse cuenta la ecuación (1.6) 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 y temperatura de los materiales del sistema: por lo tanto, sino se producen cambios en la temperatura y si todos los materiales del proceso son todos ya sea sólidos, líquidos o gases ideales, 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  $Q = 0$ . El sistema se denomina adiabático.
3. El trabajo por sobre un sistema cerrado se lleva a cabo por movimiento de límite del sistema contra una fuerza opuesta, o por la generación de una corriente eléctrica o radiante que atraviese los límites del sistema (ejemplos del primer tipo de trabajo son el movimiento de un pistón o la rotación de un eje que atraviesa los límites del sistema).

Se tiene en cuenta la ecuación (1.6) 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.

$$\begin{aligned} & (U_{sist}(t + \Delta t) - U_{sist}(t)) + (E_{k\ sist}(t + \Delta t) - E_{k\ sist}(t)) \\ & + (E_{p\ sist}(t + \Delta t) - E_{p\ sist}(t)) = \hat{Q} \Delta t + \hat{W} \Delta t \end{aligned}$$

**Donde:**

$$\hat{Q} = \frac{dQ}{dt} : \text{Flujo ó rapidez del calor (watts)}$$

$$\hat{W} = \frac{dW}{dt} : \text{Rapidez de realizar trabajo (watts)}$$

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

$$\frac{dU_{sist}}{dt} + \frac{dE_{k\ sist}}{dt} + \frac{dE_{p\ sist}}{dt} = \hat{Q} + \hat{W} \quad (1.7)$$

Para un sistema donde existen corrientes de entradas y salidas (**sistema abierto**), la ecuación general de energía durante un pequeño intervalo de tiempo, desde  $t$  hasta  $t + \Delta t$ , tiempo durante el cual las propiedades de las corrientes de entrada y salida permanecen aproximadamente constantes. Los términos de la ecuación son los siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Acumulación} &= E_{sist}(t + \Delta t) - E_{sist}(t) \\ &= U_{sist}(t + \Delta t) - U_{sist}(t) + E_{k\ sist}(t + \Delta t) \\ &\quad - E_{k\ sist}(t) + E_{p\ sist}(t + \Delta t) - E_{p\ sist}(t) \end{aligned}$$

$$\text{Entrada} = \hat{m}_{ent} \left( H_{ent} + \frac{v_{ent}^2}{2} + gZ_{ent} \right) \Delta t + \hat{Q} \Delta t + \hat{W} \Delta t$$

$$\text{Salida} = \hat{m}_{sal} \left( H_{sal} + \frac{v_{sal}^2}{2} + gZ_{sal} \right) \Delta t$$

Donde las cantidades  $\hat{m}_{ent}$  y  $\hat{m}_{sal}$  son los ritmos máxicos de entrada y salida, respectivamente. Las cantidades entre paréntesis son las entalpías específicas, energías cinéticas y potenciales de las corrientes de entrada y salida al sistema, mientras que  $\hat{Q}$  y  $\hat{W}$  son los ritmos de transferencia de calor y de trabajo. Cualquiera o todas las variables pueden variar con el tiempo.

Si ahora se sustituye las expresiones dadas para la acumulación, entrada y salida en la ecuación general de balance de energía, dividiendo todo entre  $\Delta t$  y aplicando límite para cuando  $\Delta t \rightarrow 0$ .

$$\frac{dU_{sist}}{dt} + \frac{dE_{k\ sist}}{dt} + \frac{dE_{psist}}{dt} = \hat{m}_{ent} \left( H_{ent} + \frac{v_{ent}^2}{2} + gZ_{ent} \right) + \hat{Q} + \hat{W} - \hat{m}_{sal} \left( H_{sal} + \frac{v_{sal}^2}{2} + gZ_{sal} \right) \quad (1.8)$$

### 1.3. TEORIAS DEL CALOR.

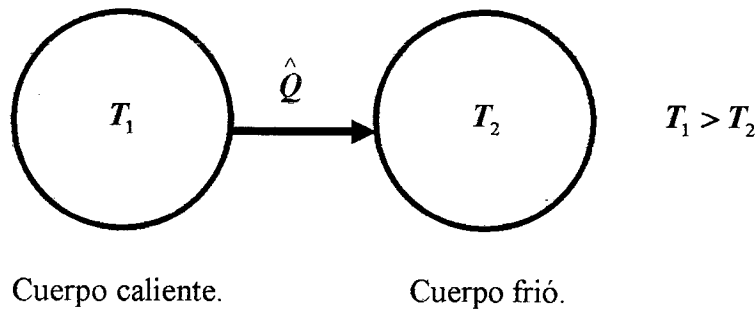
La ciencia de transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados también fuente y receptor.

Entonces, siempre que exista un gradiente de temperatura en un sistema ó al poner en contacto dos sistemas que se encuentran a diferentes temperaturas, se transfiere calor.

El proceso por el cual tiene lugar el transporte de energía se conoce como **transferencia de calor** y **la energía en tránsito se denomina calor**. (DIAZ, 2000)

Por ejemplo, en la figura 1.1 el cuerpo caliente que está a la temperatura  $T_1$ , transfiere calor al cuerpo frío que está a la temperatura  $T_2$ . En conclusión, se puede decir que el calor es una forma de energía, que se transfiere del cuerpo de mayor temperatura (cuerpo caliente) al cuerpo de menor temperatura (cuerpo frío).





**Figura 1.1.** El calor fluye del cuerpo caliente al cuerpo frío

Fuente: (DIAZ, 2000)

#### 1.4. MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor puede verificarse por medio de los tres mecanismos de transferencia: conducción, convección y radiación.

1. **Conducción.** La conducción es un proceso mediante el cual el calor fluye desde una región de alta temperatura a otra de menor temperatura a través de un medio (sólido, líquido ó gaseoso) ó entre medios diferentes en contacto físico directo.

En el flujo de calor por conducción, la energía se transfiere por comunicación molecular directa, sin el desplazamiento apreciable de moléculas.

Para un elemento de materia, mientras más rápido se mueven sus moléculas, mayor será su temperatura y por ende su energía interna. Ahora cuando las moléculas de una región adquieren energía cinética media mayor que las de las moléculas de una región adyacente, lo que se manifiesta por una diferencia de temperaturas, las moléculas que poseen mayor energía transmitirán parte de ella a las moléculas de la región de más baja temperatura.

En los líquidos y gases la transferencia de energía se realiza por choques elásticos. En los sólidos, como metales la transferencia es por difusión de electrones rápidos desde la región de alta temperatura a la región de baja temperatura.

La relación de transferencia de calor por conducción fue establecida por el Francés **Joseph Fourier en 1822**. Quien la aplicó en su **teoría analítica de calor**, esta ley establece que la transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección de flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección.

$$\hat{Q} = -k(T)A \frac{dT}{dx} \quad (1.9)$$

Siendo:

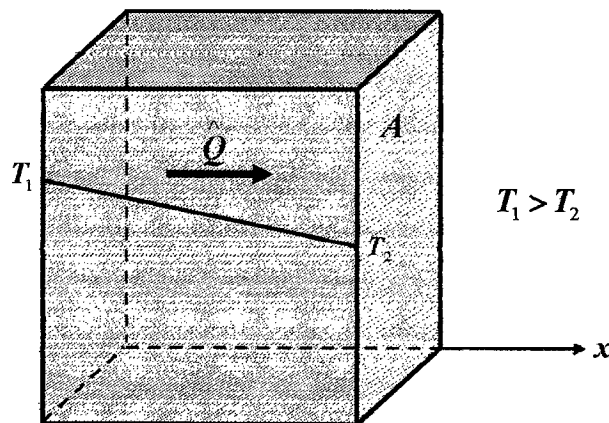
$k(T)$ : Conductividad térmica del material (depende del material y de la temperatura). (W/ m°C)

$A$  : Área de la sección a través de la cual fluye el calor por conducción (debe ser medido perpendicularmente a dirección del flujo de calor). (m<sup>2</sup>)

$\frac{dT}{dx}$  : Gradiente de temperatura en la dirección  $x$ . (°C/m)

Los materiales que tienen una alta conductividad térmica se denominan **conductores**, mientras que los materiales de baja conductividad térmica se conocen como **aisladores**.

En la mayoría de los casos, los materiales que se utilizan en ingeniería, su conductividad varía con la temperatura, pero si la variación es pequeña, en problemas prácticos se considera constante.



**Figura 1.2.** Flujo de calor en la dirección  $x$

Fuente: (Elaboración propia)

En muchos sistemas que involucran flujo, tal como flujo de calor, flujo de fluido o flujo de electricidad, se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional al potencial e inversamente proporcional a la resistencia que se aplica al sistema, o flujo  $\propto \frac{\text{potencial}}{\text{resistencia}}$ . (KERN, 2001).

En un circuito hidráulico simple, la presión en el sistema es la diferencia de potencial, y la rugosidad de la tubería es la resistencia al flujo. En un circuito eléctrico las aplicaciones más simples son expresadas en la ley de OHM: el voltaje en el circuito es el potencial y la dificultad con la que los electrones emigran por el alambre, es la resistencia. En el flujo de calor a través de una pared, el flujo se lleva a efecto por la diferencia de temperatura entre las superficies calientes y frías, en este caso la temperatura es el potencial y la conductancia es la recíproca de la resistencia al flujo de calor.

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. Además, con frecuencia incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido.

La forma de clasificar la convección, de acuerdo al movimiento del fluido, resulta en:

Convección natural o libre. Cuando existe un movimiento de fluido como resultado de diferencia de densidades debido a la variación de temperatura.

Convección forzada. Cuando el movimiento es producido por algún agente externo, tal como una bomba hidráulica, agitador, ventilador, etc.

Imagine ahora, una tubería que contiene un líquido caliente. La rapidez de transferencia de calor por convección del líquido caliente a la pared interior del tubo puede evaluarse de la forma siguiente:

$$\hat{Q} = hA(T_L - T_S) \quad (1.10)$$

Donde  $\hat{Q}$  es la rapidez de transferencia de calor en Watts (W),  $A$  es el área de corte transversal normal a la dirección del flujo de calor en  $m^2$ ,  $h$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor en  $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_L$  es la temperatura del líquido caliente en  $^\circ\text{C}$  y  $T_S$  es la temperatura de la superficie interior del tubo en  $^\circ\text{C}$ .

Cuando el fluido que rodea la superficie de un sólido tiene un movimiento convectivo natural o forzado, la velocidad de transferencia de calor del sólido al fluido (o viceversa) es directamente proporcional al coeficiente convectivo de transferencia de calor. Esto indica que el coeficiente convectivo es inversamente proporcional a la resistencia al flujo de calor.

La nomenclatura del coeficiente convectivo de transferencia de calor es ( $h$ ) y sus unidades son:  $\frac{W}{m^2\text{ }^\circ\text{C}}$ ,  $\frac{W}{m^2\text{ K}}$ ,  $\frac{Btu}{h\text{ pie}^2\text{ }^\circ\text{F}}$ , etc.

Cabe aclarar que la conductividad térmica aparecerá en la ecuación de transferencia de calor, cuando la transferencia de calor se da entre sólidos. Para el caso del coeficiente convectivo de transferencia de calor, este aparecerá cuando la transferencia de calor se da, de un sólido hacia un fluido ó viceversa.

La evaluación del coeficiente de transferencia de calor por convección es difícil debido a que la convección es una función complicada del flujo de fluidos, de las propiedades térmicas del fluido y a si mismo depende de la geometría del sistema. Su valor numérico no es uniforme sino depende del lugar donde se mida la temperatura del fluido.

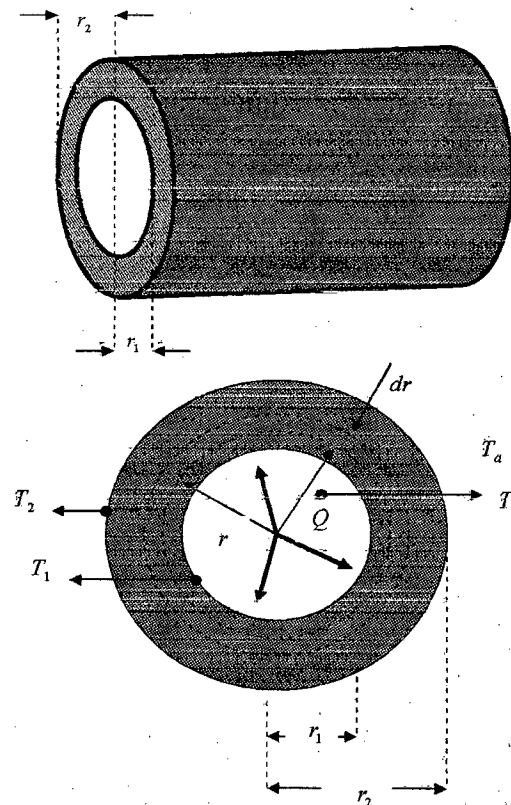
- 3. Radiación.** La radiación difiere de la conducción y la convección en cuanto a que no se requiere un medio físico para la transferencia. La radiación es la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas, de manera similar a las ondas electromagnéticas que propagan

y transfieren la luz. (BARDALES et al, 2008). La transferencia radiante de calor se rige por las mismas leyes que dictan el comportamiento de la transferencia de luz. Los sólidos y los líquidos tienden a absorber la radiación que está siendo transferida a través de ellos, por lo que la radiación es más importante a través del espacio o de gases. El ejemplo más ilustrativo es el transporte de calor del Sol a la tierra. (BARDALES et al, 2008).

**En el presente trabajo no se considera la transferencia de calor por radiación.**

### 1.5. LEY DE FOURIER PARA UN CILINDRO HUECO.

Refiriéndonos a la figura 1.3 que muestra un tubo de longitud  $L$ , el área de la trayectoria del flujo de calor a través de la pared del tubo aumenta con la distancia de la trayectoria desde  $r_1$  a  $r_2$  (dirección radial).



**Figura 1.3.** Flujo de calor a través de cilindro hueco

Fuente: (KERN, 2001).

El área a cualquier radio es dada por  $2\pi rL$ , y si el calor fluye hacia fuera del cilindro el gradiente de temperatura para el incremento de longitud  $dr$  es:  $\frac{dT}{dr}$

$$\hat{Q} = -2\pi rkL \frac{dT}{dr} \Rightarrow \hat{Q} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi kL \int_{T_1}^{T_2} dT \Rightarrow \hat{Q} \text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right) = -2\pi k L(T_2 - T_1)$$

$$\hat{Q} = \frac{-2\pi k L(T_2 - T_1)}{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} = \frac{2\pi k L(T_1 - T_2)}{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (1.11)$$

#### 1.6. COMBINACIÓN DE CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN A TRAVÉS DE CILÍNDROS CONCENTRICOS.

El flujo de calor a través de tubos concéntricos de diferentes conductividades térmicas tiene gran aplicación en la mayoría de las instalaciones industriales.

