

**DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN CICLO DE  
REFRIGERACIÓN BIFÁSICA CON BOMBA DE LÍQUIDO UTILIZANDO  
MICRO-CANALES.**

**LUIS HUMBERTO QUITIAN ARDILA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN CICLO DE  
REFRIGERACIÓN BIFÁSICA CON BOMBA DE LÍQUIDO UTILIZANDO  
MICRO-CANALES.**

**LUIS HUMBERTO QUITIAN ARDILA**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico.**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA**

**Ingeniero Mecánico, MS.c**

**Co-Director**

**GHERHARDT RIBATSKI**

**Ingeniero Mecánico, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTA DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	22
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	24
2. JUSTIFICACIÓN.....	26
3. OBJETIVOS.....	27
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	27
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
4. MARCO TEÓRICO.....	29
4.1. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADOS EN LOS CENTROS DE DATOS.....	29
4.1.1. <i>Enfriamiento por aire (Air cooling)</i> .....	29
4.1.2. <i>Enfriamiento por agua (Water cooling)</i> .....	30
4.1.3. <i>Refrigeración de dispositivos electrónicos con micro-canales y bomba de líquido</i> .....	32
4.2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	33
4.2.1. <i>Flujo bifásico</i> .....	33
4.2.2. <i>Fracción de vacío</i> .....	34
4.2.3. <i>Flujo crítico de calor</i> .....	34
5. MODELOS MATEMÁTICOS.....	37
5.1. INTRODUCCIÓN.....	37
5.2. PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN DE CANALES.....	37
5.3. PATRONES DE FLUJO.....	40
5.4. PERDIDA DE PRESIÓN.....	43
5.5. TRANSFERENCIA DE CALOR.....	46
5.5.1. <i>Coefficiente de transferencia de calor en la pared (<math>\alpha_w</math>)</i> .....	46
5.5.2. <i>Ebullición nucleada</i> .....	46

5.5.3. <i>Coeficiente de transferencia de calor por convección</i> .....	47
6. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON CAMBIO DE FASE EN MICRO-CANALES.....	50
6.1. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN.....	50
6.2. MODELAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO. ....	51
6.2.1. <i>Suposiciones del modelo computacional</i> .....	51
6.2.2. <i>Modelamiento del Micro-evaporador</i> .....	52
6.2.3. <i>Modelamiento del sistema de tuberías</i> . ....	58
6.2.4. <i>Modelamiento del Condensador</i> . ....	60
6.2.5. <i>Modelamiento de la Bomba de engranajes</i> . ....	61
6.2.6. <i>Modelamiento del acumulador de líquido</i> . ....	62
6.3. BANCO EXPERIMENTAL PARA LA VALIDACIÓN.....	64
6.3.1. <i>Descripción del circuito</i> .....	65
6.3.2. <i>Descripción del ciclo termodinámico</i> . ....	66
6.3.3. <i>Descripción de los componentes del banco experimental</i> .....	68
7. SIMULACIÓN.....	72
7.1. PLATAFORMA IMPLEMENTADA PARA LA SIMULACIÓN.....	72
7.2. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN. ....	72
8. VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL.....	76
8.1. VALIDACIÓN DE LOS ESTADOS ESTABLES DEL MICRO- EVAPORADOR.....	76
8.2. VALIDACIÓN DEL ESTADO TRANSITORIO DEL MICROO- EVAPORADOR.....	79
9. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.....	81
9.1. SIMULACIÓN DEL MICRO-EVAPORADOR BAJO DIFERENTES FLUCTUACIONES DE CALOR.....	81
9.2. SIMULACIÓN DEL SISTEMA ENFRIAMIENTO CON TODOS SUS DISPOSITIVOS.....	84

9.3. ANÁLISIS PUESTA EN MARCHA Y SUMINISTRO DE FLUJO DE CALOR DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO. ....	86
9.3. SIMULACIÓN DEL MICRO-EVAPORADOR A TRAVÉS DE SU LONGITUD.....	89
9.4 SIMULACIÓN DEL CONDENSADOR Y EL ACUMULADOR BAJO EFECTOS DEL CONTROLADOR. ....	98
10. CONCLUSIONES. ....	100
11. RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	104

## LISTA DE SÍMBOLOS.

<b>Símbolo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Unidades</b>
$S_{ME}$	Área.	$[m^2]$
$g$	Gravedad.	$[\frac{m}{s^2}]$
$D_h$	Diámetro hidráulico.	$[m]$
$L_{laplace}$	Longitud de Laplace.	$[m]$
$u_l$	Velocidad del líquido.	$[\frac{m}{s}]$
$u_v$	Velocidad del vapor.	$[\frac{m}{s}]$
$h_{FB}$	Coeficiente de transferencia de calor en la pared ( $\alpha_w$ ).	$[\frac{KW}{m^2K}]$
$h_{NB}$	Coeficiente de transferencia de calor por ebullición nucleada.	$[\frac{KW}{m^2K}]$
$h_{conv}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección.	$[\frac{KW}{m^2K}]$
$S$	Factor por ebullición nucleada.	$[-]$
$F$	Factor por velocidad de flujo.	$[-]$
$P_{red}$	Presión reducida.	$[Kpa]$
$M$	Masa molar.	$[\frac{Kg}{Kmol}]$
$q_{flux}$	Flujo de calor por unidad de área.	
$h_{vl}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección del líquido.	$[\frac{Kw}{Kg}]$
$h_{vv}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección del vapor.	$[\frac{Kw}{Kg}]$
$m_{tot}$	Flujo másico.	$[\frac{Kg}{s}]$
$C_p$	Calor específico.	$[\frac{J}{KgK}]$

---

<b><math>ME_{length}</math></b>	Longitud del micro evaporador en dirección z.	[mm]
<b><math>q_w</math></b>	Calor en la pared.	[KW]
<b><math>N_{canal}</math></b>	Número de canales.	[-]
<b><math>ME_{width}</math></b>	Longitud del micro evaporador en dirección x.	[mm]
<b><math>q_{ftp}</math></b>	Calor en la base de las aletas.	[KW]
<b><math>T_{amb}</math></b>	Temperatura ambiente.	[ °C]
<b><math>T_{prom}</math></b>	Temperatura promedio.	[°C]
<b><math>Cw</math></b>	Ancho del canal.	[mm]
<b><math>Ch</math></b>	Altura de las aletas.	[mm]
<b><math>n_f</math></b>	Eficiencia de la aleta.	[-]
<b><math>F_w</math></b>	Ancho de las aletas.	[mm]
<b><math>T_{ftp}</math></b>	Temperatura en la base de la aleta.	[°C]
<b><math>K</math></b>	Conductividad térmica	$\left[ \frac{W}{mK} \right]$

---

## LETRAS GRIEGAS.

<b>Símbolo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Unidades</b>
$\sigma$	Tensión superficial	[N/m]
$\rho_l$	Densidad del líquido	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
$\rho_v$	Densidad del vapor	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
$\rho_{lv}$	Densidad bifásica	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
$\mu_l$	Viscosidad del líquido	[Pa.s]
$\mu_v$	Viscosidad del vapor	[Pa.s]
$\mu_{lv}$	Viscosidad bifásica	[Pa.s]
$\theta$	Inclinación de los canales	[°]
$\alpha_{ftp}$	Coeficiente de transferencia de calor en la base de las aletas.	

---

## SUBÍNDICES.

<b>Símbolo</b>	<b>Nomenclatura</b>
<i>v</i>	Líquido
<i>l</i>	Vapor
<i>lv</i>	Bifásico

## NÚMEROS ADIMENSIONALES.

<b>Símbolo</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Ecuación</b>
$Co$	El número de confinamiento	$\frac{L_{Laplace}}{D_h}$
$E_o$	El número Eötvos	$\frac{(\rho_l - \rho_v)gD_h^2}{\sigma}$
$\varepsilon$	Fracción de vacío	$\left( \frac{x \rho_l}{(1-x)\rho_v + x \rho_l} \right)$
$Pr_l$	Numero de prandtl del líquido	$\frac{Cp * \mu_l}{K_l}$
$Pr_v$	Numero de prandtl del vapor	$\frac{Cp * \mu_v}{K_v}$
$f_l$	Factor de fricción del líquido	$\frac{0.079}{Re_l^{0.25}}$
$f_v$	Factor de fricción del vapor	$\frac{0.079}{Re_v^{0.25}}$
$Re_l$	Numero de Reynolds del líquido	$\frac{G * D_h}{\mu_l};$
$Re_v$	Numero de Reynolds del vapor	$\frac{G * D_h}{\mu_v};$
$Bi$	Numero de Biot	$\frac{h L}{K}$
$x$	Calidad del vapor	-

## LISTA DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 1. Rangos de temperatura y húmeda de un centro de datos. ....	31
Tabla 2. Referencias de los modelos utilizados en la simulación. ....	38
Tabla 3. Datos geométricos del micro-evaporador. ....	54
Tabla 4. Geometría de la tubería a la entrada y salida de los micro- evaporadores.....	55
Tabla 5. Geometría de las tuberías.....	58
Tabla 6. Condiciones de operación.....	77

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Gráfico del coeficiente de transferencia de calor en diferentes caudales máxicos. La región de flujo bifásico contiene el punto máximo de coeficiente de transferencia de calor. ....	22
Figura 2. Comportamiento dinámico del flujo bifásico en un tubo con cambio de calor por convección y con flujo de calor uniforme a través de la pared .....	23
Figura 3 Distribución del consumo de energía en un Data Center.....	25
Figura 4. Sistemas de refrigeración de precisión por piso falso.....	30
Figura 5. Sistema de refrigeración de precisión por agua.....	32
Figura 6. Sistema de disipación de calor en microprocesadores.....	33
Figura 7. Variación del coeficiente de transferencia de calor impuesta a una pared con flujo de calor con diferentes medidas de calidad de vapor.....	36
Figura 8. Transiciones entre micro- y macro-escala según los estudios realizados para R-134a para temperatura de saturación de 31 °C. ....	40
Figura 9. Clasificación de los patrones de flujo.....	41
Figura 10. Comportamiento de la pérdida de presión por fricción en función de la carga térmica. ....	45
Figura 11. Ciclo de refrigeración tomado como base para el modelo computacional.....	51
Figura 12. Modelo tridimensional del micro-evaporador simulado; a. Geometría y especificaciones y b. dimensiones de aletas y balances de calores sobre el canal. ....	53
Figura 13. Diagrama de distribución de la tubería a la entrada y salida del micro-evaporador (MEs) .....	54
Figura 14. Diagrama de volumen de control de los micro-evaporadores.....	56
Figura 15. Diagrama de volumen de control del condensador.....	60
Figura 16. Diagrama del volumen de control de la bomba de engranaje.....	61
Figura 17. Balance de flujos del acumulador de líquido.....	63

Figura 18. Banco experimental para el estudio de la ebullición convectiva en multi-micro-canales.....	65
Figura 19. Diagrama esquemático del circuito principal del banco experimental. ....	67
Figura 20. Diagrama P-H del circuito principal para unas condiciones de sub-enfriamiento del R-134a.....	68
Figura 21. Interfaz gráfica de Labview de National Instruments .....	71
Figura 22. Discretización para la modelación unidimensional de los componentes del ciclo de refrigeración.....	73
Figura 23 Discretización para la modelación bidimensional del micro-evaporador.....	74
Figura 24. Esquema del flujo de procesos de la simulación. ....	75
Figura 25. Validación de la calidad del vapor en estado estable. ....	78
Figura 26. Validación de la temperatura del chip en el micro-evaporador 1 en estado estable.....	78
Figura 27. Validación de la temperatura del chip en el micro-evaporador 2 en estado estable.....	79
Figura 28. Validación de la calidad del vapor. ....	80
Figura 29. Variación de los flujos de calor utilizados en la simulación como perturbaciones. ....	82
Figura 30. Perfiles de temperatura, caída de presión y calidad del vapor en estado transitorio. ....	83
Figura 31. Perfiles coeficiente de transferencia de calor en estado transitorio. ....	84
Figura 32. Entalpia del sistema en cada posición del ciclo de refrigeración. ....	85
Figura 33. Perfiles de temperatura, caída de presión y calidad del vapor en con el modelo del micro-evaporador, puesta en marcha. ....	87
Figura 34. Perfiles de coeficiente de transferencia de calor en con el modelo del micro-evaporador, puesta en marcha. ....	88
Figura 35. Perfiles de temperatura, caída de presión y calidad del vapor en con el modelo del micro-evaporador, con flujo de calor.....	88
Figura 36. Perfiles de coeficiente de transferencia de calor en con el modelo del micro-evaporador, con flujo de calor.....	89

Figura 37. Perfil del coeficiente de transferencia de calor, bajo perturbaciones de flujos de calor en el modelo de simulación del micro-evaporador, para diferentes instantes de tiempo. ....	90
Figura 38. Perfil de temperatura, bajo perturbaciones de flujos de calor en el modelo de simulación del micro-evaporador, para diferentes instantes de tiempo. ....	90
Figura 39. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de $t=0,2$ s. ....	92
Figura 40. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de $t=0,2$ s. ....	92
Figura 41. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de $t=0,3$ s. ....	93
Figura 42. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de $t=0,3$ s. ....	93
Figura 43. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de $t=1,8$ s. ....	94
Figura 44. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de $t=1,8$ s. ....	94
Figura 45. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de $t=6,6$ s. ....	95
Figura 46. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de $t=6,6$ s. ....	95
Figura 47. Perfil de temperatura y eficiencia de aleta en estado estable en ambos micro-evaporadores. ....	97
Figura 48. Perfil coeficiente de transferencia de calor en estado estable en ambos micro-evaporadores. ....	97
Figura 49. Perfil de temperatura, calidad del vapor y coeficiente de transferencia de calor en estado estable en micro-condensador.....	98
Figura 50. Perfil de presión, flujo másico de agua en el condensador y masa de refrigerante en el acumulado de líquido en condiciones de control. ....	99

## **LISTA DE ANEXOS.**

ANEXO A. DATOS DEL BANCO EXPERIMENTAL

ANEXO B. DATOS DE LA SIMULACION.