En la figura 1.4, se tiene dos cilindros concéntricos, dentro de la cual fluye un fluido caliente cuyo exterior se encuentra expuesto al medio ambiente. La longitud de los cilindros es  $L$  y se considera que el flujo de calor es radial.

**Del líquido interior a la superficie interior del cilindro interior** se da la transferencia de calor por convección, lo cual se puede evaluar de la siguiente manera:

$$\hat{Q} = 2h_i \pi r_1 L(T_i - T_1) \quad (1.12)$$

Donde:  $h_i$  es el coeficiente de convección del fluido interior,  $T_i$  es la temperatura del fluido interior y  $T_1$  la temperatura de la superficie interior del cilindro interior

**De la superficie interior a la superficie exterior del cilindro interior** la transferencia de calor se da por conducción, lo cual se puede evaluar mediante la ecuación (1.11)

Para esto tenemos en cuenta la ley de Fourier

$$\hat{Q} = \frac{2\pi k_1 L}{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (T_1 - T_2) \quad (1.13)$$

Donde:  $k_1$  es la conductividad térmica del material del cual esta hecho el cilindro interior.  $T_2$ : Temperatura de la superficie exterior del cilindro interior

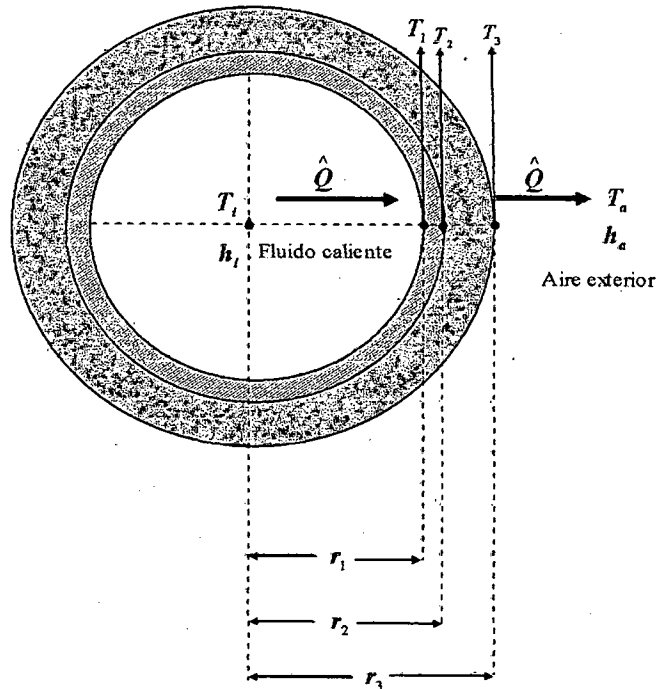
**De la superficie exterior del cilindro interior (superficie interior del cilindro exterior) a la superficie exterior del cilindro exterior,** la transferencia de calor se da por conducción, lo cual se puede evaluar mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{Q} = \frac{2\pi k_2 L}{\text{Ln}\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} (T_2 - T_3) \quad (1.14)$$

Se supone que el fluido que rodea exteriormente al tubo es aire, por lo tanto la transferencia de calor de la **superficie exterior del cilindro exterior al aire** será:

$$\hat{Q} = 2h_a \pi r_3 L (T_3 - T_a) \quad (1.15)$$

$h_a$ : Coeficiente de convección del aire



**Figura 1.4.** Combinación de conducción y convección a través de cilindros concéntricos

Fuente: (Elaboración propia)

Relacionando las ecuaciones (1.12), (1.13), (1.14) y (1.15) se tendrá:

$$\hat{Q} \left[ \frac{1}{2h_i \pi r_1 L} + \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi k_1 L} + \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_3}{r_2} \right)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{2h_a \pi r_3 L} \right] \equiv T_i - T_a$$

$$\hat{Q} = \frac{T_i - T_a}{\left[ \frac{1}{2h_i \pi r_1 L} + \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi k_1 L} + \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_3}{r_2} \right)}{2\pi k_2 L} + \frac{1}{2h_a \pi r_3 L} \right]} \quad (1.16)$$



### 1.6.1. RESISTENCIAS TÉRMICAS.

Los términos:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi h_i r_1 L}, \quad R_2 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_1 L}, \quad R_3 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_2 L} \quad \text{y} \quad R_4 = \frac{1}{2\pi h_a r_3 L}, \quad \text{se}$$

denominan resistencias térmicas, cada medio ofrece una resistencia térmica al flujo de calor:

$$\sum R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (1.17)$$

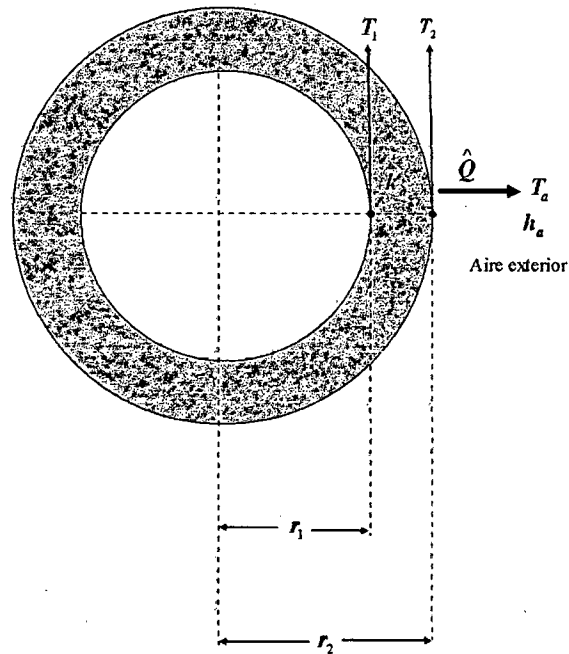
Por lo tanto el circuito térmico para la figura 1.4 es análogo a un circuito eléctrico en serie, de manera que la resistencia equivalente es igual a la sumatoria de todas las resistencias, el flujo de calor es análogo a la intensidad de corriente y la temperatura al potencial.

Si se usa la ecuación (1.17) en la ecuación (1.16), se tendrá:

$$\hat{Q} = \frac{T_i - T_a}{\sum R} \quad (1.18)$$

### 1.7. GROSOR CRÍTICO DEL AISLANTE PARA UN CILINDRO.

En la figura 1.5 se instala una capa de aislante en torno a un cilindro cuyo radio  $r_1$  es fijo y tiene una longitud  $L$ . La superficie interior de la capa de aislante está a la temperatura  $T_1$  en el punto  $r_1$  y la exterior a  $T_2$  en el punto  $r_2$ . Un ejemplo de este tipo es una tubería de metal con vapor saturado adentro. La superficie exterior del aislante en  $T_2$  está expuesta a un ambiente a  $T_a$  donde ocurre una transferencia de calor por convección. No es evidente que al añadir más aislante con una conductividad térmica  $k_a$  disminuya la transferencia de calor.



**Figura 1.5.** Grosor crítico del aislante para un cilindro.

Fuente: (KERN, 2001)

Teniendo en cuenta la ecuación (1.16), la rapidez de transferencia de calor a través del cilindro se muestra en la ecuación (1.19).

Para determinar el efecto del grosor del aislante sobre  $\hat{Q}$ , se evalúa la derivada de  $\hat{Q}$  con respecto a  $r_2$ , se iguala este resultado a cero y se obtiene lo siguiente para el flujo de calor máximo.

$$\hat{Q} = \frac{T_1 - T_a}{\left[ \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi L k_a} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_a} \right]} \quad (1.19)$$

$$\frac{dQ}{dr_2} = \frac{-(T_1 - T_a) \left( \frac{1}{2\pi L k_a r_2} - \frac{1}{2\pi h_a L r_2^2} \right)}{\left[ \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi L k_a} + \frac{1}{2\pi r_2 L h_a} \right]^2} = 0 \Rightarrow k_a (r_2)_{cr} = h_a (r_2)_{cr}^2$$

$$(r_2)_{cr} = \frac{k_a}{h_a} \quad (1.20)$$

Donde  $(r_2)_{cr}$  es el valor del radio crítico cuando la rapidez de transferencia de calor es máxima. Por consiguiente, si el radio exterior  $r_2$  es menor que el valor crítico, al agregar más aislante aumentará la rapidez de transferencia de calor.

Del mismo modo, si el radio exterior es mayor que el crítico, al agregar más aislante disminuirá la rapidez de transferencia de calor.

En conclusión, si se quisiera disminuir la rapidez de transferencia de calor, se debe tener en cuenta que el radio exterior sea mayor que el radio crítico.

## 1.8. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE LA CALDERA.

El diseño de la caldera para el presente trabajo, se muestra en la figura 1.6. Para diseñar este equipo, es importante saber los procesos que se llevarán a cabo en ella.

**Proceso intermitente y transitorio.** Primeramente se cargará la caldera con una determinada cantidad de agua y se realizará el calentamiento desde una temperatura que es aproximadamente la atmosférica (25° C a 30°), hasta que llegue a la temperatura de ebullición (100°C).

No habrá masa que atraviese los límites del sistema, es decir, no existirán corrientes de entrada y salida, además la masa de agua dentro de la caldera será

constante, pero la temperatura variará con el tiempo. En este proceso sólo se dará la transferencia de calor sensible.

Como se puede observar en la figura 1.6, la caldera poseerá dos resistencias eléctricas. Estas resistencias disiparán calor.

Una parte de este calor , será aprovechado por el agua para aumentar su energía interna y otra parte se disipará a través de las paredes de la caldera.

La estructura principal de la caldera estará compuesta por dos cilindros concéntricos y una tapa hermética.

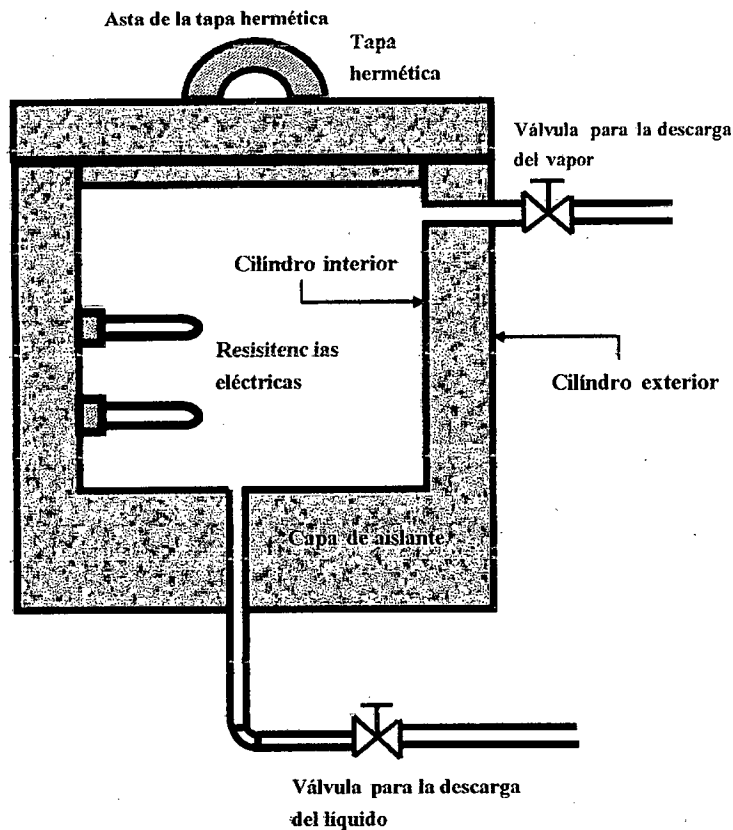
Tanto el espacio entre los cilindros y el interior de la tapa hermética, estarán cubiertos con un aislante térmico (lana de vidrio).

Esto con el fin, de que el calor que se disipe a través de las paredes de la caldera sea mínimo.

**Proceso semi – intermitente.** Cuando el agua dentro de la caldera llegue a su temperatura de ebullición, se empezará a producir vapor de agua, el cual fluirá a través de la válvula que se encuentra en la parte superior de la caldera (corriente de salida).

En este proceso, una parte del calor que disiparán las resistencias eléctricas será transferido al agua como calor latente de vaporización y otra parte se perderá a través de las paredes de la caldera.

La temperatura de vaporización del agua será constante, pero la masa de agua dentro de la caldera empezará a disminuir.



**Figura 1.6.** Diseño de la caldera.

Fuente: (Elaboración propia)

Al terminar los dos procesos, se esperará que el agua que quede en la caldera disminuya su temperatura, para ser drenada a través de la válvula que se encuentra en la parte inferior de la caldera.

### **1.9. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MASA A LA CALDERA.**

El balance de masa en la caldera, se hace en los dos procesos antes mencionados y se tiene en cuenta la ecuación (1.2)

### 1.9.1. BALANCE DE MASA EN EL PROCESO INTERMITENTE

Se sabe por lo mencionado anteriormente, que, la masa de agua en la caldera permanece constante e invariante en el tiempo. Es decir en todo este proceso

$$M = M_0. \text{ (Ver figura 1.10).}$$

### 1.9.2. BALANCE DE MASA EN EL PROCESO SEMI- INTERMITENTE

En este proceso sólo existe una corriente de salida, los términos de generación y consumo son cero, esto es debido a que no se produce ninguna reacción química

$$\text{Entrada} = \hat{q}_{ent} \Delta t = 0$$

$$\text{Salida} = \hat{q}_{sal} \Delta t = \hat{m} \Delta t$$

$$\text{Generación} = \hat{r}_{gen} \Delta t \equiv 0$$

$$\text{Consumo} = \hat{r}_{con} \Delta t = 0$$

$$\hat{m} = \frac{dm}{dt} : \text{Flujo másico del vapor que sale de la caldera. (Kg /s)}$$

Ahora, haciendo uso de la ecuación (1.2)

$$\frac{dM}{dt} = -\hat{m} \Rightarrow \int_{M_0}^M dM = -\hat{m} \int_{t_1}^t dt \Rightarrow M - M_0 = -\hat{m}(t - t_1)$$

$$M = M_0 - \hat{m}(t - t_1) \tag{1.21}$$

Con la ecuación (1.21), se puede evaluar la masa de agua dentro la caldera en cualquier tiempo.

## 1.10. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA Y LOS MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR A LA CALDERA.

Para aplicar la ecuación general de energía a la caldera, se debe conocer las formas de energía que intervienen en cada proceso. El balance de energía se realizará haciendo uso de las ecuaciones (1.7) y (1.8), es decir en función de los flujos de energía

### 1.10.1. BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO INTERMITENTE.

Como se mencionó en la sección 1.8, en este proceso no existirán corrientes de entrada y salida. Las formas de energías que intervienen son:

El calor que disipan las resistencias eléctricas

La energía interna del agua que está dentro de la caldera

El calor disipado a través de las paredes de la caldera

La Potencia eléctrica ó rapidez con la cual las resistencias eléctricas disipan el calor, se denota como:  $P_R$  (Watts).

La rapidez con la cual varia la energía interna se denota como:  $M_0 C_p \frac{dT}{dt}$

Donde:

$M_0$ : Masa de agua en todo el proceso intermitente. (Kg)

$C_p$ : Capacidad calórica del agua. (J/ Kg °C)

$\frac{dT}{dt}$ : Razón de cambio de la temperatura con respecto al tiempo. (°C/s).

La rapidez con la cual el calor se disipa a través de las paredes de la caldera, se denota como:  $\hat{Q}$

Haciendo uso de la ecuación (1.7), se tendrá:

$$P_R = M_0 C_P \frac{dT}{dt} + \hat{Q} \quad (1.22)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (1.18),  $\hat{Q}$  estará en función de la temperatura del agua y de las resistencias térmicas de la caldera. Es decir:  $\hat{Q} = \frac{T - T_a}{\sum R}$

$T_a$ : Temperatura del aire exterior. (°C)

Reemplazando  $\hat{Q} = \frac{T - T_a}{\sum R}$  en (1.22)

$$P_R = M_0 C_P \frac{dT}{dt} + \frac{T - T_a}{\sum R}$$

Se considera a  $T$  la única variable que varía con el tiempo.

$$\Rightarrow P_R - \frac{T - T_a}{\sum R} = M_0 C_P \frac{dT}{dt}$$

$$\Rightarrow \int_0^{t_1} dt = M_0 C_P \int_{T_i}^{T_f} \frac{dT}{P_R - \frac{T - T_a}{\sum R}} = -M_0 C_P \sum R \int_{T_i}^{T_f} \frac{d \left[ P_R - \frac{T - T_a}{\sum R} \right]}{P_R - \frac{T - T_a}{\sum R}}$$

$$\Rightarrow t_1 = -M_0 C_P \sum R \operatorname{Ln} \left[ \frac{P_R - \frac{T_f - T_a}{\sum R}}{P_R - \frac{T_i - T_a}{\sum R}} \right] = M_0 C_P \sum R \operatorname{Ln} \left[ \frac{P_R - \frac{T_i - T_a}{\sum R}}{P_R - \frac{T_f - T_a}{\sum R}} \right] \quad (1.23)$$

Despejando  $T_f$  de la ecuación (1.23)



$$T_f = T_a + \sum R \left[ P_R - e^{-\frac{t_1}{C_p M_0 \sum R}} \left( P_R - \frac{T_i - T_a}{\sum R} \right) \right] \quad (1.24)$$

En forma general la ecuación (1.24), se puede expresar:

$$T = T_a + \sum R \left[ P_R - e^{-\frac{t}{C_p M_0 \sum R}} \left( P_R - \frac{T_i - T_a}{\sum R} \right) \right] \quad (1.25)$$

Tener en cuenta que:

$T \rightarrow T_f$ . Entonces  $t \rightarrow t_1$

$T \rightarrow T_i$ . Entonces  $t \rightarrow 0$

$T_i$ : Temperatura inicial del agua en la caldera. (°C)

$T_f$ : Temperatura final del agua en la caldera (temperatura de ebullición). (°C)

### 1.10.2. BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO SEMI- INTERMITENTE

En este proceso existe una corriente de salida, se hace uso de la ecuación (1.8).

Las formas de energías que intervienen son:

El calor que disipan las resistencias eléctricas

El calor latente del vapor

El calor disipado a través de las paredes de la caldera.

La rapidez con la cual las resistencias eléctricas disipan calor, es:  $P_R$

La rapidez con la cual el calor se disipa a través de las paredes de la caldera, es:

$$\hat{Q} \equiv \frac{T_f - T_a}{\sum R}$$

El flujo del calor latente del vapor, es:  $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} \frac{dm}{dt}$

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$  : Entalpía de vaporización para el agua. (J/ Kg)

$\frac{dm}{dt}$  : Flujo másico del vapor que sale de la caldera. (Kg /s)

$m$  : Masa del vapor que sale de la caldera. (Kg)

La ecuación de balance de energía será:

$$P_R = \frac{T_f - T_a}{\sum R} + \lambda_{\text{H}_2\text{O}} \frac{dm}{dt} \quad (1.26)$$

Integrando la ecuación (1.26)

$$P_R - \frac{T_f - T_a}{\sum R} = \lambda_{\text{H}_2\text{O}} \frac{dm}{dt} \Rightarrow \frac{P_R - \frac{T_f - T_a}{\sum R}}{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}} \int_{t_1}^t dt = \int_0^m dm$$
$$\Rightarrow m = \frac{\left( P_R - \frac{T_f - T_a}{\sum R} \right) (t - t_1)}{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1.27)$$

### 1.10.3. MECANISMOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CALDERA

Como se mencionó en la sección 1.8, la estructura principal de la caldera estará compuesta por dos cilindros concéntricos.

En la figura 1.7, los cilindros concéntricos y el espacio que cubre el aislante se representan por capas y cada capa tiene una superficie interior y exterior.

La transferencia de calor del líquido interior a la superficie interior de la primera capa, es por convección

$$\hat{Q} = 2\pi r_1 L h_0 (T - T_1) \quad (1.28)$$

$h_0$ : Coeficiente convectivo para el líquido interior

La transferencia de calor de la superficie interior a la superficie exterior de la primera capa, es por conducción.

$$\hat{Q} = \frac{2\pi L k_1}{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} (T_1 - T_2) \quad (1.29)$$

$k_1$ : Conductividad térmica de la primera capa

De igual manera la transferencia de calor de la superficie interior a la superficie exterior de la segunda capa (capa de aislante), es por conducción.

$$\hat{Q} = \frac{2\pi L k_2}{\text{Ln} \left( \frac{r_3}{r_2} \right)} (T_2 - T_3) \quad (1.30)$$

$k_2$ : Conductividad térmica del aislante

La transferencia de calor de la superficie interior a la superficie exterior de la tercera capa, es por conducción.

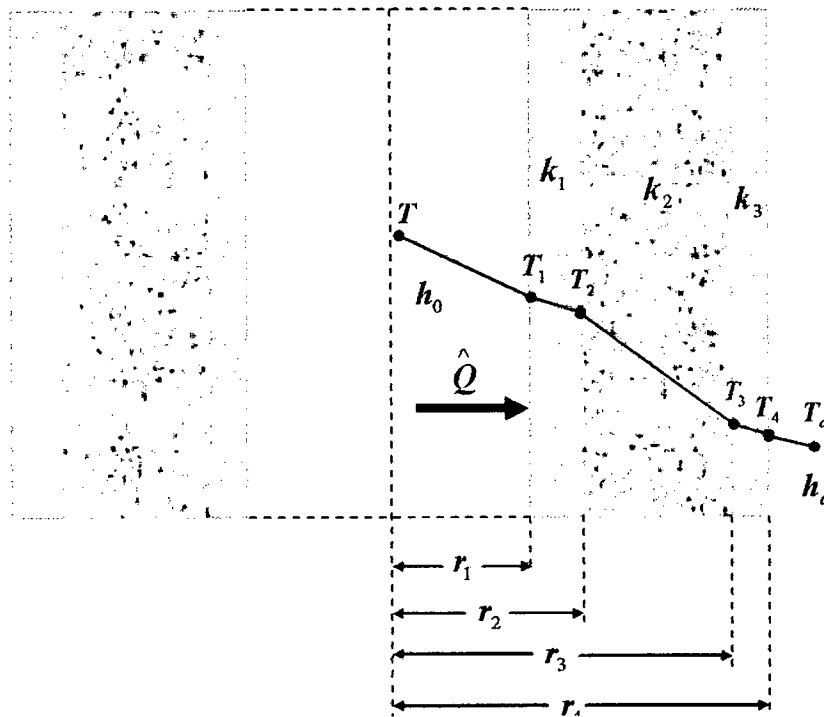
$$\hat{Q} = \frac{2\pi L k_3}{\text{Ln} \left( \frac{r_4}{r_3} \right)} (T_3 - T_4) \quad (1.31)$$

$k_3$ : Conductividad térmica de la tercera capa

La transferencia de calor de la superficie exterior de la tercera capa, al aire exterior, es por convección.

$$\hat{Q} = 2\pi r_4 L h_a (T_4 - T_a) \quad (1.32)$$

$h_a$  : Coeficiente convectivo para el aire exterior



**Figura 1.7.** Capas de la caldera

Fuente: (Elaboración propia)

Relacionando las ecuaciones (1.28), (1.29), (1.30), (1.31) y (1.32)

$$\hat{Q} = \frac{T - T_a}{\left[ \frac{1}{2\pi h_0 L r_1} + \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi L k_1} + \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_3}{r_2} \right)}{2\pi L k_2} + \frac{\text{Ln} \left( \frac{r_4}{r_3} \right)}{2\pi L k_3} + \frac{1}{2\pi h_a L r_4} \right]} \quad (1.33)$$

#### 1.10.4. RESISTENCIAS TÉRMICAS PARA LA CALDERA

Aplicando el mismo criterio que en la sección 1.6.1, las resistencias térmicas para la caldera serán:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi h_0 r_1 L} \text{ . Líquido interior}$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} \text{ . Primera capa (cilindro interior)}$$

$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2} \text{ . Segunda capa (capa de aislante)}$$

$$R_4 = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L k_3} \text{ . Tercera capa (cilindro exterior)}$$

$$R_5 = \frac{1}{2\pi h_a r_4 L} \text{ . Aire exterior}$$

$$\sum R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \quad (1.34)$$

Reemplazando (1.34) en (1.33)

$$\hat{Q} = \frac{T - T_a}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = \frac{T - T_a}{\sum R} \quad (1.35)$$

### 1.10.5. ESPESOR DE AISLANTE PARA LA CALDERA

Para determinar el espesor de aislante para la caldera, se tiene en cuenta las siguientes relaciones:

$$r_3 = r_2 + e_2, r_4 = r_3 + e_3 \Rightarrow r_4 = r_2 + e_2 + e_3 = (r_2 + e_3) + e_2$$

Donde:

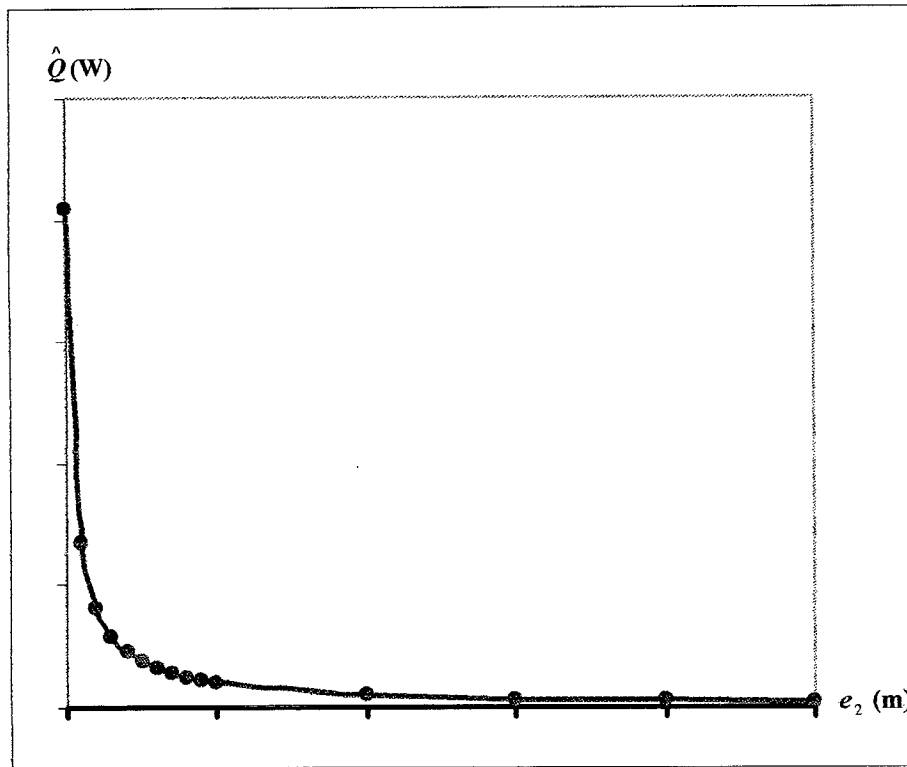
$e_2$  : Espesor de la segunda capa (capa de aislante). (m).

$e_3$  : Espesor de la tercera capa. (m).

Reemplazando estas relaciones en la ecuación (1.33)

$$\hat{Q} = \frac{T_f - T_a}{\left[ \frac{1}{2\pi h_o L r_1} + \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2 + e_2}{r_2}\right)}{2\pi L k_2} + \frac{\text{Ln}\left(\frac{(r_2 + e_3) + e_2}{r_2 + e_2}\right)}{2\pi L k_3} \right] + \frac{1}{2\pi h_a L ((r_2 + e_3) + e_2)}} \quad (1.36)$$

Mediante la ecuación (1.36), se puede ver, de que manera disminuye la rapidez de transferencia de calor a través de las paredes de la caldera, al aumentar el espesor de aislante. La representación gráfica de la ecuación (1.36), se muestra en la figura 1.8.