ANEXO C. DATOS DE VARIACIÓN EN LA POSICIÓN DEL MICRO-  
EVAPORADOR

## GLOSARIO

**Rack:** El soporte metálico destinado a alojar equipamiento electrónico, informático y de comunicaciones.

**Blade server:** Es un tipo de computadora para los centros de proceso de datos específicamente diseñado para aprovechar el espacio, reducir el consumo y simplificar su explotación.

**DataCenter:** Es una instalación utilizada para albergar sistemas informáticos y componentes asociados, como sistemas de telecomunicaciones y almacenamiento.

## RESUMEN

**TÍTULO:** “DESARROLLO DE UNA SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN CICLO DE REFRIGERACIÓN BIFÁSICA CON BOMBA DE LÍQUIDO UTILIZANDO MICRO-CANALES.”\*

**AUTOR:** LUIS HUMBERTO QUITIAN ARDILA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Micro-canales, Refrigeración de Precisión, Presión, Temperatura, Microprocesadores.

### DESCRIPCIÓN:

Este documento presenta el desarrollo de una simulación dinámica unidimensional y bidimensional realizada para conocer el comportamiento de las propiedades termodinámicas como lo son la temperatura, la presión, la calidad del vapor y el coeficiente de transferencia de calor en flujo bifásico a través de micro-canales, bajo la influencia de fluctuaciones de flujo de calor variable y constantes, utilizado refrigerante R134a (1,1,1,2 Tetrafluoroetano), para el enfriamiento de microprocesadores.

Los resultados obtenidos mediante la simulación dinámica computacional fueron validados con datos experimentales obtenidos a través de un banco experimental ubicado en la escuela de ingeniería de Sao Carlos, los cuales arrojaron que las correlaciones utilizadas en la respectiva simulación tiene un error del  $\pm 18$  % en propiedades como lo son la temperatura y la calidad del vapor.

A través de la simulación por diferencias finitas a lo largo de la longitud del micro-evaporador y en diferentes instantes de tiempos, se pudo evidenciar que la zona amortiguamiento conformada por materiales conductores ayuda a que el flujo de calor generado sea distribuido de manera uniforme en toda la longitud y además que se garantice el flujo crítico de calor (CHF).

Los valores del coeficiente de transferencia de calor obtenidos a lo largo de la región bifásica son altamente favorable para el rechazo de calor de los microprocesadores obteniendo valores de hasta  $17000 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$ , conservando el rango de temperatura óptima para su funcionamiento de 47 a 50 °C y logrando a través del ciclo de refrigeración ahorros energéticos en el consumo de potencia.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Armando Gelvez Arocha

## ABSTRACT

**TITLE:** "DEVELOPING A DYNAMIC SIMULATION OF A TWO-PHASE REFRIGERATION CYCLE WITH A LIQUID PUMP USING MICROCHANNELS.\*"

**AUTHOR:** LUIS HUMBERTO QUITIAN ARDILA \*\*

**KEY WORDS:** Microchannels, Precision Cooling, Pressure, Temperature, Microprocessors.

### DESCRIPTION:

This paper presents the development of a one-dimensional and two-dimensional dynamic simulation performed to know the behavior of thermodynamic properties such as temperature, pressure, steam quality and heat transfer coefficient in two-phase flow through micro-channels, Under the influence of fluctuations of variable and constant heat flux, used refrigerant R134a (1,1,1,2 Tetrafluoroethane), for the cooling of microprocessors.

The results obtained by dynamic computational simulation were validated with experimental data obtained through an experimental bank located in the Engineering School of São Carlos, which showed that the correlations used in the respective simulation have an error of  $\pm 18\%$  in properties such as temperature and steam quality.

Through the simulation by finite differences along the length of the micro-evaporator and at different times of time, it was possible to show that the damping zone formed by conductive materials helps that the generated heat flux is evenly distributed in the entire length and also that the Critical Heat Flux (CHF).

The values of the heat transfer coefficient obtained along the Two-phase region are highly advantageous for the heat rejection of the microprocessors obtaining values of up to  $17000 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ , maintaining the optimum temperature range for its operation from 47 to 50 °C and achieving through the cooling cycle energy savings in power consumption.

---

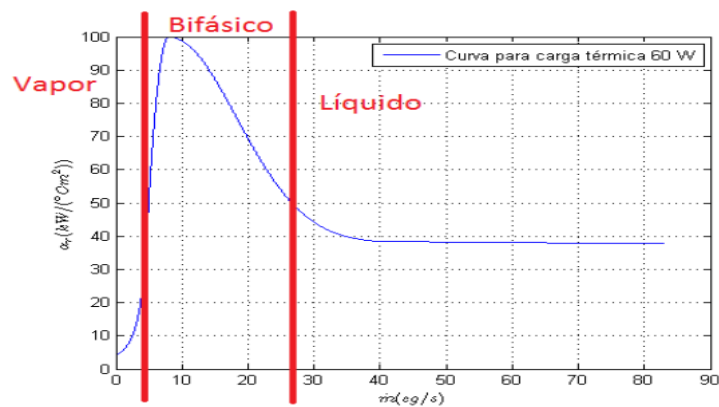
\* Graduation thesis

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Omar Armando Gelvez Arocha

## INTRODUCCIÓN.

Las aplicaciones industriales, que requieren de altas tasas de transferencia de calor como son los circuitos de refrigeración electrónica, intercambiadores de calor en la industria del petróleo, bioingeniería, aeroespacial, reactores, calderas, risers verticales en plantas geotérmicas, etc. pueden beneficiarse del empleo del proceso que involucre cambio de fase del fluido gracias al calor transferido, según Shoham (2006), esto es debido a la evaporación y a la configuración de la interfaz líquido -vapor, que garantizan coeficientes de transferencia de calor altos como se puede observar en la figura 1 donde para un flujo de calor constante de 60 [W], a bajos caudales se produce cambio de fase y un alto coeficiente de transferencia de calor.

Figura 1. Gráfico del coeficiente de transferencia de calor en diferentes caudales máscicos. La región de flujo bifásico contiene el punto máximo de coeficiente de transferencia de calor.



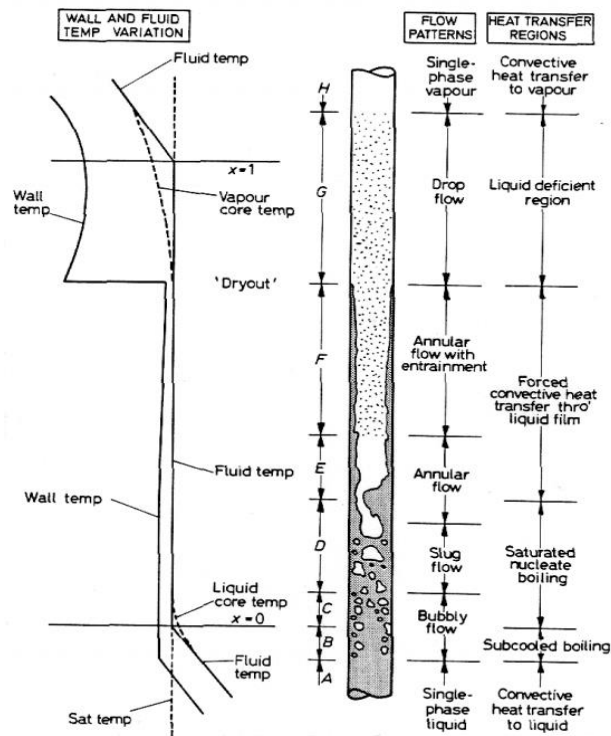
Fuente. Rafael Jose Gonçaves Pereira, Controle ativo de um sistema de refrigeração bifásico, Rio de Janeiro, pag. 6, março de 2015.

El movimiento del fluido que cambia de fase (flujo bifásico), se puede realizar en conductos de sección circular o canales de gran variedad de tamaños, con los cuales se pueden obtener mayor área de transferencia a un volumen menor, esta

característica ha hecho que los micro-canales tomen fuerza en la industria del enfriamiento de microprocesadores para remover las cargas generadas por su funcionamiento.

Conocer el comportamiento de los flujos bifásicos dentro de los micro-canales para su mayor aprovechamiento es una tarea ardua, ya que los fluidos en pequeñas secciones de área de flujo son altamente variable. En la figura 2, se muestra las diferentes fases por la cual un fluido refrigerante pasa de ser líquido (A) a vapor (H), presentando cambios en sus propiedades termodinámicas.

Figura 2. Comportamiento dinámico del flujo bifásico en un tubo con cambio de calor por convección y con flujo de calor uniforme a través de la pared.



Fuente. Corradini, (1997).

Se desarrolló una simulación dinámica y su respectiva validación para conocer las variaciones de las diferentes propiedades termodinámicas que puedan servir para la implementación de sistema de refrigeración con micro-canales y bomba de líquido.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

La creciente demanda informática de los últimos años a desencadenado consumos energéticos mayores, por el uso de sistemas de refrigeración convencionales como son los enfriados por aire y agua, los cuales son utilizados en microprocesadores y dispositivos electrónicos auxiliares.

Los centros de datos son las instalaciones donde se agrupan los microprocesadores, están constituido por varios estantes, que requieren de la eliminación de su carga térmica de forma instantánea, para garantizar una temperatura de funcionamiento entre los 40 y 55 ° C.

Un caso típico es un servidor que consume entre 250 y 500 [W], y 40 de ellos agrupados en un estante (rack), pueden absorber entre 10 y 20 [KW] y producir entre 35.000 y 70.000 BTUs de carga sensible. Esto requiere entre 3 y 6 toneladas de refrigeración por estante de microprocesadores. En comparación, está es la misma cantidad de enfriamiento que hace cinco años se especificaba para una sala de datos entre 18.5 y 37 metros cuadrados con 10-15 racks.

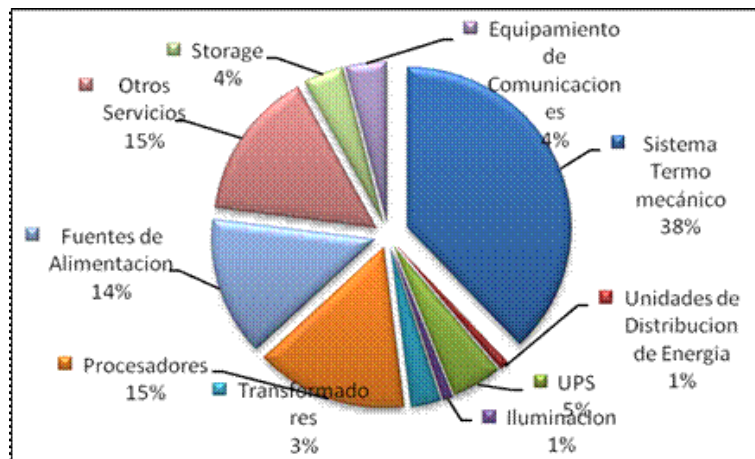
Actualmente la necesidad de evacuar grandes cargas sensibles y controlar la carga latente dentro de estos recintos, han generado que se requieran de consumos energéticos para su refrigeración de aproximadamente 38%, como se muestra en la figura.3; Siendo este el foco más crítico en toda la instalación.

Se evidencia que los sistemas tradicionales de refrigeración para *“Los Data Centers utilizaron poco más del 1% de toda la electricidad consumida de Estados Unidos entre 2005 y 2010, según un estudio publicado recientemente por una Universidad de California, por Jonathan G. Koomey de 2011.”*<sup>†</sup>. Pero estas cifras son posibles de disminuir gracias a la nueva tecnología de enfriamiento por micro-canales y bomba de líquido, ya que el consumo de potencia puede ser aún menor.

---

<sup>†</sup> **Virginia Toledo** – Data Center Dynamics, “EL CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA DE LOS DCS SE RALENTIZA”. August 2 of 2011. Disponible en: <http://www.datacenterdynamics.es/node/50413>

Figura 3 Distribución del consumo de energía en un Data Center.