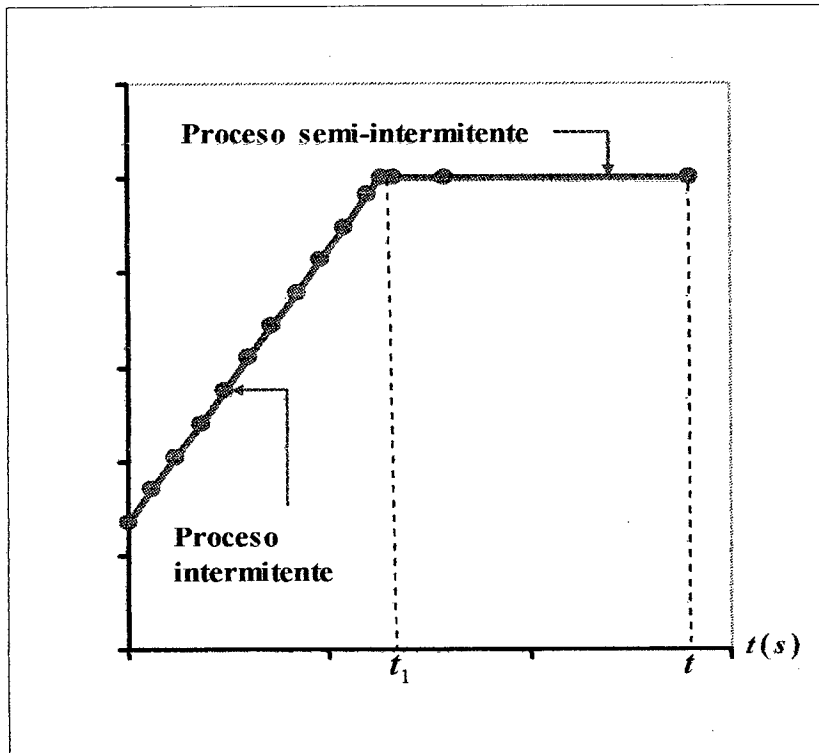
**Figura 1.8.** Representación gráfica de  $\hat{Q}$  en función de  $e_2$  (espesor de aislante)

Fuente: (Ecuación 1.36)

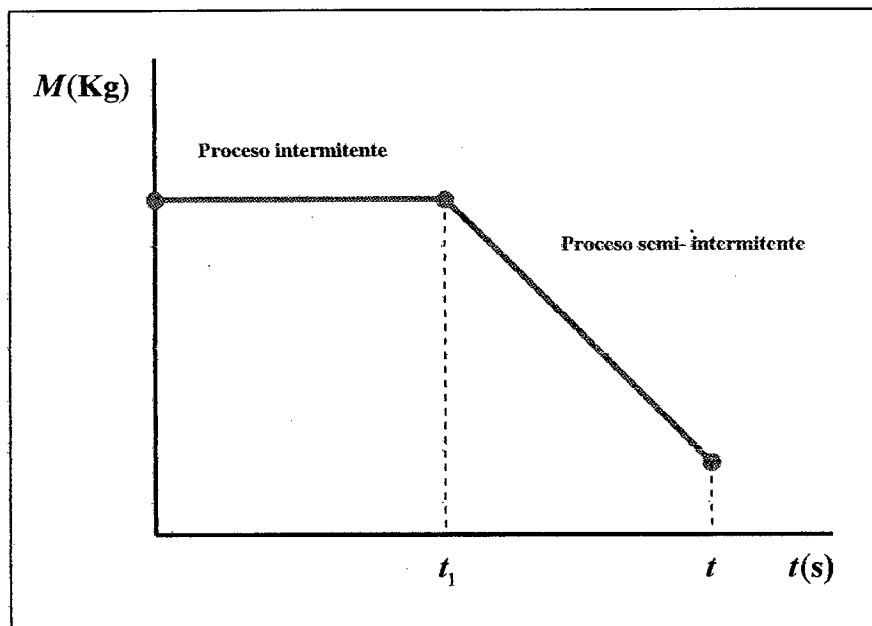
### **1.11. DIAGRAMA DE EVOLUCIÓN PARA LA TEMPERATURA DEL AGUA DENTRO LA CALDERA, MASA DE AGUA DENTRO DE LA CALDERA Y MASA DEL VAPOR QUE SALE DE LA CALDERA.**

El diagrama de evolución es la figura en la que se muestra la representación gráfica de una determinada variable en función del tiempo.

En las figuras (1.9), (1.10) y (1.11), se muestra el diagrama de evolución para la temperatura del agua dentro la caldera, masa de agua dentro la caldera y masa del vapor que sale de la caldera, respectivamente. Se puede ver, por la figura (1.9) y la ecuación (1.25), que la temperatura del agua dentro de la caldera variará con el tiempo en forma exponencial. En las figuras (1.9), (1.10) y (1.11),  $t_1$  representa el tiempo que dura el proceso intermitente.

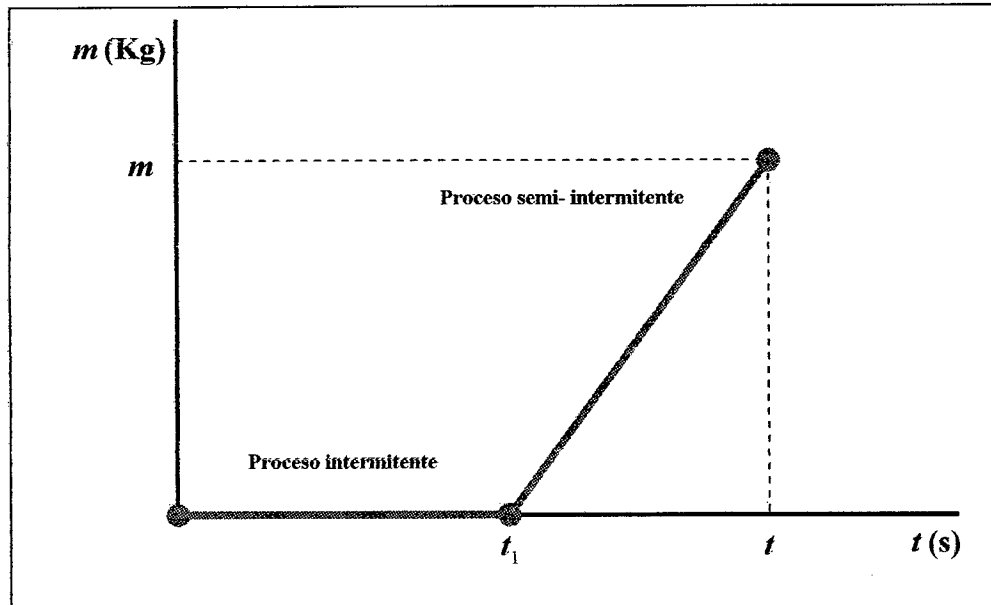


**Figura 1.9.** Diagrama de evolución para la temperatura del agua en la caldera  
Fuente: (Ecuación (1.25))



**Figura 1.10.** Diagrama de evolución para la masa de agua dentro de la caldera.  
Fuente: (ecuación (1.21))





**Figura 1.11.** Diagrama de evolución para la masa del vapor que sale de la caldera.

Fuente: (Sección 1.8 y ecuación (1.27))

## 1.12. VARIABLES MÁS IMPORTANTES DE LA OPERACIÓN.

### 1.12.1. TEMPERATURA INICIAL DEL AGUA EN LA CALDERA.

Esta variable se denota mediante  $T_i$  y se encuentra en la ecuación (1.25). La medida de esta variable se debe hacer al empezar el proceso intermitente.

### 1.12.2. TEMPERATURA FINAL DEL AGUA EN LA CALDERA.

Esta variable se denota mediante  $T_f$  y se encuentra en la ecuación (1.25). Esta variable representará a la temperatura a la que el agua en la caldera llegue a su temperatura de ebullición.

### **1.12.3. TIEMPO QUE DURA EL PROCESO INTERMITENTE**

Denotado como  $t_1$ , es el tiempo que tarda el agua en la caldera, en alcanzar su temperatura de ebullición. Esta variable aparece en las ecuaciones (1.21), (1.24) y (1.27)

### **1.12.4. TIEMPO DE QUE DURA EL PROCESO SEMI-INTERMITENTE**

Este será el tiempo que demore, una determinada cantidad de agua, en evaporarse. Se denota como  $t - t_1$  y aparece en la ecuación (1.27).

### **1.12.5. MASA DE AGUA EVAPORADA**

La masa de agua evaporada, se puede evaluar mediante la ecuación (1.27). Pero para esto es necesario conocer el tiempo para el proceso intermitente y semi-intermitente.

### **1.12.6. MASA DE AGUA EN LA CALDERA EN EL PROCESO SEMI-INTERMITENTE**

La masa de agua en la caldera para cualquier tiempo, se puede evaluar haciendo uso de la ecuación (1.21).

## **1.13. VARIABLES MÁS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**

### **1.13.1. POTENCIA NOMINAL DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS**

Evaluar la potencia nominal de las resistencias eléctricas es importante, ya que están servirán como fuente de energía para generar el vapor en la caldera. La suma de las potencias nominales de las dos resistencias se denota como:  $P_N$

Para determinar el valor de  $P_N$  se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$P_N = \frac{M_0 C_p (T_f - T_i)}{f_p t_1} \quad (1.37)$$

A la variable  $f_p$  se le denomina factor de potencia y es adimensional.

### 1.13.2. RESISTENCIAS TÉRMICAS

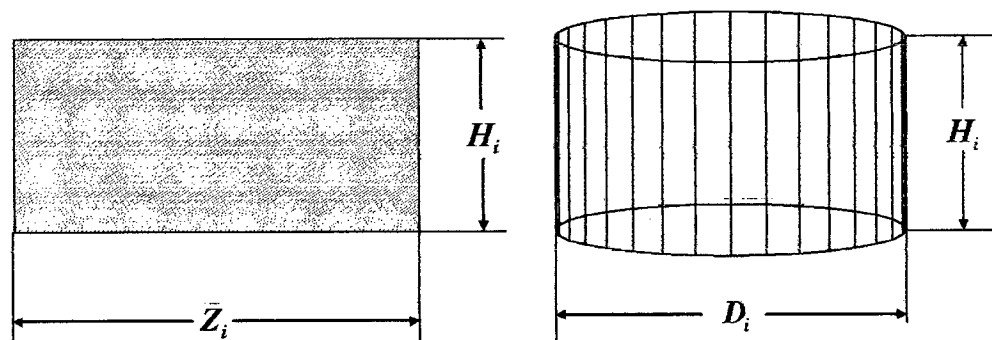
Se tiene en cuenta la sección 1.10.4

### 1.13.3. ESPESOR DE AISLANTE

Se tiene en cuenta la ecuación (1.36) y la figura 1.8

### 1.13.4. DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO INTERIOR

Imagínese que se tenga que rolar una plancha de metal, para formar un cilindro de diámetro  $D_i$  y altura  $H_i$



**Figura 1.12.** Dimensiones de la plancha de metal para el cilindro interior

Fuente: (Elaboración propia)

$Z_i$ : Ancho de la plancha de metal para el cilindro interior. (m)

El valor de  $Z_i$  se puede evaluar, mediante la ecuación (1.38)

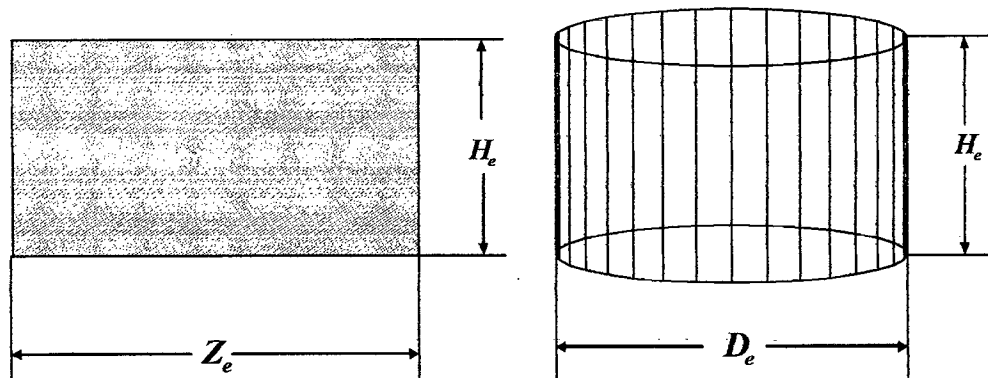
$$Z_i = \pi D_i \quad (1.38)$$

### 1.13.5. DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO EXTERIOR

Se procede de la misma forma que el cilindro interior

$$Z_e = \pi D_e \quad (1.39)$$

$Z_e$ : Ancho de la plancha de metal para el cilindro exterior. (m)



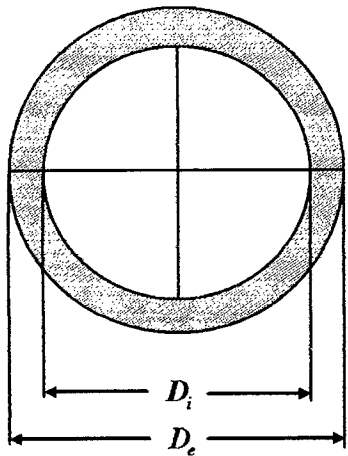
**Figura 1.13.** Dimensiones de la plancha de metal para el cilindro exterior

Fuente: (Elaboración propia)

### 1.13.6. ÁREA DE LA TAPA ENTRE LOS DOS CILINDROS

Se puede evaluar mediante la siguiente ecuación:

$$A_{\text{tapa}} = \frac{\pi}{4}(D_e^2 - D_i^2) \quad (1.40)$$



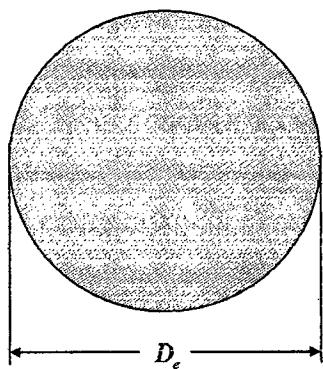
**Figura 1.14.** Tapa entre los dos cilindros

Fuente: (Elaboración propia)

### 1.13.7. ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO INTERIOR

La base del cilindro interior es de forma circular, tal como se muestra en la figura (1.15). Se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$A_{\text{Base}} (\text{cilindro interior}) = \frac{\pi}{4} D_i^2 \quad (1.41)$$



**Figura 1.15.** Base del cilindro interior

Fuente: (Elaboración propia)

### 1.13.8. ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO EXTERIOR

Se procese de la misma forma que en el cilindro interior

$$A_{\text{Base}}(\text{cilindro exterior}) = \frac{\pi}{4} D_e^2 \quad (1.42)$$

### 1.13.9. DIMENSIONES DE LAS PLANCHAS DE METAL PARA LA TAPA HERMÉTICA

Como se puede ver en la figuras 1.16 y 1.17, la tapa hermética estará compuesta por dos cilindros (cilindro mayor y cilindro menor), ambos tendrán la misma altura.