Fuente: [En línea]. [Citado 5/08/2016]. Disponible en:  
URL:<http://www.datacenterdynamics.es/focus/archive/2012/03/diez-aspectos-fundamentales-tener-en-cuenta-para-construir-un-datacenter>

Es así que surge un gran interés por reducir la energía consumida y conocer el comportamiento de las propiedades termodinámicas de los sistemas de refrigeración bifásica con micro-canales.

## **2. JUSTIFICACIÓN.**

Actualmente la preocupación más grande de las empresas que se dedican a la distribución y manejo de Datos como Google, Facebook, etc. es consumo energético, porque estas industrias diseñan sus sistemas de refrigeración con aproximaciones conservativas en propiedades como la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor, que conllevan a utilizar equipos sobredimensionados con demandas energéticas aún mayores, con el fin de proporcionar funcionamiento en todos los dispositivos electrónicos. Brindando al consumidor rapidez y accesibilidad a mucha información que se encuentran en el internet.

Es así que la realización de un modelo transitorio de un sistema de refrigeración bifásica con micro-canales ayudará a comprender aún más la importancia de cada una de las variables que influyen en el diseño e implantación de sistemas más compactos que utilizan bomba de líquido en vez de compresores de vapor, apoyado bajo los modelos matemáticos y correlaciones desarrolladas a lo largo de los años, conociendo condiciones satisfactorias y de mayor rendimiento termodinámicos, dando solución a la industria de los centros de datos.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

En concordancia con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander de; fomentar una cultura enfocada al desarrollo de procesos investigativos que permitan generar alternativas de reducción de consumo energético en los centros de datos, mediante el desarrollo de un modelo dinámico de un sistema de refrigeración bifásico con bomba de líquido utilizando micro-canales, implementando la herramienta computacional Matlab®.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo transitorio en Matlab que permita la simulación de un ciclo de refrigeración bifásico con bomba de líquido utilizando micro-canales el cual contará con los siguientes componentes:

**Micro-Evaporador:** se encargará de transferir el calor generado por el microprocesador al refrigerante, el cual tiene una geométrica basada en micro canales y trabajara bajo la base del CHF (Critical Heat Flux) para el control de la calidad del vapor.

**Bomba variable de líquido:** Suministrar la tasa de flujo másico que circulará en el sistema.

**Una servo-válvula:** Se encargará de regular el caudal de líquido para establecer valores de la calidad del vapor a la salida de cada micro-evaporador esta tendrá valores entre 0% (líquido saturado) y 100% (vapor saturado).

**Condensador:** Disipar calor transportado por el refrigerante por medio de un intercambiador de calor en contracorriente concéntrico.

**Acumulador de líquido:** Garantiza que sólo llegue líquido saturado a la entrada de la bomba, independiente de los cambios en carga térmica.

**Tubo de calor:** Ayuda a la condensación de la mezcla de vapor a la salida del micro-evaporador.

- Realizar la validación de la temperatura del microprocesador y la calidad del vapor obtenidos mediante la simulación en estado estable y transitorio, a través del banco experimental del laboratorio de sistemas térmicos, de la escuela de ingeniería mecánica de São Carlos.
  
- Analizar el comportamiento de la temperatura, la presión, la calidad del vapor de la mezcla y el coeficiente de transferencia de calor, bajo la variación de flujo de calor uniforme y no uniforme a través de la simulación transitoria del sistema de enfriamiento.
  
- Estudiar la variación del coeficiente de transferencia de calor y la temperatura a lo largo de la longitud del micro-evaporador.

## **4. MARCO TEÓRICO.**

### **4.1. SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADOS EN LOS CENTROS DE DATOS.**

La refrigeración es un proceso que consiste en bajar o mantener el nivel de energía interna de una sustancia dentro de un espacio cerrado. Está ligada a la remoción de calor de un cuerpo transfiriéndolo a otro, en este proceso el calor siempre fluye de la sustancia con temperatura más alta a la de menor temperatura.

Existen 2 sistemas de enfriamiento utilizados para la refrigeración de centros de datos, los cuales han predominado en el mercado gracias a la experiencia obtenida por su implementación a través de los años, pero ahora se están viendo formas de ser remplazados por sistemas que tengan menores pérdidas energéticas.

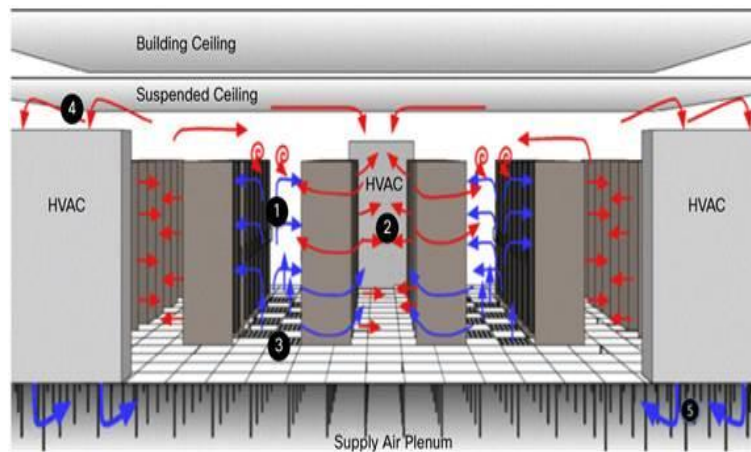
#### **4.1.1. Enfriamiento por aire (Air cooling).**

El sistema de enfriamiento por aire (air cooling) es la instalación más común hoy día en los centros de datos. Existen diversas técnicas para provechar las capacidades del aire frío, la más utilizada es la refrigeración de precisión por piso falso, que esta conformada de unidades manejadoras que enfrían el aire tomado de las salas principales donde se encuentran los microprocesadores, el cual será impulsado a través de los mismo desde un piso falso direccionado el aire frío de manera que llegue a los dispositivos electrónicos y por convección disipar el calor generado, tal como se ve en la figura 4.

Estos sistemas funcionan bajo condiciones de operación descritas por la ASHRAE y están dadas en tabla 1, provocando que sean ineficiente

térmicamente, además que requieran de unidades de gran tamaño lo que implica altos costos iniciales y consumos excesivos de energía.‡

Figura 4. Sistemas de refrigeración de precisión por piso falso.



Fuente: [En línea]. [Citado: 21/12/2016]. Disponible en internet: <URL[http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-computing/white\\_paper\\_c11-680202.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/data-center-virtualization/unified-computing/white_paper_c11-680202.html)>

#### 4.1.2. Enfriamiento por agua (Water cooling).

Un método más complejo y menos común es la refrigeración por agua. El agua tiene un calor específico más alto y una mejor conductividad térmica que el aire, gracias a lo cual puede transferir calor más eficientemente y a mayores distancias que el gas. Bombeando agua alrededor de un procesador es posible remover grandes cantidades de calor de éste en poco tiempo, para luego ser disipado por un condensador ubicado en algún lugar dentro (o fuera) del centro de datos. La principal ventaja de la refrigeración líquida, es su habilidad para enfriar componentes con temperaturas aún más altas hasta unos 100°C.

‡ Mission Critical Facilities, Data Centers, Technology Spaces and Electronic Equipment ASHRAE Technical Committee 9.9 disponible en: [https://tc0909.ashraetcs.org/documents/ASHRAE\\_Extended\\_Environmental\\_Envelope\\_Final\\_Aug\\_1\\_2008.pdf](https://tc0909.ashraetcs.org/documents/ASHRAE_Extended_Environmental_Envelope_Final_Aug_1_2008.pdf)

Tabla 1. Rangos de temperatura y húmeda de un centro de datos.

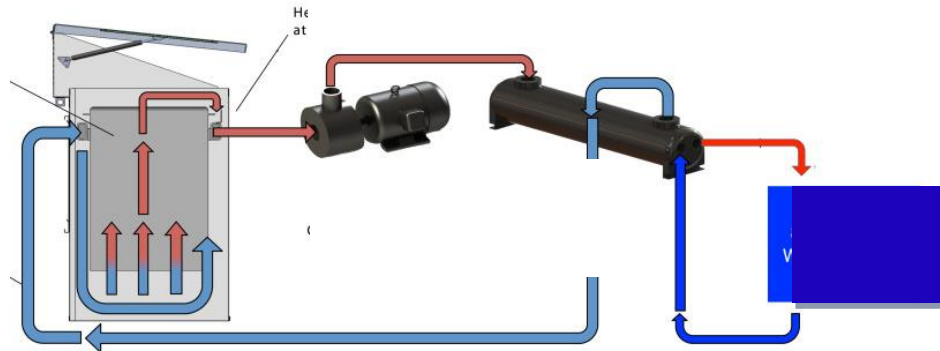
TEMPERATURA DE BAJA	<b>64.4°F (18°C)</b>
TEMPERATURA DE ALTA	80.6°F (27°C)
HUMEDAD MÁS BAJA	40% humedad relativa y 41.9°F (5.5°C) punto de rocío
HUMEDAD MÁS ALTA	60% humedad relativa y 59°F (15°C) punto de rocío

Fuente: Rangos de temperaturas recomendados por la American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Technical Committee 9.9.

Sin embargo, la refrigeración por agua es cara, compleja e incluso peligrosa puesto que el agua y los componentes electrónicos no son buena pareja.

Una instalación común como se observa en la figura 5, compuesta de una fuente de agua, intercambiadores de gran tamaño, compresores de tornillo y bombas, la cual hacer fluir agua a baja temperatura sobre los microprocesadores removiendo el calor y luego transfiriéndolo a otro fluido.

Figura 5. Sistema de refrigeración de precisión por agua.



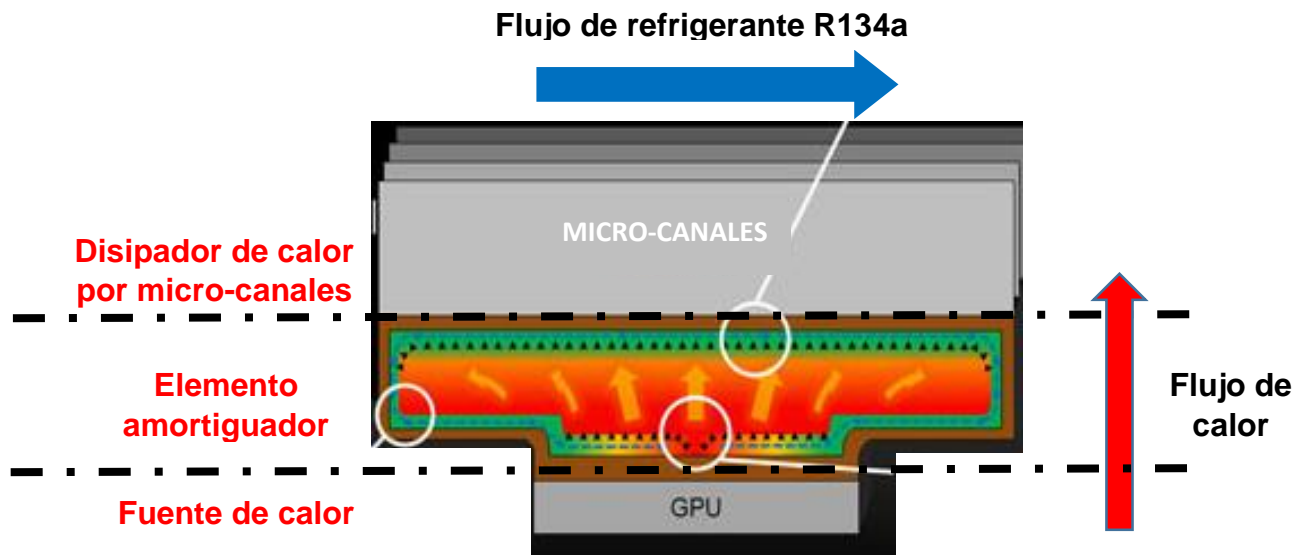
Fuente: [en línea]. [Citado: 21/12/2016]. Disponible en internet:  
URL:<http://adrenaline.uol.com.br/2010/11/09/19909/nvidia-geforce-gtx-580/>

#### 4.1.3. Refrigeración de dispositivos electrónicos con micro-canales y bomba de líquido.

Hannemann et al. [6] propusieron un sistema de enfriamiento multi-fásico de líquido bombeado para enfriar procesadores y dispositivos de Alta Gama como son conmutadores de telecomunicación, arrays de láser de alta energía y radares de alta potencia. Este sistema de enfriamiento basado en el cambio de fase en canales es muy efectivo por su alto coeficiente de transferencia de calor.

Los dispositivos electrónicos generan calor a causa de la resistencia del flujo de corriente eléctrica, provocando aumentos de temperatura, para la solución de este problema se utilizaron disipadores de calor basados en la evaporización de un líquido en micro-canales (micro-evaporadores). La configuración general de un sistema de este tipo tiene 3 elementos principales, una fuente de calor en este caso el microprocesador (GPU), un elemento amortiguador compuesto de materiales conductores (silicona, metal líquido y cobre). Y un disipador de calor conformado por micro-canales, por donde fluye refrigerante, transportando así el calor removido del microprocesador, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Sistema de disipación de calor en microprocesadores.