**Para el cilindro mayor**

$$Z_{\text{Mayor}} = \pi D_{\text{Mayor}} \quad (1.43)$$

$Z_{\text{Mayor}}$  : Ancho de la plancha de metal para el cilindro mayor. (m)

Cada cilindro posee una base y una tapa

Para la base

$$A_{\text{Base mayor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Mayor}}^2 \quad (1.44)$$

$A_{\text{Base mayor}}$  : Área de la base del cilindro mayor. (m<sup>2</sup>)

Para la tapa

$$A_{\text{Tapa mayor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Mayor}}^2 \quad (1.45)$$

$A_{\text{Tapa mayor}}$  : Área de la tapa del cilindro mayor. (m<sup>2</sup>)

**Para el cilindro menor**

$$Z_{\text{Menor}} = \pi D_{\text{Menor}} \quad (1.46)$$

$Z_{\text{Menor}}$  : Ancho de la plancha de metal para el cilindro menor. (m)

**Para la base**

$$A_{\text{Base menor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Menor}}^2 \quad (1.47)$$

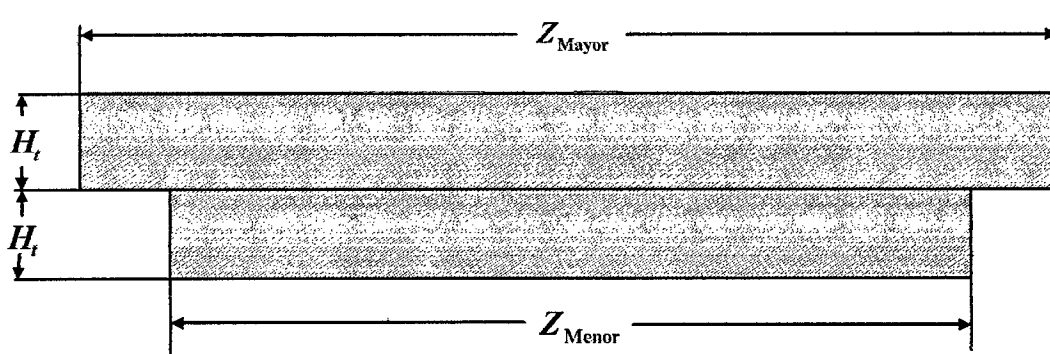
$A_{\text{Base menor}}$  : Área de la base del cilindro menor. (m<sup>2</sup>)

**Para la tapa**

$$A_{\text{Tapa menor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Menor}}^2$$

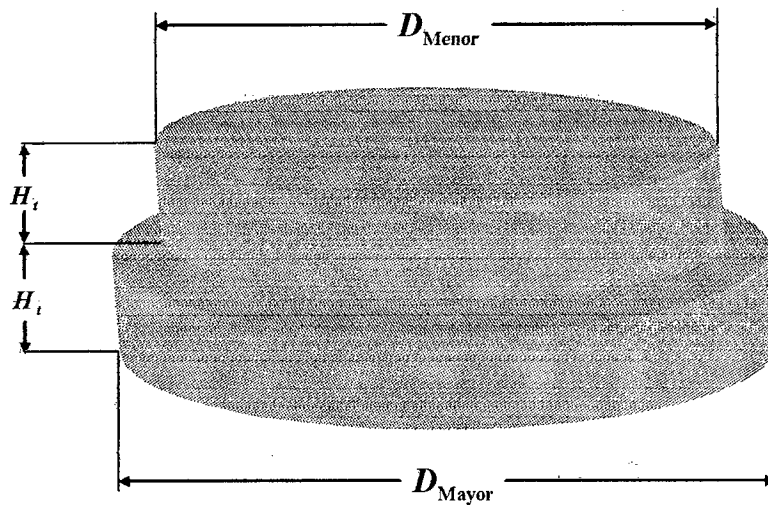
(1.48)

$A_{\text{Tapa menor}}$  : Área de la tapa del cilindro menor. (m<sup>2</sup>).



**Figura 1.16.** Planchas de metal para la tapa hermética

Fuente: (Elaboración propia)



**Figura 1.17.** Tapa hermética

Fuente: (Elaboración propia)



## CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.

### 2.1. CÁLCULOS DE DISEÑO.

#### 2.1.1. CÁLCULO DE LA POTENCIA NOMINAL DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.

La masa total del agua que tendrá la caldera, debe ser aproximadamente 28.9 litros. Para elevar la temperatura del agua desde una temperatura inicial (aproximadamente 25°), hasta una temperatura final (aproximadamente 100°); se requiere una determinada cantidad de energía. (Proceso intermitente)

Se desea que esta variación de temperatura se de cómo máximo en una hora (3600 s).

Haciendo la aplicación de la ecuación (1.37)

Donde:

$C_p = 4200 \text{ J / Kg } ^\circ\text{C}$  : Capacidad calórica del agua

$M_0 = 28.9 \text{ Kg}$  : Masa del agua

$T_i = 25^\circ\text{C}$  : Temperatura inicial del agua en la caldera

$T_f = 100^\circ\text{C}$  : Temperatura final del agua en la caldera

$t_1 = 3600\text{s}$  : Tiempo que dura el proceso intermitente

$f_p = 0.68$  : Factor de potencia. (Ver anexo 06)

$$P_N = \frac{4200 \times 28.9 \times (100 - 25)}{3600 \times 0.68} = 3718 \text{ W} \approx 4000 \text{ W}$$

Se asume el valor de  $f_p = 0.68$ , porque se considera que las resistencias eléctricas tienen una eficiencia del 68%.

El valor de  $P_N = 4000 \text{ W}$ , indica que cada resistencia eléctrica tendrá una potencia de  $2000 \text{ W}$ . (Valor nominal).

### 2.1.2. CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS TÉRMICAS

$$R_1 = \frac{1}{2\pi h_0 r_1 L} \text{ . Liquido interior (agua)}$$

$$h_0 = 450 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$r_1 = 20 \text{ cm} = 0.2 \text{ m}$$

$$L = 23 \text{ cm} = 0.23 \text{ m}$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{1}{2 \times \pi \times 450 \times 0.2 \times 0.23} = 0.00769 \text{ °C/W}$$

$$R_2 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk_1} \text{ . Primera capa}$$

$$k_1 = 224.939 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$r_1 = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$$

$$r_2 = 20.2 \text{ cm} = 0.202 \text{ m}$$

$$L = 23 \text{ cm} = 0.23 \text{ m}$$

$$R_2 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{0.202}{0.20}\right)}{2\pi \times 0.23 \times 224.939} = 3.06 \times 10^{-5} \text{ °C/W}$$

$$R_3 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi Lk_2} \quad \text{Capa de aislante}$$

$$k_2 = 0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$r_2 = 20.2 \text{ cm} = 0.202 \text{ m}$$

$$r_3 = 25.2 \text{ cm} = 0.252 \text{ m}$$

$$L = 23 \text{ cm} = 0.23 \text{ m}$$

$$R_3 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{0.252}{0.202}\right)}{2\pi \times 0.23 \times 0.024} = 6.38^\circ\text{C/W}$$

$$R_4 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi Lk_3} \quad \text{Tercera capa}$$

$$k_3 = 115.93 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$r_3 = 25.2 \text{ cm} = 0.252 \text{ m}$$

$$r_4 = 25.3 \text{ cm} = 0.253 \text{ m}$$

$$L = 23 \text{ cm} = 0.23 \text{ m}$$

$$R_4 = \frac{\text{Ln}\left(\frac{0.253}{0.252}\right)}{2\pi \times 0.23 \times 115.93} = 2.36 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_5 = \frac{1}{2\pi h_a r_4 L} \quad \text{Aire exterior}$$

$$h_a = 150 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$r_4 = 25.3 \text{ cm} = 0.253 \text{ m}$$

$$L = 23 \text{ cm} = 0.23 \text{ m}$$

$$R_5 = \frac{1}{2 \times \pi \times 150 \times 0.253 \times 0.23} = 0.0182 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$\Rightarrow \sum R = 6.4 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

### 2.1.3. CÁLCULO DEL ESPESOR DE AISLANTE

Reemplazando los siguientes datos en la ecuación (1.36), se construye el cuadro N°01.

$$T_a = 25^\circ\text{C} , T_f = 100^\circ\text{C} , L = 0.23 \text{ m} , r_1 = 0.2 \text{ m} , r_2 = 0.202 \text{ m}$$

$$e_3 = 0.001 \text{ m} , k_1 = 224.939 \text{ W}/^\circ\text{C m} , k_2 = 0.024 \text{ W}/^\circ\text{C m}$$

$$k_3 = 115.93 \text{ W}/^\circ\text{C m} , h_0 = 450 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2 , h_a = 150 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$$

$e_2$ (m)	$\hat{Q}$ (W)
0.000 m	2461.13
0.001m	434.16
0.002m	238.61
0.003m	164.76
0.004m	125.97
0.005m	102.05
0.006m	85.84
0.007m	74.12
0.008m	65.24
0.009m	58.31
0.010m	52.72
0.020m	27.27
0.030m	18.66
0.040m	14.324
0.050m	11.71

**Cuadro N°01:** Valores de  $\hat{Q}$  en función de  $e_2$

Fuente: (Sección 2.1.2 y ecuación (1.36))

Ver en anexo 01 la representación gráfica de  $\hat{Q}$  en función de  $e_2$

## 2.2. CÁLCULOS DE CONSTRUCCIÓN

### 2.2.1. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO INTERIOR

El alto de esta plancha seria de igual magnitud que la altura del cilindro interior, es decir:  $H_i = 29 \text{ cm}$

El ancho de la plancha se calcularía como se muestra en la ecuación (1.38)

$$Z_i = \pi D_i = \pi \times 0.4 = 1.256 \text{ m} = 125.6 \text{ cm}$$

### 2.2.2. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LA PLANCHA DE METAL PARA EL CILINDRO EXTERIOR

El alto de esta plancha seria de igual magnitud que la altura del cilindro interior, es decir:  $H_e = 39 \text{ cm}$

$$Z_e = \pi D_e = \pi \times 0.5 = 1.571 \text{ m} = 157.1 \text{ cm}$$

### 2.2.3. CÁLCULO DEL ÁREA DE LA TAPA ENTRE LOS DOS CILIDROS

Se hace uso de la ecuación (1.40)

$$A_{\text{tapa}} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} ((0.5)^2 - (0.4)^2) = 0.071 \text{ m}^2$$

#### 2.2.4. CÁLCULO DEL ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO INTERIOR

Se aplica la ecuación (1.41)

$$A_{\text{Base}} (\text{cilindro interior}) = \frac{\pi}{4} D_i^2 = \frac{\pi}{4} (0.4)^2 = 0.126 \text{ m}^2$$

#### 2.2.5. CÁLCULO DEL ÁREA DE LA BASE DEL CILINDRO EXTERIOR

Se aplica la ecuación (1.42)

$$A_{\text{Base}} (\text{cilindro exterior}) = \frac{\pi}{4} D_e^2 = \frac{\pi}{4} (0.5)^2 = 0.196 \text{ m}^2$$

#### 2.2.6. CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LAS PLANCHAS DE METAL PARA LA TAPA HERMÉTICA

**Para el cilindro mayor**

Se aplica la ecuación (1.43)

$$Z_{\text{Mayor}} = \pi D_{\text{Mayor}} = \pi (0.5) = 1.57 \text{ m}$$

$$H_t = 0.025 \text{ m} = 2.5 \text{ cm}$$

Para la base

Se hace uso de la ecuación (1.44)

$$A_{\text{Base mayor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Mayor}}^2 = \frac{\pi}{4} (0.5)^2 = 0.196 \text{ m}^2$$

Para la tapa

Se hace uso de la ecuación (1.45)

$$A_{\text{Tapa mayor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Mayor}}^2 = \frac{\pi}{4} (0.5)^2 = 0.196 \text{ m}^2$$

**Para el cilindro menor**

Se hace uso de la ecuación (1.46)

$$Z_{\text{Menor}} = \pi D_{\text{Menor}} = \pi (0.4) = 1.26 \text{ m}$$

$$H_t = 0.025 \text{ m} = 2.5 \text{ cm}$$

Para la base

Se hace uso de la ecuación (1.47)

$$A_{\text{Base menor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Menor}}^2 = \frac{\pi}{4} (0.4)^2 = 0.126 \text{ m}^2$$

Para la tapa

Se hace uso de la ecuación (1.48)

$$A_{\text{Tapa menor}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{Menor}}^2 = \frac{\pi}{4} (0.4)^2 = 0.126 \text{ m}^2$$

## CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LA CALDERA

### 3.1. MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS

- 1 Plancha de aluminio (1.2mx2.4mx1.2mm)
- 1 Plancha de liza galvanizada
- 1 Codo de acero inoxidable N° 304 de ½ pulgada sin rosca
- 2 Válvulas esféricas de hierro niquelado de ½ pulgada de diámetro
- 1 Tubo de acero inoxidable N° 304 de ½ pulgada (40 cm.)
- 2 Resistencias eléctricas (2000 Watts de potencia cada una)
- Cable automotriz N°12 (3m de longitud)
- Cable asbestado N°12 (1m de longitud)
- 1 Llave termo magnética de 2x32 amperios
- Lana de vidrio (3m de longitud)
- Soldadura para acero inoxidable N° 1/32 (1/4 Kg)
- 1 Silicona para alta temperatura
- Estructura metálica

### 3.2. DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES EMPLEADOS

<b>Cilindro interior</b>	<b>Cilindro exterior</b>
Material: aluminio	Material: liza galvanizada
Diámetro interior = 40 cm.	Diámetro interior = 50.4 cm
Diámetro exterior = 40.4 cm.	Diámetro exterior = 50.6 cm
Espesor = 2 mm.	Espesor = 1 mm.
Altura = 29 cm.	Altura = 39 cm.



**Tapa entre los dos cilindros**

Material: liza galvanizada

Diámetro interior = 40 cm

Diámetro exterior = 50 cm

Espesor = 1 mm.

**Tapa hermética**

Cilindro mayor

Material: liza galvanizada

Diámetro interior = 50 cm

Diámetro exterior = 50.1 cm

Espesor = 1 mm.

Cilindro menor

Material: liza galvanizada

Diámetro interior = 40 cm

Diámetro exterior = 40.1 cm

Espesor = 1 mm.

**Codo**

Material: acero inoxidable N° 304

Cantidad = 1 unidad

Diámetro nominal = 1/2 pulgada

**Válvulas esféricas**

Material: Hierro niquelado

Cantidad = 1 unidad

Diámetro nominal = 1/2 pulgada

**Tubo**

Material: acero inoxidable N° 304

Diámetro nominal = 1/2 pulgada

Longitud total = 40 cm.

**Resistencias eléctricas**

Cantidad = 2 unidades

Potencia nominal = 2000 watts

Amperaje  $\approx$  10 amperios

Voltaje  $\approx$  220 – 230 voltios

**Llave termo magnética**

Amperaje de disparo = 32 amperios.

Marca: Merlín Gerin.