Fuente. [En línea]. [Citado 15/09/2016]. Disponible en internet: URL:<http://adrenaline.uol.com.br/2010/11/09/19909/nvidia-geforce-gtx-580/>. Modificado por el autor.

El elemento amortiguador permite que el flujo de calor liberado por el microprocesador no sea transportado instantáneamente a los microcanales, regulando el calor liberado por el microprocesador para que sea transferido en la cantidad adecuada, para evitar una evaporización parcial y formación de paredes secas, provocando disminución del coeficiente de transferencia de calor.

El ciclo de enfriamiento total por el anterior elemento descrito llamado micro-evaporador, un condensador de flujo contracorriente, un tubo de calor, una válvula de motor paso a paso para la regulación del flujo másico, un acumulador de líquido y como sistema de impulsión una bomba de engranajes.

## 4.2. CONCEPTOS BÁSICOS

### 4.2.1. Flujo bifásico

Cuando se habla de fase, se hace referencia al estado termodinámico de una sustancia que puede ser, sólido, líquido o gaseoso. Cuando se tienen dos fases

de una misma sustancia o un fluido bi-componente (por ejemplo, agua en fase líquida y aire) fluyendo simultáneamente se pueden decir que se presenta flujo bifásico.

#### **4.2.2. Fracción de vacío.**

Es la fracción del volumen o de la sección transversal de la tubería ocupada por la fase gaseosa. Es un parámetro muy importante en el flujo bifásico porque a partir de él es posible determinar el valor de otras variables como la velocidad de cada una de las fases, la densidad y la viscosidad promedio de la mezcla, entre otras.

#### **4.2.3. Flujo crítico de calor.**

La condición de flujo crítico de calor (CHF) se caracteriza por una fuerte reducción del coeficiente de transferencia de calor local como resultado de la sustitución del líquido por el vapor adyacente a la superficie de transferencia de calor [5]

La condición de CHF puede ser de diferente naturaleza. A baja calidad de vapor, es asociada con una ebullición sub-enfriada y a alta calidad de vapor a una ebullición saturada causado por el repentino secado las paredes de la superficie de transferencia dejando sin película de líquido sobre la pared del tubo o canal. Normalmente esto ocurre bajo un patrón de flujo anular, donde las inestabilidades de onda de superficie y la vaporización, generan una gran cantidad de burbujas de vapor sobrecalentadas provocando una ebullición saturada.

El flujo de calor máximo representa el límite que no puede ser sobrepasado. Si el CHF es alcanzado, las consecuencias sobre los componentes son dramáticas, ya que significa que las paredes calentadas se vuelven completamente secas. Este fenómeno irrevocable conduce a un aumento muy rápido de la temperatura, debido a una disminución repentina del coeficiente de transferencia de calor.

En la figura 7 se evidencia que a medida que aumenta la calidad de la mezcla ocurre disminución de la transferencia de calor por consecuencia del CHF y mientras mayor sea el flujo de calor mayor es el decrecimiento del coeficiente de transferencia de calor.

La correlación Ong y Thome (2011) es utilizada para el cálculo del flujo máximo de calor (CHF)<sup>§</sup>

(4.1)

$$\frac{q_{CHF}}{G h_{lv}} = 0.12 \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.062} We^{0.141} \left( \frac{L_h}{d} \right)^{-0.7} \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.183} \left( \frac{d}{d_h} \right)^{0.11}$$

$q_{CHF}$  = Flujo crítico de calor

$h_{lv}$  = Coeficiente de transferencia de calor bifásico

$G$  = Flujo de masa

$\rho_l$  = Densidad del líquido

$\rho_v$  = Densidad del vapor

$W$  = Flujo másico total por los canales

$L_h$  = Longitud hidráulica

$d$  = Diámetro característico o altura del canal

$\mu_l$  = Viscosidad del líquido

$\mu_v$  = Viscosidad del vapor

$d_h$  = Diámetro hidráulico

Donde se tiene los siguientes errores por parte de esta correlación.

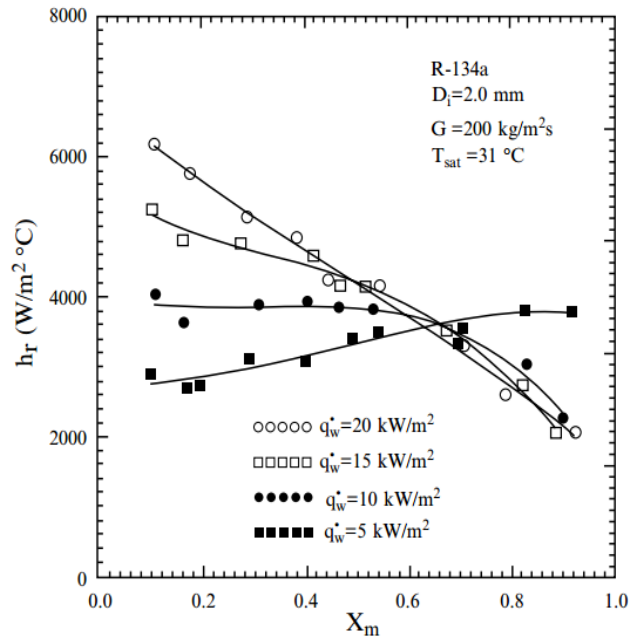
- Números de puntos 21.
- Porcentaje de error de los datos 30%
- Banda 94.4 %

---

<sup>§</sup> Springer International Publishing Switzerland 2015 13 S.K. Saha, G.P. Celata, Critical Heat Flux in Flow Boiling in Microchannels, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, DOI 10.1007/978-3-319-17735-9\_2

- Medida del error absoluto 13,6%

Figura 7. Variación del coeficiente de transferencia de calor impuesta a una pared con flujo de calor con diferentes medidas de calidad de vapor.



Fuente. Jackson Braz Marcinichen, Jonathan A. Olivier, Vinicius de Oliveira, John R. Thome. A review of on-chip micro-evaporation: Experimental evaluation of liquid pumping and vapor compression driven cooling systems and control.

## 5. MODELOS MATEMÁTICOS.

### 5.1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se abordarán los aspectos más importantes relacionados con la ebullición convectiva en el interior de micro-canales, con base al estudio de un único canal. Inicialmente se hablará sobre los parámetros para clasificar a los canales, en seguida serán descritos los métodos para la determinación de la pérdida de presión y la transferencia de calor durante la ebullición convectiva en un micro-canal.

En la tabla 2 se muestran algunas referencias bibliográficas de las correlaciones utilizadas en este estudio.

### 5.2. PARÁMETROS PARA LA CLASIFICACIÓN DE CANALES.

Existen muchos criterios y nomenclaturas distintas para la clasificación de los canales con ebullición convectiva en el interior. Los distintos parámetros han sido propuestos para la consideración de los métodos de fabricación según sus aplicaciones, estos están basados en aspectos de la transferencia de calor y la mecánica de fluidos.

Kew y Cornwell (1997) propusieron un criterio basado en el número de confinamiento  $C_o$ , dado por la relación entre el diámetro de desprendimiento de una burbuja en un medio infinito (longitud de Laplace) y el diámetro hidráulico del canal.

(5.1)

$$C_o = \frac{L_{Laplace}}{D_h}$$

Donde tenemos que  $L_{Laplace}$  es la longitud de Laplace y está dada por:

(5.2)

$$L_{Laplace} = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}$$

Tabla 2. Referencias de los modelos utilizados en la simulación.

### **MODELOS Y CORRELACIONES IMPLEMENTADAS EN LA SIMULACIÓN**

<i>Caída presión por fricción Monofásico.</i>	<b>Petukhov [14]</b>
<i>Caída presión por fricción bifásica.</i>	<b>Homogeneous model with Cicchitti et al. [15] viscosity</b>
<i>Cabeza de caída de presión en la entrada.</i>	<b>Costa-Patry [16] using Idel'cik correlation [17]</b>
<i>Cabeza de caída de presión en la salida monofásico.</i>	<b>Collier and Thome [18]</b>
<i>Cabeza de caída de presión en la salida bifásico.</i>	<b>Costa-Patry [16] using Collier and Thome correlation [18]</b>
<i>Mezcla y distribución de caída de presión en tuberías.</i>	<b>Idel'cik [17]</b>
<i>Coefficiente de transferencia de calor monofásica.</i>	<b>Shah [19] (laminar) and Gnielinski [20] (turbulent)</b>
<i>Coefficiente de transferencia de calor bifásica.</i>	<b>Bertsch et al. [11]</b>
<i>Flujo crítico de calor (CHF)</i>	<b>Ong and Thome [21]</b>

Fuente: Two-Phase Flow Control of Electronics Cooling With Pseudo-CPU's in Parallel Flow Circuits: Dynamic Modeling and Experimental Evaluation. Modificada por el autor.

Procedimiento similar fue dado por Triplett et al. (1999) que consideraba los micros-canales como aquellos que poseían un diámetro hidráulico igual o inferior a la longitud de Laplace.

Más adelante Kandlikar y Grand (2003) clasificaron como canales convencionales aquellos con diámetro hidráulico superiores a ( $D_h > 3\text{mm}$ ). Los mini-canales fueron considerados aquellos cuya dimensión diametral estén entre ( $200\mu\text{m} < D_h < 3\text{mm}$ ) que son típicos de intercambiadores de calor compactos y son manufacturados con técnicas convencionales. Los micro-canales fueron denominados aquellos con diámetros entre 10 y  $200\mu\text{m}$ .

Según estudios del flujo del fluido, Ullman y Brauner (2006) indicaron que el número de Eötvos es de elevada importancia en la determinación del comprimento característico\*\* en el flujo de diferentes fases del fluido. El número Eötvos relaciona los efectos gravitacionales y tensión superficial, está dado por:

(5.3)

$$E_o = \frac{(\rho_l - \rho_v)gD_h^2}{\sigma} = \frac{1}{Co^2}$$

De esta forma según criterio de Ullman y Brauner (2006), dan una condición de micro escala corresponden a  $Co \geq 1,26$

En la figura 8, se puede observar diferentes criterios para la clasificación de los canales trabajando con refrigerante R134a a una temperatura de saturación de  $31^\circ\text{C}$ , se muestra que gran parte de los estudios consideran que los micro-canales están entre los 10 y  $100\mu\text{m}$ .

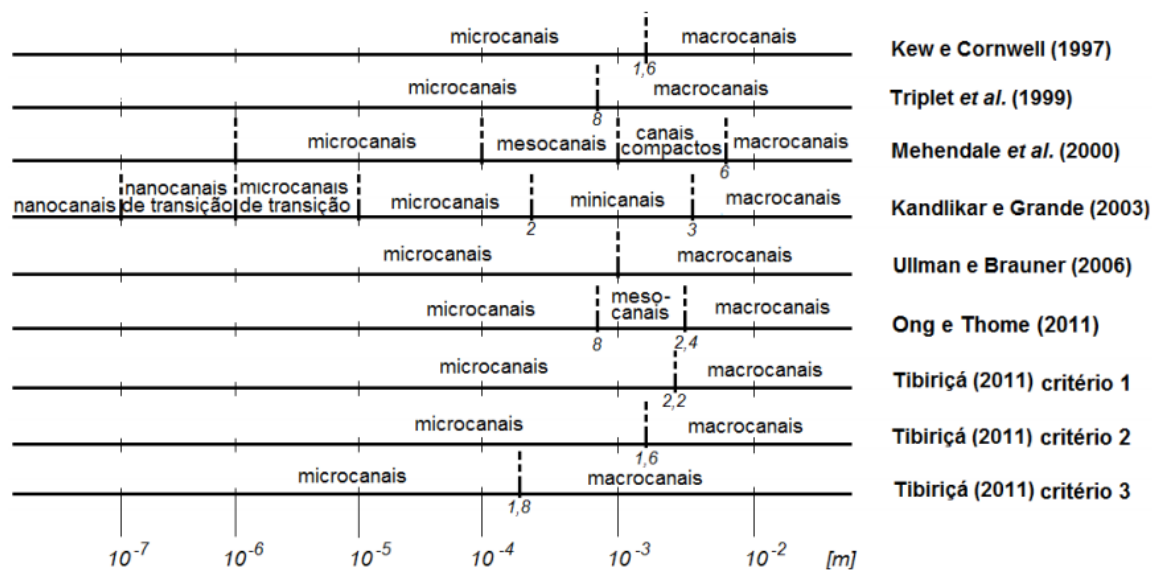
Considerar aspectos relacionados con los intercambiadores de calor, hace necesarios que los fenómenos físicos dependiendo de las dimensiones del canal se generen comportamientos diferentes para la transferencia de calor, la pérdida de presión y el flujo críticos de calor. Por consiguiente, para efectos de la descripción de la literatura y en la ausencia de un criterio definitivo, en el presente

---

\*\* El comprimento característico define la escala de un sistema físico. Es utilizado para calcular números adimensionales como el número de Reynolds.

estudio los denominados micro-canales serán atribuidos aquellos con diámetro hidráulico inferiores a 3mm, aunque este criterio es a menudo inexacto es comúnmente adoptado en la literatura consultada.

Figura 8. Transiciones entre micro- y macro-escala según los estudios realizados para R-134a para temperatura de saturación de 31 °C.