**Aislante térmico**

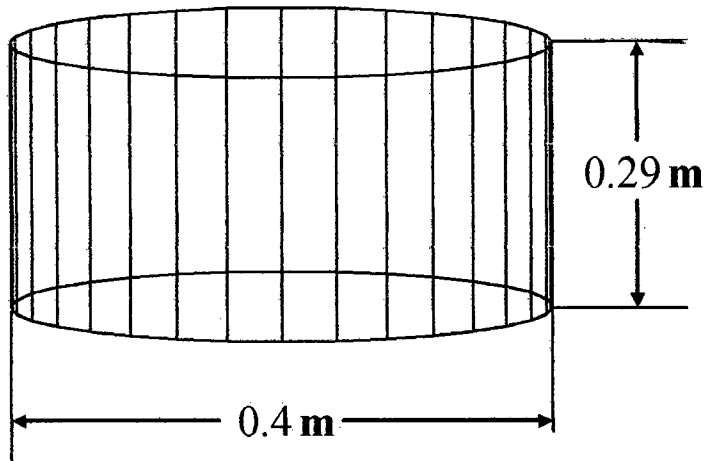
Material: lana de vidrio

Longitud total  $\approx$  3m

Espesor  $\approx$  5cm

### 3.3. DESPIECE

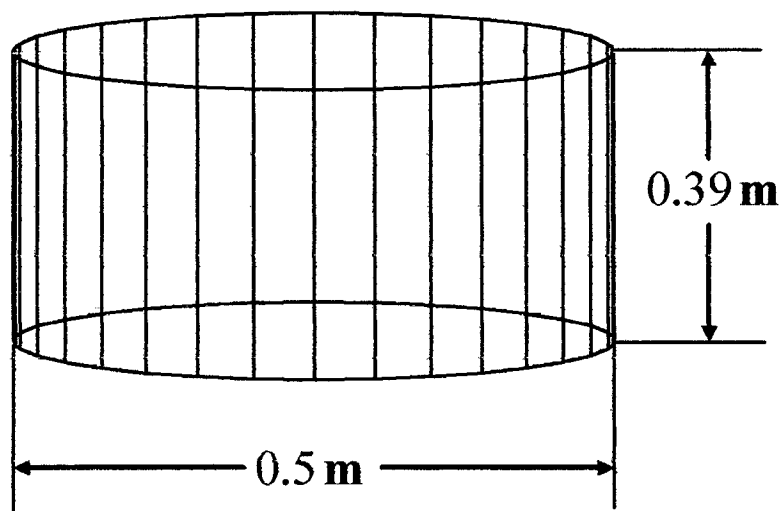
#### Cilindro interior



**Figura 3.1.** Cilindro interior

Fuente: (Sección 3.2)

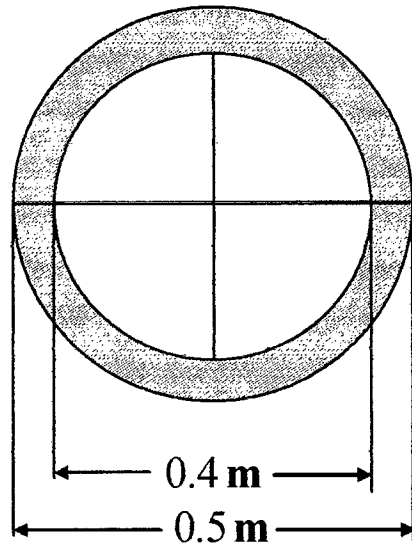
#### Cilindro exterior



**Figura 3.2.** Cilindro exterior

Fuente: (Sección 3.2)

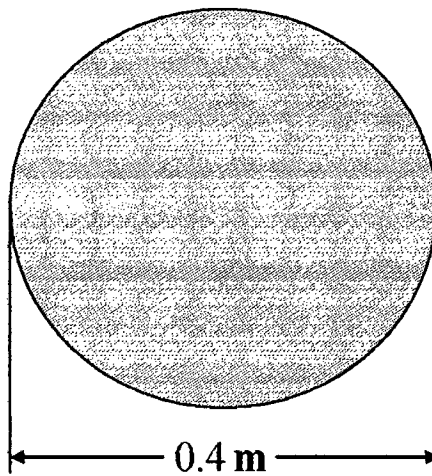
### Tapa entre los dos cilindros



**Figura 3.3.** Tapa entre los dos cilindros

Fuente: (Sección 3.2)

### Base del cilindro interior



**Figura 3.4.** Base del cilindro interior

Fuente: (Sección 3.2)

### Base del cilindro exterior

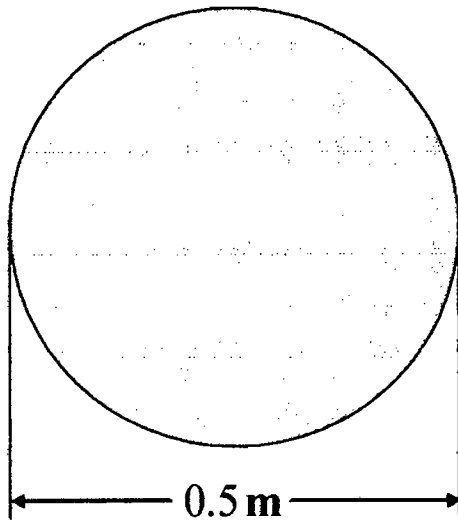


Figura 3.5. Base del cilindro exterior

Fuente: (Sección 3.2)

### Tapa hermética

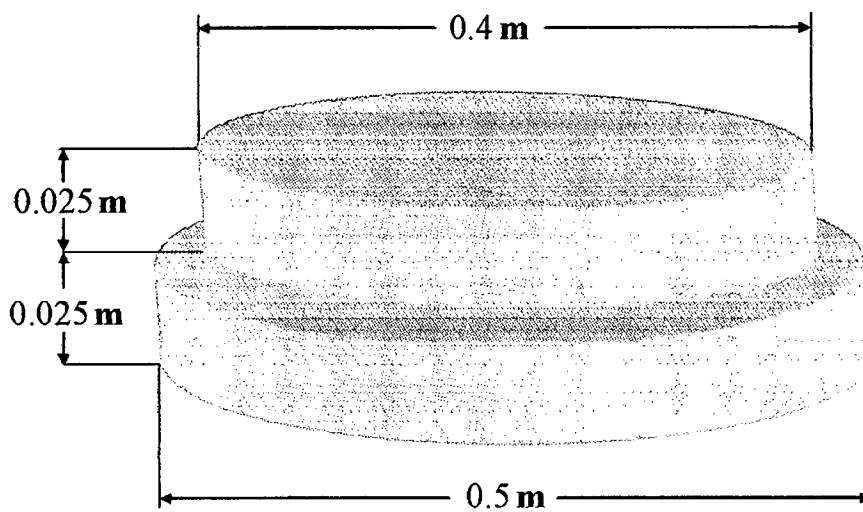
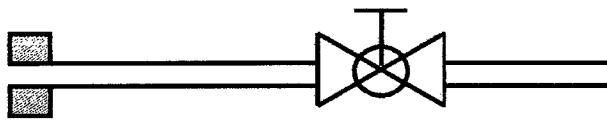


Figura 3.6. Tapa hermética

Fuente: (Sección 3.2)

### Tubería para la descarga del vapor

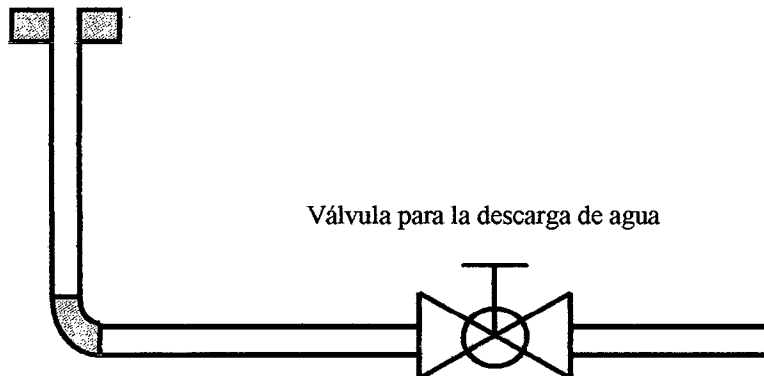


Válvula para la descarga del vapor

### Figura 3.7. Tubería para la descarga del vapor

Fuente: (Elaboración propia)

### Tubería para la descarga de agua

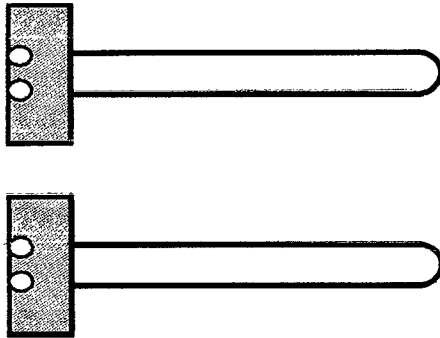


Válvula para la descarga de agua

### Figura 3.8. Tubería para la descarga de agua

Fuente: (Elaboración propia)

### Resistencias eléctricas



**Figura 3.9.** Resistencias eléctricas

Fuente: (Sección 1.8)

### 3.4. DESCRIPCIÓN Y EXPECIFICACIÓN DE SERVICIOS AUXILIARES

La caldera cuenta con una llave termomagnética, la cual permitirá el paso de la corriente eléctrica hacia las resistencias eléctricas, esta llave tiene un amperaje de disparo de 32 amperios y trabaja con un voltaje de 220 V (monofásico)

La llave termomagnética está conectada a las resistencias a través de un cable asbestado N°12 (para alta temperatura).

La llave termomagnética se puede conectar a cualquier tomacorriente por medio de un cable automotriz N°12.

Además la caldera tiene una estructura metálica, la cual le sirve como soporte.

### **3.5. DISPOSICIÓN ADECUADA DE LA CALDERA EN EL LABORATORIO**

Para trabajar cómodamente, es necesario que la caldera se encuentre en un lugar cerrado, con las siguientes dimensiones:

Ancho = 3m

Fondo = 3m

Alto = 3.5 m

Que el voltaje a utilizarse sea 220V.

## **CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA CALDERA**

### **4.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA**

El funcionamiento de la caldera se hace posible gracias a la energía eléctrica.

Como se mencionó en la sección 1.8 la caldera cuenta con dos resistencias eléctricas, las cuales están conectadas en paralelo.

Estas dos resistencias disipan calor, una parte de este calor es transferido al agua (haciendo variar la energía interna del agua) y otra parte se disipa a través de las paredes de la caldera.

A la rapidez con la cual la resistencia eléctrica disipa calor, se le llama potencia de la resistencia eléctrica. En el presente trabajo se considera esta potencia constante, pues se tiene un circuito eléctrico resistivo, en el cual las variaciones de voltaje y amperaje son mínimas. Por lo tanto si la potencia es el producto del voltaje con el amperaje, entonces, la potencia también tendrá variaciones mínimas (es decir prácticamente constante).

### **4.2. ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA**

Se ha realizado una prueba utilizando 28.9 Kg de agua, la temperatura inicial del agua fue 29°C. Se pudo notar que el agua presente en la caldera llega a evaporarse a 100°C.

Esto se indica mejor en la sección siguiente



### 4.3. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Antes de hacer funcionar la caldera se midió las siguientes variables: masa del agua  $M_0 = 28.9 \text{ Kg}$  (equivalente a 28.9 litros de agua), temperatura del agua y temperatura del aire exterior; resultando estas últimas ser iguales a  $29^\circ\text{C}$ .

Posteriormente se puso en funcionamiento la caldera y se midió el **tiempo que dura el proceso intermitente** (tiempo que tarda el agua en la caldera en llegar a su temperatura de ebullición).

**Valor experimental de  $t_1$**

$$t_1 = 3198 \text{ s}$$

Después de esto, se dejó que el agua de la caldera se evapore por un tiempo de 1800 s. Al cumplir este tiempo se culminó la prueba y se midió la cantidad de agua que quedó en la caldera, resultando ser  $M_f = 26.8 \text{ Kg}$

**Masa de agua evaporada experimentalmente en 1800 s**

$$m(1800) = 28.9 - 26.8 = 2.1 \text{ Kg}$$

Se hace aplicación de las ecuaciones (1.24) y (1.27), para determinar en forma teórica el tiempo que dura el proceso intermitente y la masa de agua evaporada en 1800s

$$T_f = T_a + \sum R \left[ P_R - e^{-\frac{t_1}{C_P M_0 \sum R}} \left( P_R - \frac{T_i - T_a}{\sum R} \right) \right]$$

Despejando  $t_1$  de la última ecuación

$$t_1 = C_p M_0 \sum R \operatorname{Ln} \left[ \frac{P_R - \frac{T_i - T_a}{\sum R}}{P_R - \frac{T_f - T_a}{\sum R}} \right]$$

**Valor teórico de  $t_1$**

Se tiene en el valor real de  $P_R = 0.68(4000) = 2720 \text{ W}$

$$t_1 = 4200 \times 28.9 \times 6.4 \times \operatorname{Ln} \left[ \frac{2720 - \frac{29 - 29}{6.4}}{2720 - \frac{100 - 29}{6.4}} \right] = 3174 \text{ s}$$

Haciendo aplicación de la ecuación (1.27)

**Valor teórico de  $m$  en 1800 s**

$$m = \frac{\left( P_R - \frac{T_f - T_a}{\sum R} \right) (t - t_1)}{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 2257 \times 10^3 \text{ J/Kg}$ . (OCON et al, 1967)

$t - t_1 = 1800 \text{ s}$

$$m = \frac{\left( 2720 - \frac{100 - 29}{6.4} \right) \times 1800}{2253 \times 10^3} = 2.164 \text{ Kg}$$

De igual manera se efectúan los cálculos para los ensayos 2,3,4,5.

ENSAYOS	VARIABLES	VALORES EXPERIMENTALES	UND	VALOR TEÓRICO	UND	% ERROR	ERROR
1	t1	3198	S	3174	s	0.756	Por exceso
	m1	2.10	Kg	2.164	kg	2.957	Por defecto
2	t2	3179	S	3174	s	0.157	Por exceso
	m2	2.17	Kg	2.164	kg	0.277	Por exceso
3	t3	3185	S	3174	s	0.346	Por exceso
	m3	2.20	Kg	2.164	kg	1.663	Por exceso
4	t4	3194	S	3174	s	0.630	Por exceso
	m4	2.15	Kg	2.164	kg	0.646	Por defecto
5	t5	3191	s	3174	s	0.535	Por exceso
	m5	2.18	kg	2.164	kg	0.739	Por exceso

**CuadroN°02:** Comparación de los valores experimentales y teóricos, para el tiempo que dura el proceso intermitente y la masa de vapor.

Fuente: (Sección 4.3)

PROMEDIO ENSAYOS	VARIABLES	VALOR EXPERIMENTAL	UND	VALOR TEÓRICO	UND	% ERROR	ERROR
	t1	3189	S	3174	S	0.472	Por exceso
	m	2.16	Kg	2.164	Kg	0.184	Por defecto

**CuadroN°03:** Comparación de los valores promedios experimentales y teóricos, para el tiempo que dura el proceso intermitente y la masa de vapor.

Fuente: (Cuadro N°2).

#### 4.4. MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA

- Para empezar a utilizar la caldera, es necesario medir lo siguiente:  
Masa inicial de agua en la caldera, temperatura inicial del agua en la caldera y temperatura del aire exterior.
- Se levanta la llave termo magnética, haciendo que pase la corriente eléctrica hacia las resistencias eléctricas, iniciándose de este modo el proceso intermitente.
- Se espera atentamente que el agua en la caldera llegue a su temperatura de ebullición y de este modo determinar el valor experimental de  $t_1$
- Se compara el valor experimental con el valor teórico para  $t_1$ , despejando  $t_1$  de la ecuación (1.24)
- Posteriormente se deja que el agua se evapore por un tiempo determinado de  $t - t_1$ , este tiempo es correspondiente a la etapa de ebullición.
- Después de medir el tiempo  $t - t_1$ , se baja la llave termo magnética y se espera un lapso de treinta minutos, hasta que la temperatura del agua en la caldera baje un poco.
- Posteriormente se mide la masa final del agua en la caldera, que por diferencia entre la masa inicial se determina la cantidad de agua evaporada.
- Se comparara el valor experimental con el valor teórico para la masa del vapor, haciendo uso de la ecuación (1.27).