Fuente: Revellin y Thome (2007).

### 5.3. PATRONES DE FLUJO.

Las topologías de las fases líquidas y vapor dentro de un micro-canal pueden caracterizarse a través de criterios visuales o tratamientos estadísticos en donde se tienen en cuenta la variación transitoria de la presión local, la fracción de vacío y la pérdida de presión a lo largo del canal.

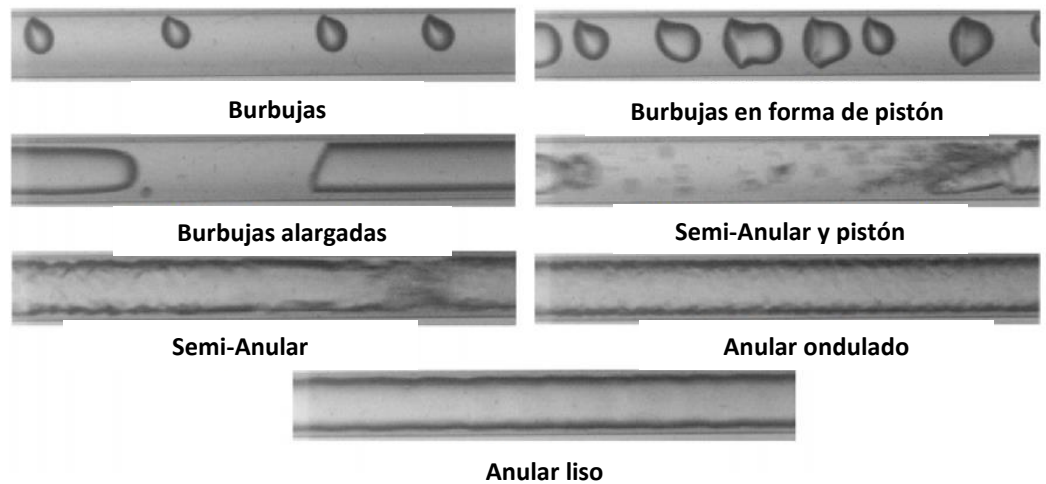
El primer método para predicción de los patrones de flujo bifásico líquido-gas en el interior de tubos horizontales fue propuesto por Baker (1954).

Entre los métodos propuestos por MANDHANE et al., 1974; TAITEL, DUKLER, 1976; KATTAN et al., 1998; WOJTAN et al. 2006; el más destacado fue Taitel y Duckler, que fue el primero en modelar patrones de flujo en los micro-canales.

En el estudio realizado por Revellin y Thome (2007) encontraron varios patrones de flujo para el refrigerante R134a y R245fa en tubos con diámetro de 0,509 y 0,790 mm, como se aprecia en la figura 9.

- Burbujas
- Burbujas en forma de pistón
- Burbujas alargadas
- Forma de pistón Semi-anular
- Semi-anular
- Anular

Figura 9. Clasificación de los patrones de flujo.



Fuente: Revellin y Thome (2007), modificada por el autor.

Además de definir los 6 patrones de flujo, se definieron 3 regiones de la siguiente forma:

- Burbujas aisladas
- Burbujas coalescentes
- Anular

Así muchos otros investigadores fueron definiendo el mejor modelo matemático para la simulación del flujo bifásico; por consiguiente, el modelo más homogéneo comparado con uno complejo de difusión y multi-fluido fue descrito por Ribatski et al., 2006; Revellin y Thome, 2007; Costa-Patry et al., 2011. El modelo nace de la base de asumir una mezcla perfecta en una sola fase, bajo el balance de momentum y equilibrio termodinámico convirtiendo el flujo bifásico en una sola fase reduciendo la complejidad numérica.

#### **Fracción de vacío.**

(5.4)

$$\varepsilon = \left( \frac{x \rho_l}{(1-x)\rho_v + x \rho_l} \right)$$

#### **Velocidades de flujo.**

(5.5)

$$u_l = u_v = \frac{x \dot{m}_{tot}}{\varepsilon \rho_v S_{ME}}$$

Se asume que la velocidad del refrigerante es igual en la fase líquida que en la de vapor.

#### **Viscosidad bifásica.**

(5.6)

$$\mu_{lv} = x\mu_v + (1-x)\mu_l$$

## Densidad bifásica.

(5.7)

$$\rho_{lv} = \left( \frac{x}{\rho_v} + \frac{(1-x)}{\rho_l} \right)^{-1}$$

## 5.4. PÉRDIDA DE PRESIÓN

El delta de la caída de presión es dado por la ecuación de pérdidas de Blasius (2009), que representa las perdidas en un canal recto.

(5.8)

$$\frac{\Delta P}{\Delta z} = 0.473 \left( \frac{\left( \frac{\dot{m}}{\rho} \right)^{1.75}}{D_h^{4.75}} \right)$$

La caída de presión total es dada por la suma de varias partes como son los efectos gravitacionales, aceleraciones y por fricción.

Los estudios desarrollados en micro-canales demostraron que las pérdidas de presión gravitacionales para canales horizontales se comportan de la siguiente manera:

(5.9)

$$-\left( \frac{dP}{dz} \right)_{estatico} = \rho_{lv} g \sin(\theta)$$

La pérdida de presión por acción aceleracional, en el caso de canales continuos y características geométricas está dada por.

(5.10)

$$-\left( \frac{dP}{dz} \right)_{aceleracional} = \frac{\partial[(1-\varepsilon)\rho_l u_l^2 + \varepsilon\rho_v u_v^2]}{\partial z}$$

Ribatski et al. (2006) comparó métodos de pronóstico para la pérdida de presión con 913 resultados experimentales disponibles en la literatura para flujos en micro- canales. Estos autores concluyeron que el método de Müller-Steinhagene Heck (1986), es el más veraz determinando una correlación para macro-canales y el modelo homogéneo con la viscosidad dada por Cicchitti et al. (1960).

Además de comparar los resultados de los métodos propuestos por los anteriores autores, el que presenta mayor afinidad al caso del flujo bifásico en micro-canales es descrito a continuación.

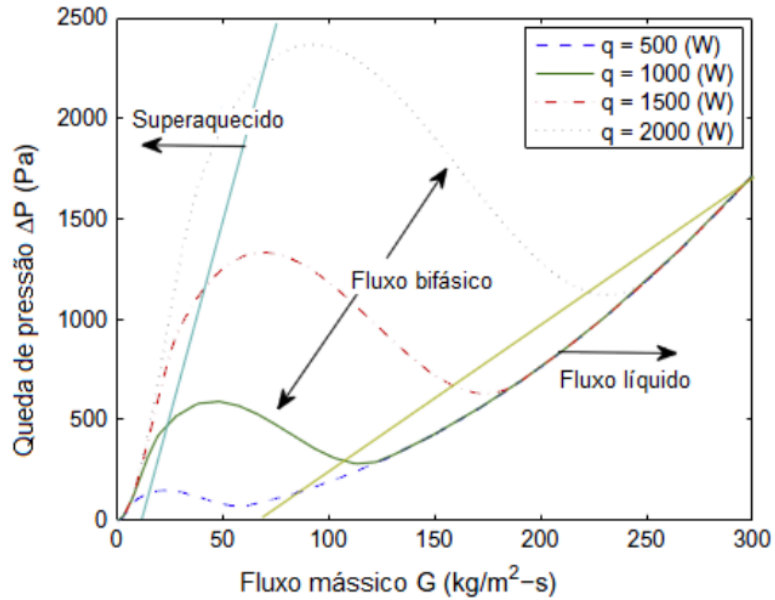
Para la pérdida de presión por fricción se causada por parámetros como el movimiento del fluido y la rugosidad de la superficies de los canales, además en el caso de flujos bifásicos hay que tener en cuenta los cambios de fase del líquido refrigerante, así que el método propuesto por Müller-Steinhagen y Heck (1986) [4], consiste en una relación estrictamente empírica que es dada por la composición de las pérdidas de presión para fase líquido y gas, adaptado para diámetros de 4 a 400 mm, el modelo anterior es el implementado para la simulación de pérdidas de presión por fricción.

➤ **Pérdida de presión por fricción en fase líquido.**

(5.11)

$$I = \left( \frac{dP}{dz} \right)_{l0} = 2f_l \frac{G^2}{\rho_l D_h}$$

Figura 10. Comportamiento de la pérdida de presión por fricción en función de la carga térmica.



Fuente. (Zhang et al., 2011)

➤ **Pérdida de presión por fricción en fase vapor.**

(5.11)

$$B = \left(\frac{dP}{dz}\right)_{v0} = 2f_v \frac{G^2}{\rho_v D_h}$$

(5.12)

$$E = I + 2(B - 1)x$$

La pérdida de presión por fricción en micro canales con flujo bifásico está dada por la siguiente ecuación:

(5.13)

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_{friccion} = \left(E(1-x)^{\frac{1}{3}}\right) + Bx^3$$

## 5.5. TRANSFERENCIA DE CALOR

### 5.5.1. Coeficiente de transferencia de calor en la pared ( $\alpha_w$ )

La correlación utilizada para el cálculo del coeficiente de calor en la pared, fue la propuesta por Chen [1] que inicia representándolo por la suma del coeficiente de transferencia de calor por convección y ebullición nucleada.

(5.14)

$$h_{FB} = \alpha_w$$

(5.15)

$$h_{FB} = h_{NB} * S + h_{conv} * F$$

Donde S es un factor aplicado en la ebullición nucleada que representa el incremento de la calidad del vapor a través del micro-canal, por otro lado, el factor F representa la variación de la velocidad del flujo con el incremento de la calidad del vapor.

(5.16)

$$S = 1 - x$$

(5.17)

$$F = 1 + 80 * \exp(-0.6 * Co) * (x^2 - x^6)$$

El coeficiente de transferencia de calor en la pared es el encargado de indicar con que tasa es removido el calor, será el parámetro más importante a la hora de analizar cada situación simulada.

### 5.5.2. Ebullición nucleada.

Para la ebullición nucleada desarrollada en micro-canales fueron utilizadas las correlaciones planteadas por Cooper [2], que nos muestra un coeficiente de transferencia de calor experimental en micro-canales que está dada:

(5.18)

$$h_{NB} = 55 * \left( P_{red}^{0.12-0.02*\log_{10}(Rp)} \right) * \left( -\log_{10}(P_{red})^{-0.55} \right) * \left( M^{-0.5} \right) * \left( (q_{flux})^{0.67} \right);$$

**Nota:** Para la anterior ecuación se tiene en cuenta que la rugosidad del arreglo utilizado en el micro-evaporador fue acorde a la norma DIN 4762.

### 5.5.3. Coeficiente de transferencia de calor por convección.

El coeficiente por convección es calculado a través del promedio de los coeficientes de transferencias de calor por convección para líquido saturado y vapor saturado, siendo dependiente de la calidad del vapor a media que avanza en el micro-evaporador.

(5.19)

$$h_{conv} = h_{vl} * (1 - x) + h_{vv} * x;$$

Los coeficientes de transferencia de calor como sustancia pura en estado saturación, se presentan en régimen laminar es así que para el cálculo se utiliza la correlación de Hausen [3], es la ecuación número 5.20 para líquido y vapor.

Para  $x=0$ , estado líquido saturado;

(5.20)

$$h_{vl} = \left( \left( 3.66 + \frac{0.0668 * \left( \frac{D_h}{L} \right) * Re_l * Pr_l}{1 + 0.04 * \left( \left( \frac{D_h}{L} \right) * Re_l * Pr_l \right)^{0.67}} \right) \right) * \left( \frac{K_l}{D_h} \right)$$

Algunos de los parámetros necesarios para el cálculo del coeficiente de convección se muestran a continuación:

**Número de Reynolds.**

(5.21)

$$Re_l = \frac{G * D_h}{\mu_l};$$

**Factor de fricción.**

(5.22)

$$f_l = \frac{0.079}{Re_l^{0.25}}$$

**Número de Prandtl.**

(5.23)

$$Pr_l = \frac{Cp * \mu_l}{K_l}$$

Y de la misma manera para  $x=1$ , estado de vapor saturado, calculan los parámetros  $Re_v$ ,  $f_v$  y  $Pr_v$ .

En un análisis de transferencia de calor se muestran las ecuaciones utilizadas para micro-canales que son como pequeñas aletas con punta adiabática.

**Calor liberado por la pared de la aleta.**

En la figura son representados los dos principales flujos de calor en los micro-canales.