#### 4.5. HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

- Al realizar la práctica en la caldera, se debe utilizar la vestimenta apropiada, es decir se debe utilizar mandil.
- El manipuleo de la llave térmica (encendido y apagado de la caldera), se debe hacer con las manos secas.
- Al iniciar el encendido de la caldera, se debe verificar que no exista conductividad eléctrica en su superficie.
- Es importante medir el ohmiaje de las resistencias eléctricas, esto permitirá saber si están funcionando en buenas condiciones.
- No se debe tocar con las manos mojadas la superficie de la caldera, cuando esté funcionando.
- Durante el tiempo que se produce la evaporación del agua, es recomendable mantener una cierta distancia de la caldera, esto es para evitar quemarse con el vapor que sale por la parte superior de la misma.
- Después de terminar de usar la caldera, se debe esperar un lapso de tiempo hasta que la temperatura del agua que quedó en la caldera descienda un poco.
- Al instalarse la caldera en el laboratorio, se debe tener en cuenta una línea de corriente exclusiva para este equipo.
- Al sacar la tapa hermética, hacerlo procurando no acercarse al rostro, esto con el fin de no quemarse o sufrir ningún accidente.

## CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO

### 5.1. COSTO DE DISEÑO

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Dibujo de la caldera	1	100	100
Cálculos de diseño y construcción (asesoramiento)	-	2000	2000
<b>TOTAL</b>			<b>2100</b>

**Cuadro N° 03:** Costo de diseño

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Taller de metal mecánica	700	700
Electricista	80	80
<b>TOTAL</b>		<b>780</b>

**Cuadro N° 04:** Costo de construcción e instalación

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.3. COSTO DE ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Agua tratada	30 litros	3	3
Energía eléctrica	8 KW- h	0.5	4
<b>TOTAL</b>			<b>7</b>

#### Cuadro N° 05: Costo de ensayos y pruebas de funcionamiento

Fuente: (Elaboración propia)

### 5.4. COSTO DE MATERIALES

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Plancha de aluminio	1	200	200
Plancha de liza galvanizada	1	220	220
Codo de acero inoxidable	1	50	50
Válvula esférica	2	18	36
Tubo de acero inoxidable	1	120	120
Resistencia eléctrica	2	80	160
Cable automotriz	3 metros	6	18
Cable asbestado	1 metro	13	13
Llave termomagnética	1	42	42
Caja para sobre poner la llave termomagnética	1	7	7
Lana de vidrio	3 metros	32	96
Silicona para alta temperatura	1	10	10
Soldadura	1 /4 Kilo	20	20
Jebe microporoso	1	25	25
<b>TOTAL</b>			<b>1017</b>

#### Cuadro N° 06: Costo de materiales

Fuente: (Elaboración propia)

## 5.5. OTROS COSTOS

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Copias	5	8	40
Encuadernados	10	20	200
Pasajes	-	200	200
<b>TOTAL</b>			<b>440</b>

### Cuadro N° 07: Otros costos

Fuente: (Elaboración propia)

## 5.6. COSTO TOTAL

$$C \text{ TOTAL (S.)} = 2100 + 780 + 7 + 1017 + 440 = 4344$$



## CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó e instaló una caldera para la generación de vapor de agua utilizando energía eléctrica.
- Se determinó los parámetros de diseño y seleccionó el material adecuado para la construcción de la caldera, que es el aluminio y su selección fue por el bajo precio y por que se encuentra disponible en el mercado.
- Se construyó y se instaló la caldera en el laboratorio de procesos unitarios de la Facultad de Ingeniería Química, de la primera casa de estudios que es la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.
- Así mismo se determinó los parámetros de operación.
- Se definió claramente los procesos (Proceso intermitente y proceso semi-intermitente) que se llevan a cabo durante el funcionamiento de la caldera
- Se aplicó a cada uno de los procesos: la ecuación general de balance de masa, ecuación general de energía y los mecanismos de transferencia de calor. En cada proceso se reconoció las formas de energía que intervienen, lo cual sirvió para determinar las ecuaciones que rigen el comportamiento de las variables en cada proceso.
- Se determinó los valores experimentales y teóricos para  $t_1$  y  $m$ , obteniéndose para ambos casos el porcentaje de error pequeño (véase el cuadro N° 02). Esto prueba que el funcionamiento de la caldera es óptimo
- La potencia de las resistencias eléctricas, se puede considerar constante, debido a que las variaciones de voltaje y amperaje son mínimas.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Realizar diseño, construcción e instalación de un equipo similares para la generación de vapor utilizando otra fuente de energía de bajo valor económico.
- Utilizar otro material para la construcción del equipo, teniendo en cuenta el rendimiento.
- Utilizar el equipo presentado en las prácticas de los cursos de ingeniería.
- Adaptar la caldera a cualquier otro equipo, se debe realizar mediante un tubo de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro el cual también debe estar cubierto con una capa de aislante. Esto con el fin de que se aproveche al máximo el calor latente del vapor que sale de la caldera.

## BIBLIOGRAFÍA

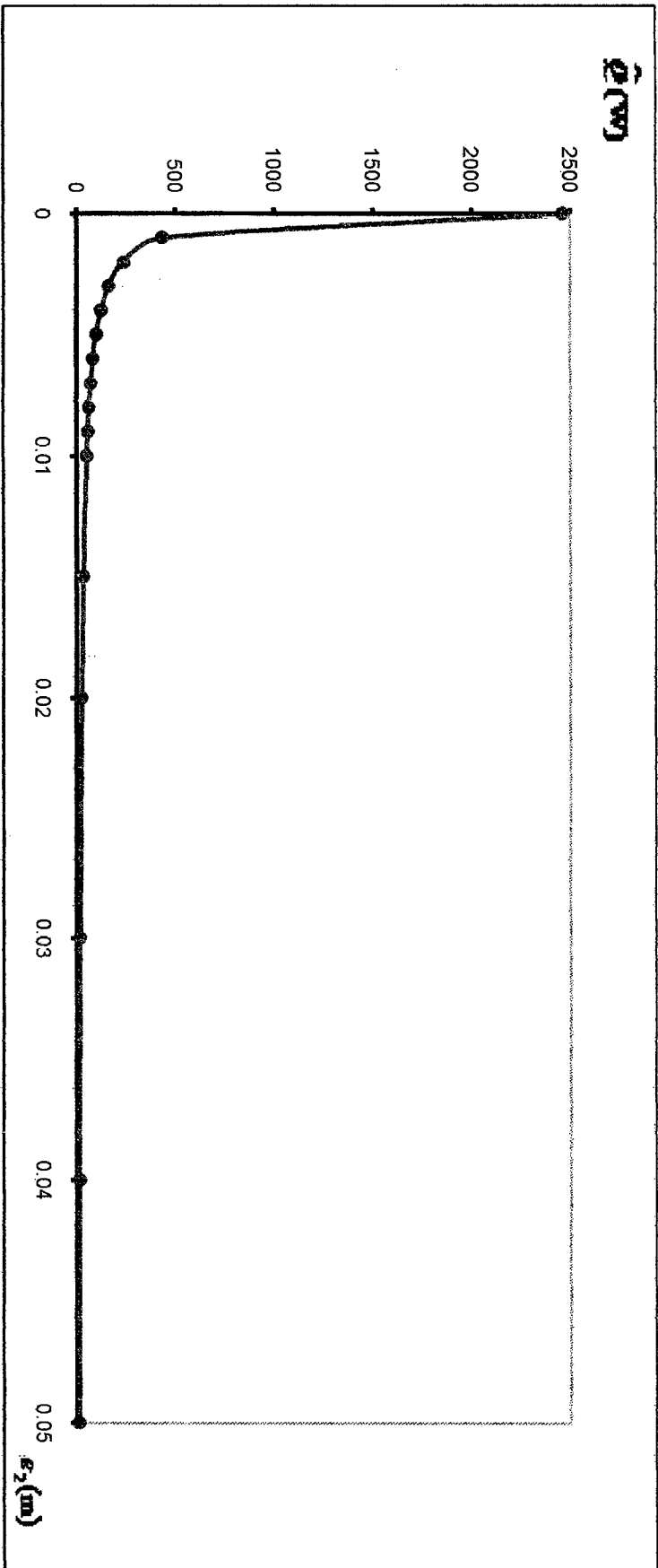
1. **BARDALES. E, RUIZ. R, TRIGOSO. E.** (2008). Diseño construcción e instalación de un equipo para la medición de la conductividad térmica de materiales sólidos. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
2. **CHOTA, R.** (1994). Diseño, construcción, e instalación de un equipo de agitación y filtración continua. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
3. **DEL AGUILA. CH, DIAZ. C, RENGIFO. E.** (2007). Diseño construcción e instalación de un evaporador de simple efecto. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
4. **DIAZ. P.** (2000). Transferencia de calor teoría y problemas resueltos. Tercera edición. Editorial América
5. **FELDER. R, ROUSSEAU. R.** (1981). Principios básicos de la ingeniería química. Editorial El Manual Moderno
6. **FERNANDEZ. L, MELENDEZ. J, SALINAS. J.** (2007). Diseño construcción e instalación de un equipo para la medición de la capacidad calórica de alimentos líquidos. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana
7. **KERN. D Q.** (2001). Procesos de transferencia de calor. Trigésima segunda reimpresión. Editorial Mc Graw Hill

8. **OCÓN, G, TOJO, J.** (1967). Problemas de ingeniería química. Tercera edición. Editorial Gráficas Rogar
  
9. **PERRY, J.** (2001). Manual del ingeniero químico. Séptima edición. Editorial Mc Graw Hill
  
10. **RAMÍREZ, N.** (1984). Tesis: Diseño, construcción e instalación de un equipo de transporte de fluidos. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana.
  
11. **VÁSQUEZ, J.** (1996). Problemas de física general. Tomo II. Segunda edición. Lima Perú.

# ANEXOS

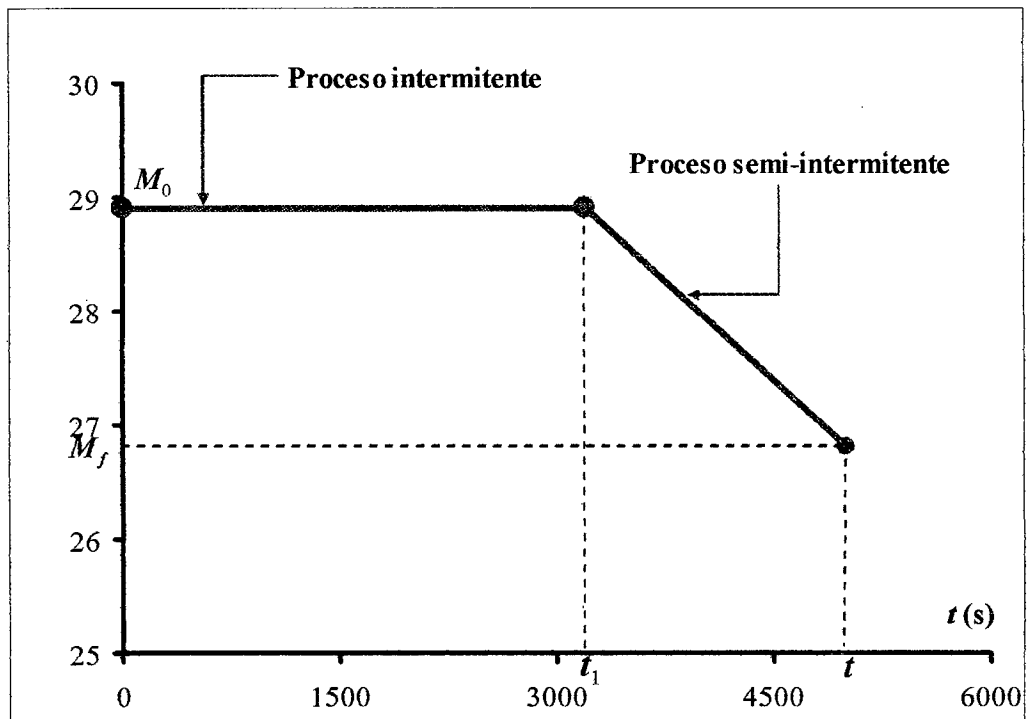
ANEXO 01: Representación gráfica de  $\hat{Q}$  en función de  $e_2$

Fuente: (Cuadro N°01)



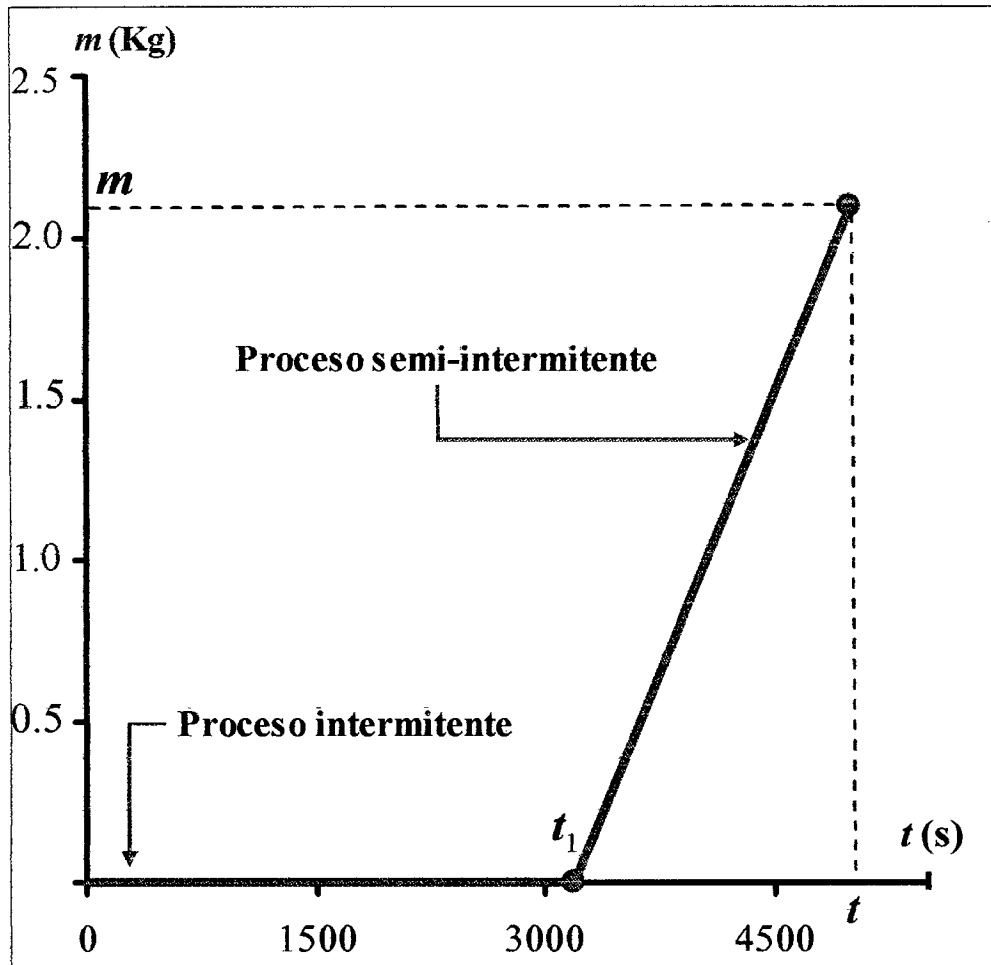
**ANEXO 02:** Diagrama de evolución para la masa de agua dentro de la caldera