(5.24)

$$q_w = \alpha_w * (T_{ftp} - T)$$

**Calor liberado por la base de la aleta.**

(5.25)

$$m = \left( 2 * \alpha_w * \left( \frac{F_w + ME_{length}}{\gamma_{Cu} * ME_{length} * F_w} \right) \right)$$

(5.26)

$$n_f = \left( \frac{\tanh(m * Ch)}{m * Ch} \right)$$

(5.27)

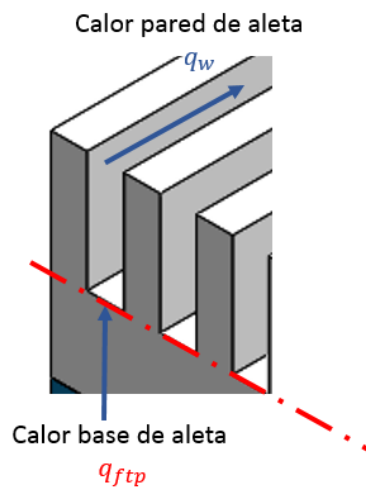
$$q_{ftp} = \left( \frac{q_w * N_{canal} * (Cw + 2 * Ch * n_f)}{ME_{width}} \right)$$

**Coefficiente de transferencia de calor en la base de la aleta.**

(5.28)

$$\alpha_{ftp} = \left( \frac{q_{ftp} * \alpha_w}{q_w} \right)$$

Figura. Flujos de calor sobre los micro-canales.



## **6. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON CAMBIO DE FASE EN MICRO-CANALES**

### **6.1. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE REFRIGERACIÓN.**

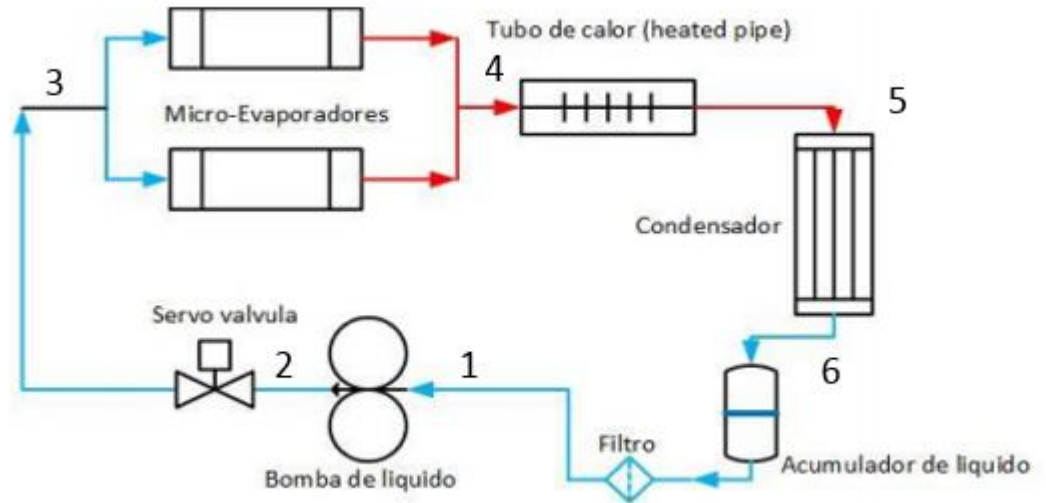
El ciclo de refrigeración modelado está compuesto por un circuito principal, el cual se subdivide en subsistemas que proporcionan un óptimo funcionamiento.

A continuación se indicarán los componentes principales del sistema de enfriamiento simulado, ilustrados en la figura 11. Donde las líneas de color rojo indican alta presión y las azules baja.

- Micro-evaporador
- Condensador
- Acumulador de líquido
- Tubo de calor
- Bomba de engranajes
- Servo válvula

El micro-evaporador es una geometría rectangular distribuido por 3 secciones descritas en la figura 6, el cual contará con micro-canales en su parte superior por donde circulará el líquido refrigerante; sus partes exteriores todas son consideradas adiabáticas para la simplificación de las pérdidas de calor; el condensador al igual que el evaporador con geometría de micro-canales enfriado por agua para retirar el calor liberado por los microprocesadores; el acumulador de líquido permitirá que a la entrada del evaporador siempre se garantice líquido sub-enfriado; la servo válvula, se instalan con el fin de ayudar a controlar el flujo de masa del acumulador y el tubo de calor es un pre-condensador para garantizar la llegada del refrigerante en forma de líquido; La bomba de engranajes proporcionará el caudal requerido según el controlador.

Figura 11. Ciclo de refrigeración tomado como base para el modelo computacional.



## 6.2. MODELAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

El modelamiento unidimensional del sistema de enfriamiento con micro-canales y bomba de líquido estará regido por correlaciones experimentales, balances de momento y energía para cada uno de los elementos del ciclo, proporcionando una mejor aproximación al banco experimental del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Escuela de Ingeniería de São Carlos, Universidad de São Paulo, Brasil.

### 6.2.1. Suposiciones del modelo computacional.

Se supusieron las siguientes simplificaciones respecto de las propiedades termodinámicas y a la transferencia de calor para obtener los balances energéticos de los elementos del sistema de refrigeración.

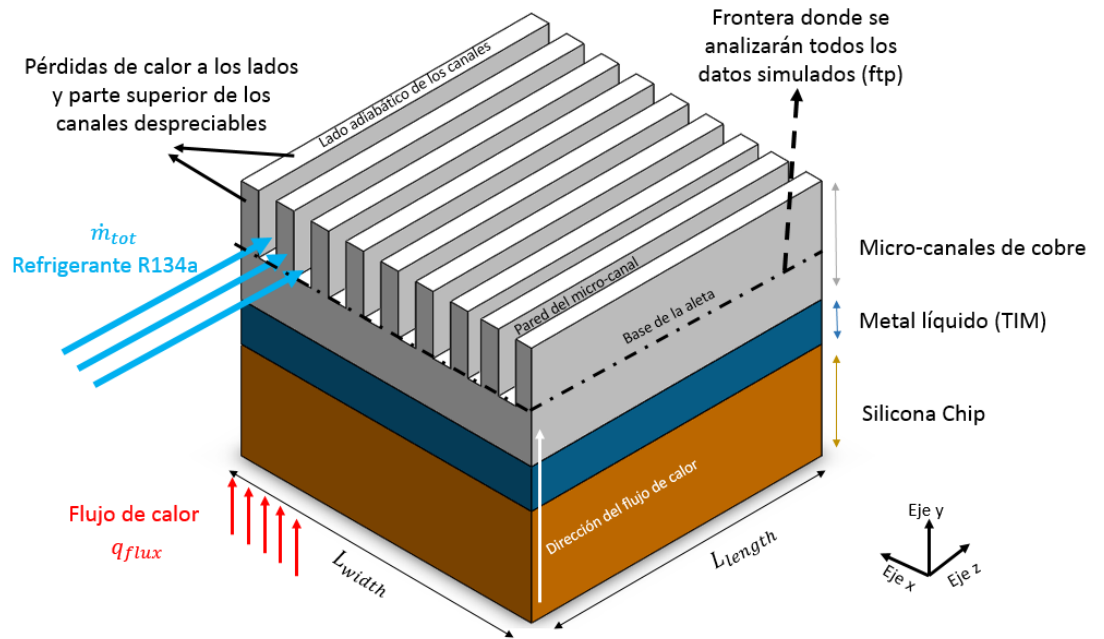
- Régimen transitorio
- Cambios de la energía cinética y potencial despreciables
- Flujo bifásico
- En los puntos 1,2 (entrada y salida de la bomba de líquido) y 3 la entrada de los micro-evaporadores, son líquido saturado.
- La bomba es isentrópica.
- Las válvulas son isoentálpicas.
- Se consideran cambios de presión en los intercambiadores de calor, válvulas y bomba.

### **6.2.2. Modelamiento del Micro-evaporador.**

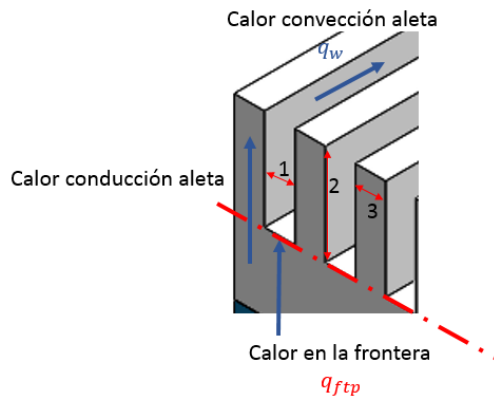
El micro-evaporador modelado para la simulación dinámica está basado en un disipador de calor por micro-canales, con una geometría descrita en la tabla 3, en donde se dan los datos de longitudes y espesores de los materiales conductores que van adheridos en forma ascendente al microprocesador, dimensiones de los canales, separación entre canales y ángulo de inclinación de los canales.

En la figura 12 a. y b. Se muestra la distribución y especificaciones de cada una de las dimensiones del micro-evaporador modelado, donde se permite ver la configuración del sistema de amortiguamiento térmico y la frontera de transferencia de calor con el fluido que va dentro de los micro-canales.

Figura 12. Modelo tridimensional del micro-evaporador simulado; a. Geometría y especificaciones y b. dimensiones de aletas y balances de calores sobre el canal.



a.



b.

1.  $C_w$ : ancho del canal
2.  $Ch$ : alto del canal
3.  $F_w$ : ancho de la aleta

Tabla 3. Datos geométricos del micro-evaporador.

**Geometría de Micro-evaporador**

Longitud en dirección z [ $ME_L$ ]	15.50	mm
Longitud en dirección x [ $ME_w$ ]	20.50	mm
Separación entre canales [ $C_w$ ]	0.18	mm
Altura del canal [ $C_H$ ]	1.80	mm
Anchura del canal [ $F_w$ ]	0.18	mm
Angulo de orientación del canal	0	Grados
Espesor de la silicona	0.45	mm
Espesor del TIM	0.05	mm
Espesor del cobre	2.80	mm
Entrada la ranura de restricción	0.50	mm
Salida la ranura de restricción	2.00	mm

Además de la geometría del disipador de calor se especificará las dimensiones de las tuberías a la entrada y a la salida de los micro-evaporadores, ya que cuentan para la distribución del flujo másico y las pérdidas de presión. En la tabla 4 se muestran los datos para el diámetro, espesor y longitud, en donde MEs significa (micro-evaporador).

Figura 13. Diagrama de distribución de la tubería a la entrada y salida del micro-evaporador (MEs)

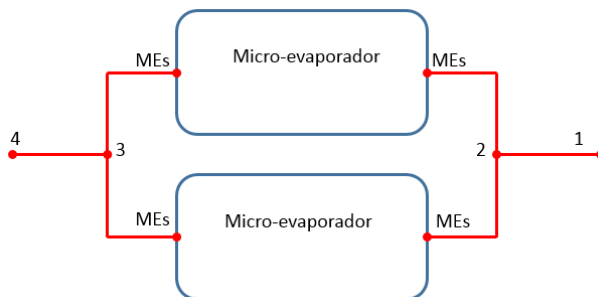


Tabla 4. Geometría de la tubería a la entrada y salida de los micro-evaporadores.

<b>Tuberías en CV</b>	$D_{int}$	$L_{tub}$	$e_{ins}$
<b>1-4</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>
1 a 2	4.7	10	20
2 a MEs	4.7	460	20
MEs a 3	6	460	20
3 a 4	6	10	20

$e_{ins}$  = Espesor de material aislante

$D_{int}$  = Diámetro interno de la tubería

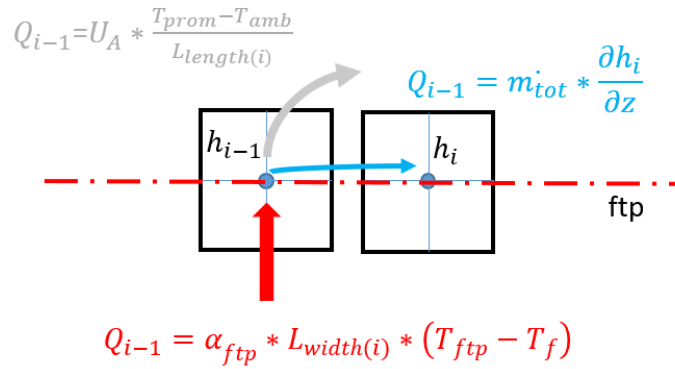
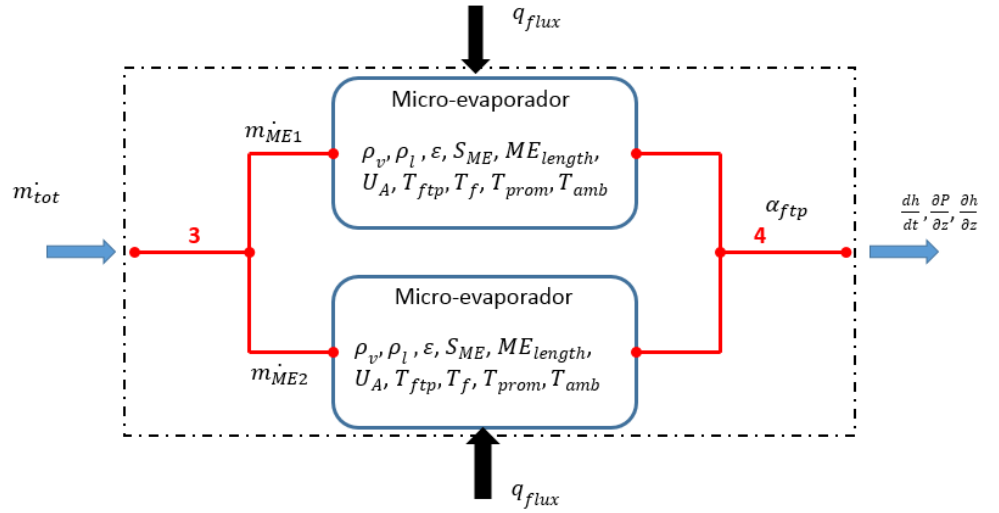
$L_{tub}$  = Longitud de la tubería

A continuación se realizarán los balances de energía y momentum que permitirán especificar las condiciones termodinámicas.

➤ **Balance de energía sobre los micro-evaporadores.**

Para conocer la variación de la temperatura y el coeficiente de transferencia de calor a lo largo del tiempo, se realizará un balance energético en cada micro-evaporador donde se observa los flujos de calor por convección en la aleta, convección por el canal y conducción en la aleta esto es realizada sobre la frontera (ftp), como se muestra en la figura 12b:

Figura 14. Diagrama de volumen de control de los micro- evaporadores.



(6.1)

$$\frac{dh}{dt} = \left( \frac{1}{(\rho_v * \epsilon + \rho_l * (1 - \epsilon)) * S_{ME}} \right) * (A - B - C)$$

Donde  $\epsilon$  es la fracción de vacío dada por la ecuación 5.4 y  $S_{ME}$  es el área del micro- evaporador en metros cuadrados ( $m^2$ ), las variables A, B, C se mostrarán a continuación:

(6.2)

$$A = \alpha_{ftp} * L_{width} * (T_{ftp} - T_f)$$

(6.3)

$$B = m_{tot} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \quad (6.4)$$

$$C = U_A \cdot \frac{T_{prom} - T_{amb}}{L_{length}}$$

$\alpha_{ftp}$  = Coeficiente de transferencia de calor en la frontera es la variable analizada en la simulación dada en la ecuación 5.28.

$T_{ftp}$  = Temperatura en la frontera.

$T_f$  = Temperatura del fluido.

$m_{tot}$  = Flujo másico total

$U_A$  = Coeficiente de transferencia de calor global.

$T_{prom}$  = Temperatura promedio

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente

➤ **Balance de momentum sobre los micro-evaporadores.**

El balance de momentos se realiza para la determinación de la caída presión a lo largo de la longitud del micro-evaporador, en la ecuación 6.5 se tiene en cuenta los efectos gravitacionales, por aceleración y por fricción del sistema, los cuales son correlaciones mencionadas en las ecuaciones 5.9, 5.10 y 5.13 respectivamente.

(6.5)

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial[(1 - \varepsilon)\rho_l u_l^2 + \varepsilon \rho_v u_v^2]}{\partial z} - \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{friccion} - [\varepsilon \rho_v + (1 - \varepsilon)\rho_l]g \sin\theta$$

$u_l$  = Velocidad de la fase líquida

$u_v$  = Velocidad de la fase vapor

$g$  = Gravedad

$\theta$  = Ángulo de inclinación del canal

### 6.2.3. Modelamiento del sistema de tuberías.

El modelamiento del sistema de tuberías de todo el ciclo fue realizado teniendo en cuenta las pérdidas de calor por tuberías y además se supone que la transferencia de calor ocurre por medio de convección natural, para las dimensiones de cada una de secciones de tubería se muestra en la tabla 5 donde se especifica su longitud, diámetro interno y espesor.

Tabla 5. Geometría de las tuberías.

pipe	Longitud (m)	Diámetro (m)	Espesor (m)
1-2	0.56	0.0060	0.02
3-4	0.59	0.0060	0.02
5	2.33	0.0047	0.02
6	0.09	0.0060	0.02
7	1.03	0.0060	0.02
8	0.27	0.0060	0.02
9	1.89	0.0060	0.02

#### ➤ Balance de energía sobre las tuberías.

El balance es realizado sobre una sección de tubería determinando las pérdidas de calor generadas a través del inverso de la ecuación 6.6 que son dadas por convección natural en las tuberías del ciclo de refrigeración.

(6.6)

$$\frac{1}{\alpha_{loss}} = \frac{1}{\alpha_{FC}} + \frac{D_{int} + 2e_{ins}}{2k_{ins}} \ln\left(\frac{D_{int} + 2e_{ins}}{D_{int}^2}\right)$$

$k_{ins}$  = Conductividad térmica de la tubería

$D_{int}$  =Diámetro interno de la tubería

$e_{ins}$  = Espesor de la tubería

$\alpha_{FC}$  = Coeficiente de transferencia de calor forzada dentro de la tubería

Después es calculada la variación de la entalpia de la tubería a través del tiempo en flujo bifásico a través de la ecuación 6.7

(6.7)

$$\frac{dh}{dt} = \left( \frac{1}{(\rho_v * \varepsilon + \rho_l * (1 - \varepsilon))} \right) * (D - F)$$

(6.8)

$$D = 4 \alpha_{loss} * \frac{D_{int} + 2e_{ins}}{D_{int}^2} (T_{amb} - T(z))$$

(6.9)

$$F = \frac{4\dot{m}_{tub}}{\pi D_{int}^2} \frac{\partial h}{\partial z}$$

$\varepsilon$  = fracción de vacío dad en la ecuación 5.4

$T(z)$  = Variacion d ela temperatura en dirección z

$\dot{m}_{tub}$  = flujo masico en la tubería

➤ **Balance de momentum sobre la tubería.**

El balance de momentos para el cálculo de las pérdidas de presión para la sección de tubería es la misma de la ecuación 6.5, utilizada en el micro-evaporador, incluyendo un delta de presión por cambio de secciones como se muestra en la ecuación 6.10.

(6.10)

$$\Delta P_{d/m} = \frac{K_d}{2} \frac{\dot{m}_{tub}}{\rho_{lv,aval} \cdot S_{aval}^2}$$

$\rho_{lv,aval}$  = Densidad en la región bifásica

$S_{aval}$  = Área de la sección transversal de la tubería

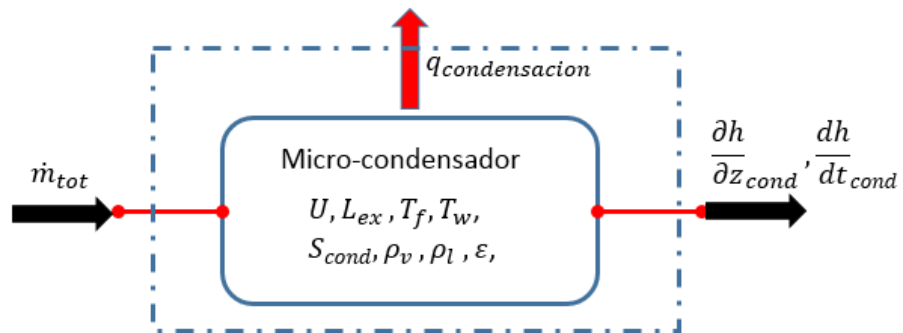
$K_{\frac{d}{m}}$  = Coeficiente de pérdidas en tuberías

#### 6.2.4. Modelamiento del Condensador.

El dispositivo utilizado para la realización de la condensación del líquido refrigerante es un intercambiador de calor enfriado por agua. Además cuenta con un tubo de calor que permite la condensación del vapor saturado que sale del micro-evaporador, para que entre al condensador con menor calidad y la transferencia de calor sea aun mayor y además garantizar la llegada de líquido saturado al acumulador.

En la figura 15 se muestran las variables que son suministradas al modelo para obtener la variación de la entalpia en el tiempo a la salida del condensador y el calor rechazado por el sistema.

Figura 15. Diagrama de volumen de control del condensador.



La variación de la entalpia del condensador se calculó a través de la ecuación 6.11 gracias al balance de calor en flujo bifásico.

(6.11)

$$\frac{dh}{dt_{cond}} = \left( \frac{1}{(\rho_v * \varepsilon + \rho_l * (1 - \varepsilon))} \right) (Y - Z)$$

(6.12)

$$Y = \frac{U \cdot L_{cond} \cdot (T_f - T_w)}{S_{cond}}$$

(6.13)

$$Z = \frac{\dot{m}}{S_{cond}} \cdot \frac{\partial h}{\partial z_{cond}}$$

$U$ = Coeficiente de transferencia de calor global del condensador

$L_{cond}$ = Longitud del condensador

$T_f$ = Temperatura del fluido

$T_w$ = Temperatura del agua

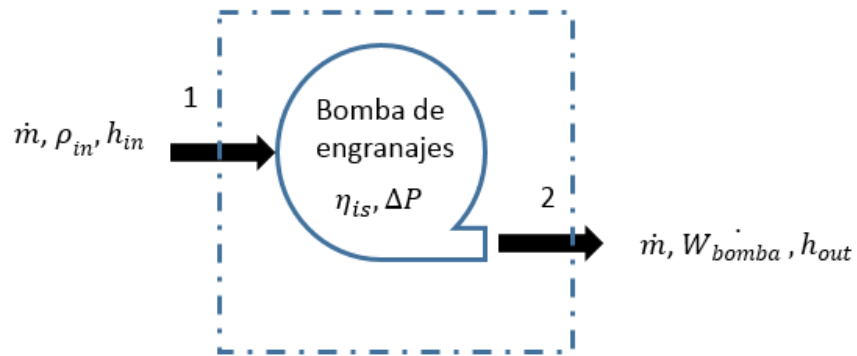
$S_{cond}$ = Área de transferencia del condensador

$\dot{m}$ = Flujo másico

### 6.2.5. Modelamiento de la Bomba de engranajes.

El modelo utilizado para la bomba de engranaje simulada se toma como isentrópica con una eficiencia del 18%, en la figura 16 muestra el volumen de control donde las variables de entrada son el flujo másico, la densidad y la entalpia, para obtener la potencia consumida y un delta de presión para contrarrestar las pérdidas y realizar el dividido flujo del refrigerante.

Figura 16. Diagrama del volumen de control de la bomba de engranaje.



(6.14)

$$W_{bomba} = \frac{\dot{m}}{\rho_{in}} \cdot \frac{\Delta P}{\eta_{ise}} = \dot{m}(h_{out} - h_{in})$$

$\eta_{ise}$ =Eficiencia isentropica

$h_{out}$ = Entalpia a la salida de la bomba

$h_{in}$ = Entalpia a la entrada de la bomba

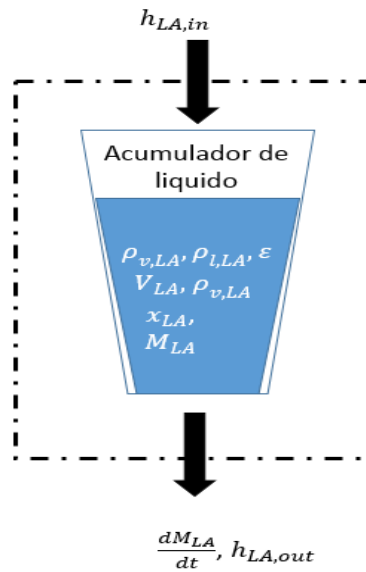
$\Delta P$ = Delta de presión del sistema

$\rho_{in}$ = Densidad a la entrada de la bomba

### 6.2.6. Modelamiento del acumulador de líquido.

Para el modelamiento del acumulador de líquido se tienen en cuenta las variaciones de las propiedades y el calor liberado por pérdidas de calor. Dentro del acumulador se prestarán las dos fases, vapor saturado y líquido sub-enfriado. Cada una en proporciones adecuadas a través de estas se obtiene un flujo de masa a en el tiempo y la entalpia a la salida. En la figura 17 se muestran las variables que son suministradas y calculadas con anterioridad.

Figura 17. Balance de flujos del acumulador de líquido.