Fuente: (Sección 4.3)



**ANEXO 03:** Diagrama de evolución para la masa del vapor de agua que sale de la caldera

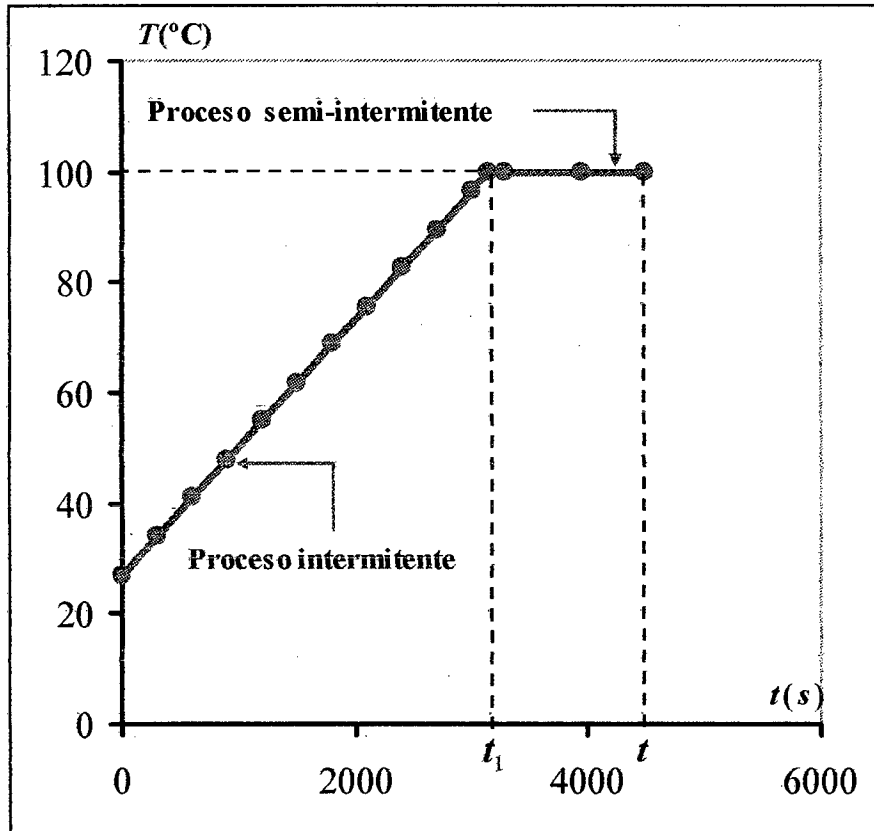
Fuente:(Sección 4.3)





**ANEXO 04:** Diagrama de evolución para la temperatura del agua dentro de la caldera

Fuente:(Sección 4.3)



**ANEXO 05:** Diagrama de evolución para la temperatura del agua dentro de la caldera

Fuente:(Sección 4.3)

Ecuación 1.25

Datos.

$T_a$	29 °C
$C_P$	4200 J/Kg°C
$M_0$	28.9 Kg
$T_i$	29 °C
$P_R$	2720 W
$\sum R$	6.4 °C/W

$T$ °C	$t$ s
29	0
35.7213911	300
42.4401871	600
49.1563889	900
55.8699974	1200
62.5810138	1500
69.289439	1800
75.995274	2100
82.6985199	2400
89.3991775	2700
96.097248	3000
100.000002	3151
100.000002	3300
100.000002	3951
100.0002	7000

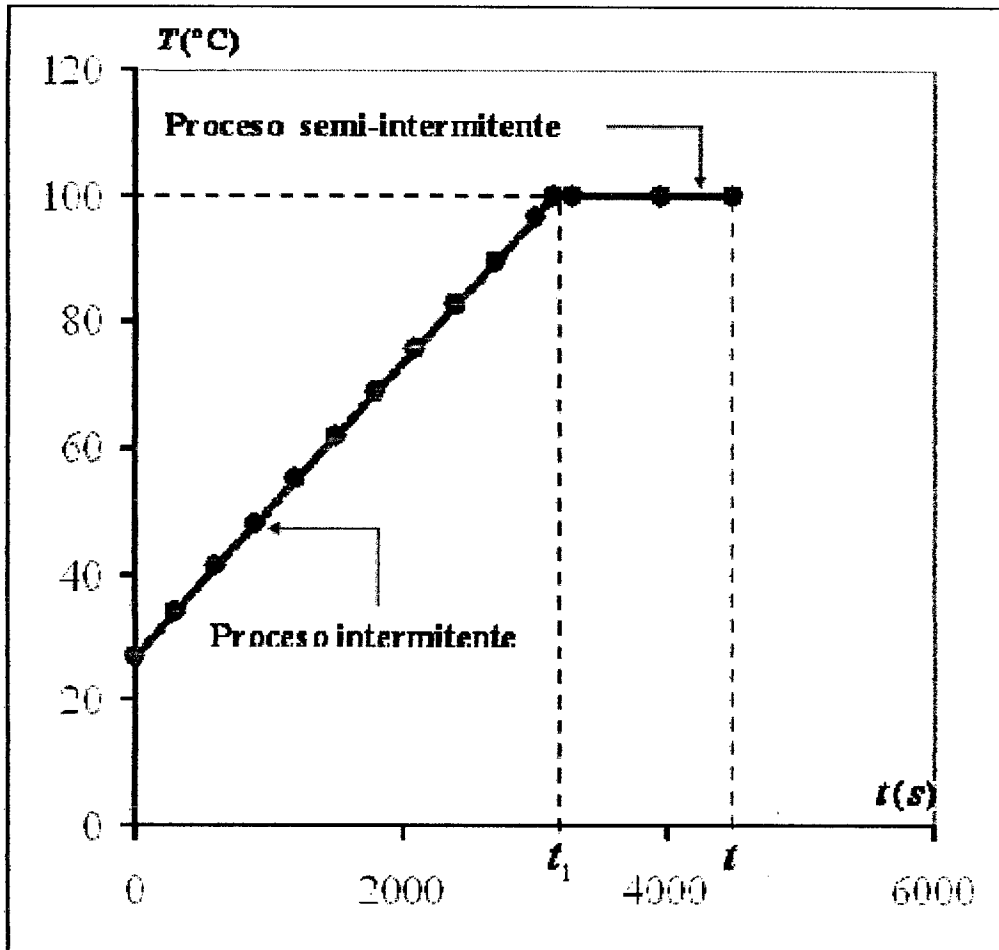
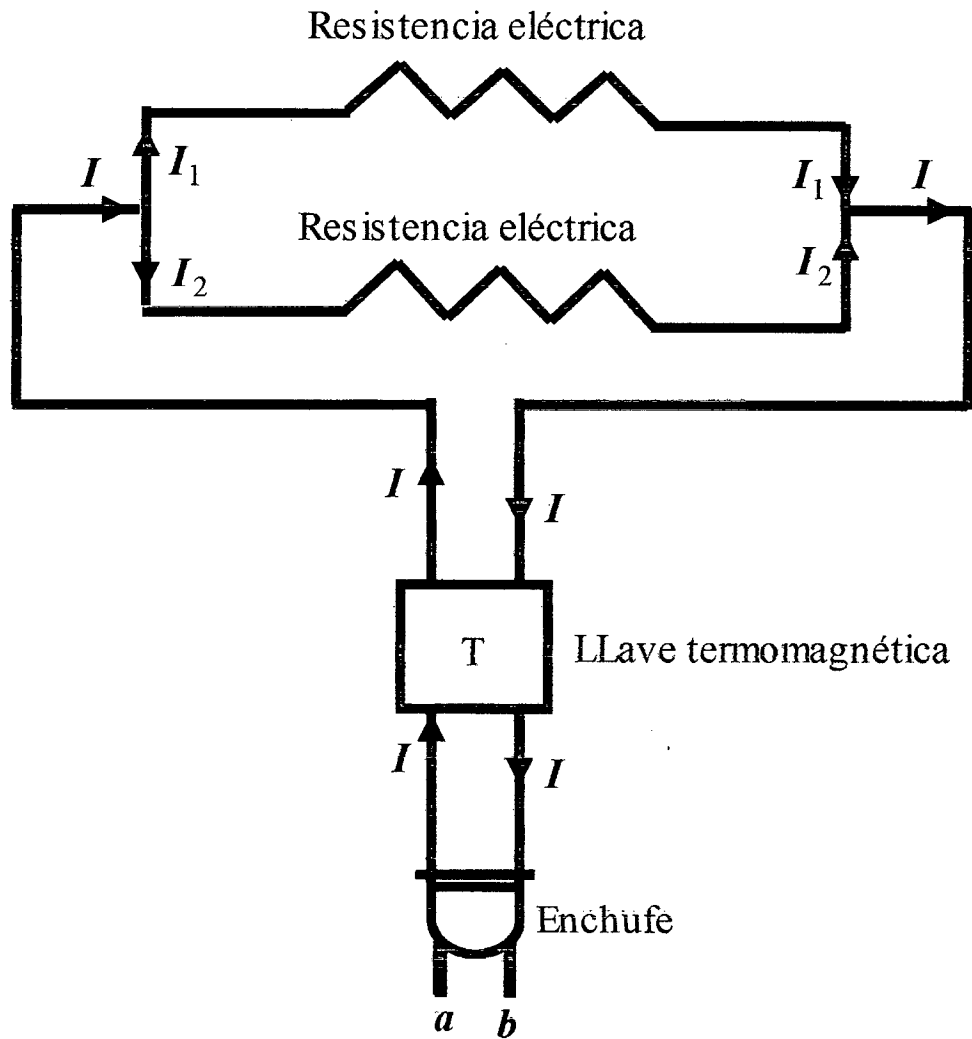


Diagrama de evolución para la temperatura del agua dentro de la caldera.

**ANEXO 06:** Circuito eléctrico para la caldera. (Resistencias eléctricas conectadas en paralelo)

Fuente:(Elaboración propia)



**ANEXO 07:** Descripción del procedimiento para el cálculo de la potencia real de las resistencias eléctricas

Fuente: (Elaboración propia)

Primeramente, se debe conocer la nomenclatura y unidades de las variables involucradas.

$V_{ab}$  : Voltaje entre los puntos  $a$  y  $b$ . (Voltios)

$I$  : Intensidad de corriente total en el circuito eléctrico. (Amperios)

$I_1$  : Intensidad de corriente en la resistencia 1. (Amperios)

$I_2$  : Intensidad de corriente en la resistencia 2. (Amperios)

$\Omega$  : Resistencia eléctrica equivalente para el circuito eléctrico. (Ohmios)

$\Omega_1$  : Resistencia eléctrica 1. (Ohmios)

$\Omega_2$  : Resistencia eléctrica 2. (Ohmios)

$P_{R(1)}$  : Potencia real de la resistencia eléctrica 1. (Watts)

$P_{R(2)}$  : Potencia real de la resistencia eléctrica 2. (Watts)

$P_R$  : Potencia real total. (Watts)

$P_{R(2)}$  : Potencia real de la resistencia eléctrica 2. (Watts)

$P_{N(1)}$  : Potencia nominal de la resistencia eléctrica 1. (Watts)

$P_{N(2)}$  : Potencia nominal de la resistencia eléctrica 2. (Watts)

$f_p$  : Potencia real / Potencia nominal

Se midió la resistencia eléctrica equivalente para el circuito, haciendo que el voltaje sea:  $V_{ab} = 220$  Voltios.

El valor de  $\Omega$  resultó 18 Ohmios

Por la ley de Ohm, se tiene:

$$\Omega = \frac{V_{ab}}{I} \text{ . Fuente (Vásquez, 1996)}$$

$$\Rightarrow I = \frac{V_{ab}}{\Omega} = \frac{220}{18} = 12.22 \text{ Amperios}$$

Por la ley de Kirchhoff. Fuente (Vásquez, 1996)

$$I = I_1 + I_2 = 12.22$$

Como las resistencias eléctricas 1 y 2 son idénticas:

$$\Omega_1 = \Omega_2 \text{ y } I_1 = I_2.$$

$$\Rightarrow I_1 = I_2 = 6.11 \text{ Amperios}$$

La potencia real de cada resistencia eléctrica seria:

$$P_{R(1)} = P_{R(2)} = I_1 V_{ab} = I_2 V_{ab} = 6.11 \times 220 = 1334.44 \text{ Watts.}$$

Cada resistencia eléctrica, tiene una potencia nominal de 2000 Watts

El factor de potencia para cada resistencia eléctrica seria:

$$f_{p(1)} = f_{p(2)} = \frac{1334.44}{2000} = 0.6722 \cong 0.68$$

La potencia real total

$$P_R = 0.68 \times 4000 = 2720 \text{ Watts}$$

**ANEXO 08:** Conductividades térmicas de los materiales empleados en el presente trabajo

Fuente: (KERN, 2001)

Conductividad térmica del aluminio:  $k_1 = 224.939 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Conductividad térmica de la lana de vidrio:  $k_2 = 0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Conductividad térmica de la liza galvanizada:  $k_3 = 115.93 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

**ANEXO 09:** Ejemplo, de que forma se puede utilizar el vapor que se produce en la caldera.

Fuente: (Elaboración propia; FERNANDEZ et al, 2007 y DEL AGUILA et al, 2007)

El néctar de cocona tiene un calor específico promedio de:

$$C_{p(\text{Cocona})} = 3200 \text{ J/Kg}^\circ \text{C}$$

Se desea concentrar 25 Kg de este néctar desde 25°C hasta 100°C, en un tiempo de 2 horas. La pregunta sería: ¿Idealmente, cuánto de potencia se necesitaría para llevar a cabo esta operación?

Esta potencia ideal se calcularía de la siguiente forma:

$$P_{\text{Requerida}} = \frac{25 \times 3200 \times (100 - 25)}{7200} = 833.333 \text{ Watts}$$

La caldera produce 2.1 Kg de vapor en media hora, es decir el flujo de vapor

sería:  $\hat{m} = 4.2 \text{ Kg/h} = 0,001167 \text{ Kg/s}$

$$\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 2257 \times 10^3 \text{ J/Kg}. \text{ (Entalpía de vaporización del agua)}$$

Entonces, la potencia del vapor de la caldera sería igual al producto de su flujo

másico ( $\hat{m}$ ) con su entalpía ( $\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$ ), es decir:

$$P_{\text{Vapor}} = \hat{m} \lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 0,001167 \times 2257 \times 10^3 = 2633.17 \text{ Watts}$$

Como se demuestra  $P_{\text{Vapor}}$  es mayor que  $P_{\text{Requerida}}$ . En conclusión el vapor que produce la caldera podría utilizarse para concentrar cantidades cercanas a 25 Kg (20 a 35 Kg) de néctar de cocona.