En la ecuación 6.16 se calcula la variación de la entalpia del acumulador en el tiempo

(6.15)

$$\frac{dh_{LA}}{dt} = \frac{1}{M_{LA}} \left( \dot{m}(h_{LA,in} - h_{LA,out}) + \frac{dM_{LA}}{dt}(h_{LA,in} - h_{LA,out}) - U_{LA} \cdot A_{LA} \cdot (T_{LA} - T_{amb}) \right)$$

$M_{LA}$  = Masa del acumulador de líquido

$\dot{m}$  = Flujo másico del sistema

$h_{LA,in}$  = Entalpia del acumulador a la entrada

$h_{LA,out}$  = Entalpia del acumulador a la salida

$U_{LA}$  = Coeficiente de transferencia de calor global del acumulador

$A_{LA}$  = Área del acumulador

$T_{LA}$  = Temperatura del acumulador

(6.16)

$$\frac{dM_{LA}}{dt} = -\frac{\Delta M_{sys}}{\Delta t} = -\frac{\int (1 - \varepsilon)\rho_l + \varepsilon\rho_v}{\Delta t} = -\Delta M_{sys}$$

$\Delta M_{sys}$ =Diferencial de masa del sistema

$\varepsilon$ =Fracción de vacío del sistema

$\rho_l$ = Densidad del líquido que fluye en el sistema

(6.17)

$$H_{t,LA} = (1 - \varepsilon_{LA})H_{LA}$$

(6.18)

$$\varepsilon_{LA} = (1/(\rho_{v,LA} - \rho_{l,LA}))\left(\frac{M_{LA}}{V_{LA}} - \rho_{l,LA}\right)$$

(6.19)

$$x_{LA} = \frac{\varepsilon \cdot V_{LA} \cdot \rho_{v,LA}}{M_{LA}}$$

$H_{t,LA}$  = Entalpia total del acumulador

$\varepsilon_{LA}$  =Fracción de vacío de la acumulador

$V_{LA}$  =Volumen del acumulador

$\rho_{l,LA}$  =Densidad del líquido dentro del acumulador

$x_{LA}$  =Calidad del acumulador

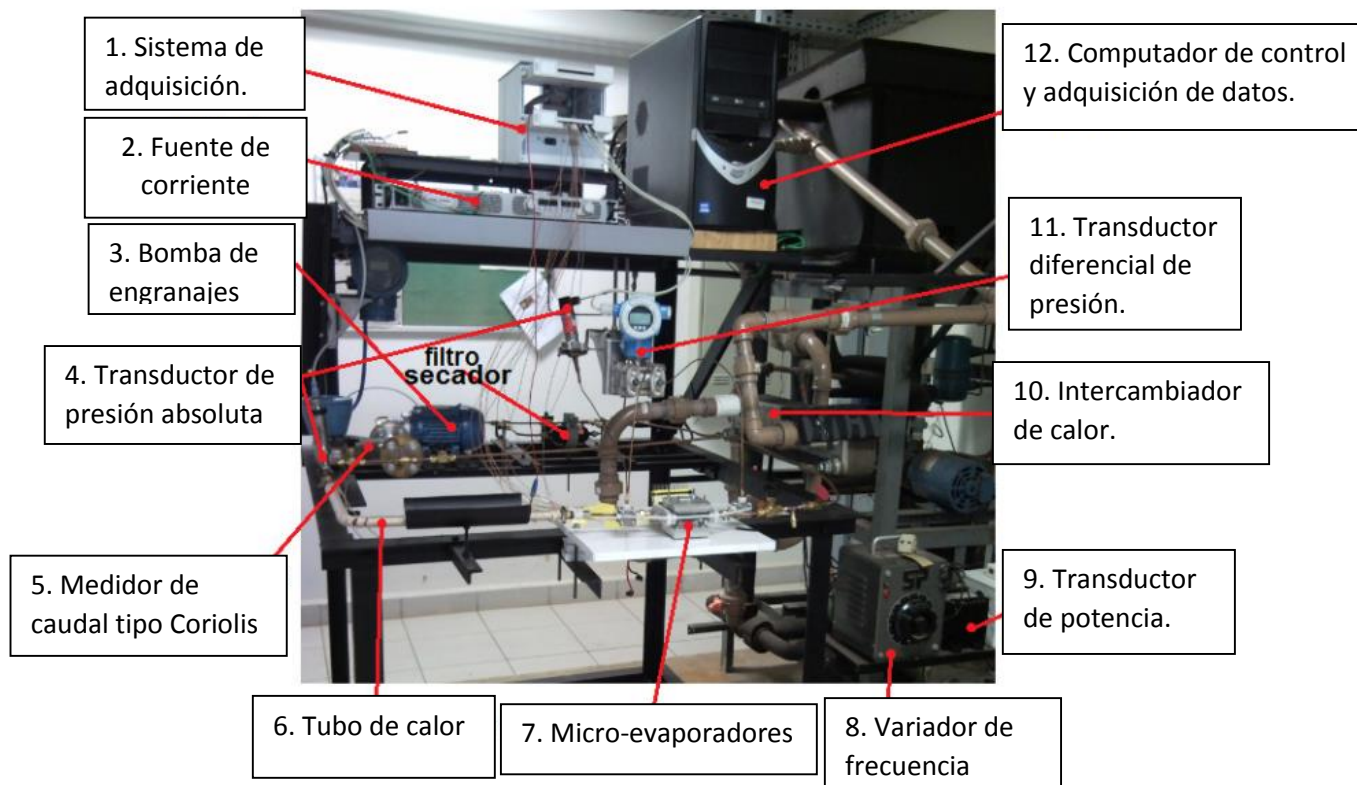
### 6.3. BANCO EXPERIMENTAL PARA LA VALIDACIÓN.

El banco experimental fue construido para la comprobación de correlaciones experimentales para el estudio de ebullición convectiva en múltiples microcanales. El dispositivo experimental de la figura 18, se encuentra localizado en el laboratorio de ingeniería térmica y fluidos del departamento de ingeniería mecánica de la escuela de ingeniería de Sao Carlos (EESC- USP). Este fue utilizado para estudios pasados hechos por (RIBATSKY, 2002; SILVA, 2005; STELUTE, 2004).

El banco experimental consiste en los siguientes circuitos:

- Circuito principal, en el cual esta los micro-evaporadores.
- Circuito auxiliar, responsable de los controles de los diferentes dispositivos.
- Circuito de rechazo de calor, está compuesta por compresor de vapor y una torre de enfriamiento.

Figura 18. Banco experimental para el estudio de la ebullición convectiva en multi-micro-canales



Fuente. STELUTE, 2004. Modificado por el autor.

### 6.3.1. Descripción del circuito.

El circuito principal está compuesto por micro-evaporadores que funcionan con refrigerante R134a y es movido a través de una bomba de engranajes que opera sin necesidad de aceite lubricante, el fluido fluye a través de un medidor de caudal másico tipo Coriolis, seguido de una válvula de aguja con el objetivo de

generar una caída de presión para minimizar las inestabilidades provenientes de la ebullición del fluido.

Después el fluido fluye hasta el distribuidor de los micro-evaporadores donde la temperatura y la presión local del fluido son nuevamente determinadas y un transductor de presión diferencial proporciona la pérdida de presión entre la región de entrada y la salida de los micro-canales.

El circuito tiene también una línea alternativa (by-pass) conectada a la salida del medidor de caudal en la región de la válvula III. Esta línea es de gran importancia para el mantenimiento de todos los elementos del banco. Al igual cuenta un filtro secador para el retiro de impurezas del refrigerante y evitar la obstrucción de los micro-canales.

Tiene un intercambiador de calor tipo placas responsable del retiro de calor de los microprocesadores a enfriar este es conectado al reservorio por donde se realiza la alimentación y descarga del refrigerante al circuito.

En la figura 19 se muestra el diagrama esquemático de los elementos del banco experimental, en donde se resaltan los dispositivos de medición como lo son el medidor de caudal tipo Colioris, los traductores de presión y los sensores de temperatura, en donde se utilizaron para conocer parámetros como la calidad del vapor, flujos de masa y coeficientes de transferencias de calor en los micro-evaporadores.

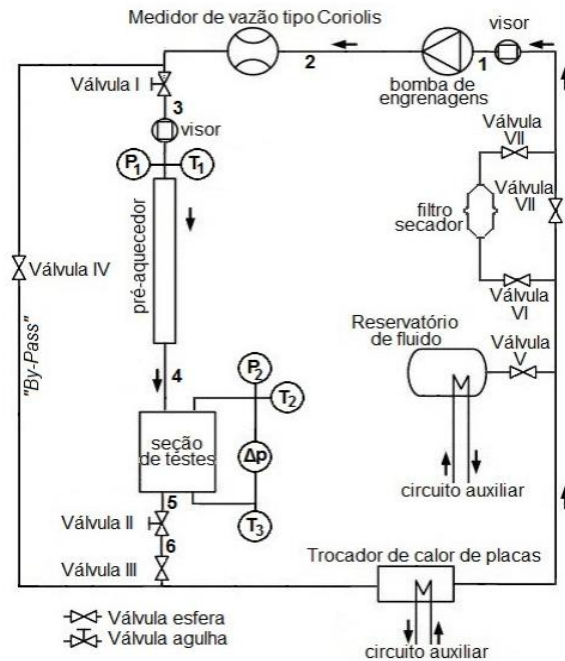
### **6.3.2. Descripción del ciclo termodinámico.**

El diagrama termodinámico de presión contra entalpía ( $P$  vs  $h$ ), del banco experimental es mostrado en la figura 20 y descrita a continuación.

El ciclo de refrigeración implementado en el banco experimental está compuesto de la siguiente manera. En el punto 1 representa la condición del fluido en la entrada de la bomba de engranajes que al pasar por este dispositivo hay un

aumento de presión hasta el punto 2. El proceso 2-3 está relacionado con la pérdida de presión debido al medidor de caudal y la válvula de aguja I.

Figura 19. Diagrama esquemático del circuito principal del banco experimental.



Fuente. STELUTE, 2004

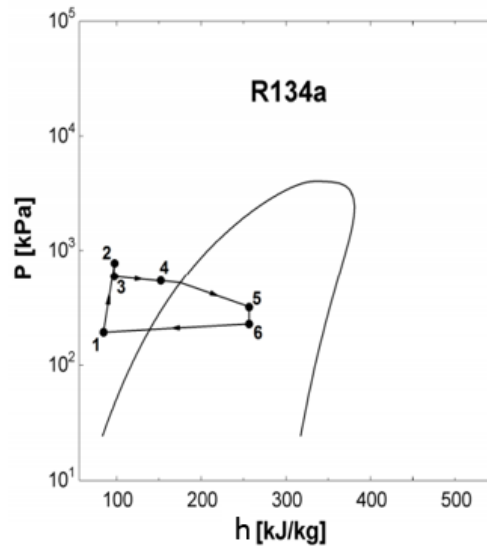
La región del diagrama 3-4 corresponde al pre-calentador en el cual el fluido refrigerante sub-enfriado es calentado hasta alcanzar el grado de sub-enfriamiento óptimo para la entrada de los micro-evaporadores. Los procesos descritos en los puntos 4 y 5 consisten en el suministro del flujo de calor al fluido refrigerante en la sección de los micro-canales.

La alteración de la inclinación a partir de la línea de saturación está relacionada al mayor gradiente de presión en procesos de evaporación, mostrando la caída de presión generada por la geometría de los canales.

El punto 5 representa la salida de la sección de los micro-canales y el proceso 5-6 está relacionado a una pérdida de carga localizada en la válvula de aguja II. El proceso 6-1 ocurre en el intercambiador de calor utilizado como condensador

donde ocurre el retiro de calor del circuito principal y circuito auxiliar. La pérdida de presión del intercambiador se tiene en cuenta como una muy leve caída.

Figura 20. Diagrama P-H del circuito principal para unas condiciones de subenfriamiento del R-134a



Fuente. STELUTE, 2004. Modificado por el autor.

### 6.3.3. Descripción de los componentes del banco experimental.

#### ➤ Refrigerante.

Se utilizó refrigerante R134-a (1, 1, 1, 2-Tetrafluoroethane) por tener buenas propiedades termo físicas en diámetros hidráulicos menores a 1 mm. Se realizó un estudio del sistema también con el HFC245fa (1, 1, 1, 3,3-Pentafluoropropane) pero se obtuvo un margen de 45 % de error muy grande, por lo cual no se tuvo en cuenta en este estudio.

➤ **Bomba de engranaje.**

La bomba de engranajes utilizada para promover el flujo del refrigerante a través del circuito en el laboratorio fue un modelo GA-T23J8KS4 esta posee un flujo volumétrico de  $0,092 \frac{ml}{rev}$  y rotación máxima de 8000 RPM.

➤ **Válvulas.**

Se utilizan válvulas de aguja, su función principal es la pérdida de presión localizada y restringir las inestabilidades, como también válvulas de esfera que son responsables de restringir el flujo del refrigerante en determinados trechos en el circuito principal.

➤ **Transductor de presión.**

Dos transductores de presión absoluta Endress Hauser modelo PMP131-A4201A2S (0-10 bar) con 0,5 % de error, su función determinar la presión diferencia en los micro-evaporadores.

➤ **Pre-calentador.**

Consiste en un tubo de cobre 12,7 mm de diámetro interno y 700 mm de longitud envuelto en una resistencia eléctrica de 624 W a tensión máxima de 220 V.

➤ **Visor de líquido.**

Localizado cerca de la bomba de engranajes y el pre-calentador construidos para facilitar la visualización del fluido y la medición de la temperatura (a través termopar tipo K de 150 micrómetros de diámetro) y la presión absoluta en la entrada.

➤ **Sistema de adquisición.**

El monitoreo, control, adquisición y registro de los resultados experimentales fueron realizados a través de un sistema de adquisición de la National Instruments. El sistema de adquisición utilizado contaba con un chasis SCXI-1000, una placa de comunicación con el computador (NI PCI 6221), un bloque conector para adquisición y envío de señales analógicas (SCXI 1302) y un bloque para amplificar las señales analógicas (SCXI 1303) conectada a una placa de amplificación estas señales que posibilitan la lectura de la señal de termopares y posee una compensación de junta fría (SCXI 1102).

- 16 señales de temperatura
- 3 señales de presión
- 1 señal de potencia activa
- 1 señal de caudal másico

A continuación, en la figura 21 muestra la interfaz responsable del control y adquisición de datos experimentales:

El control aplicado es de tipo PI y fue programado en Labview, proporcionando una salida de 0 a 10V, señal que actúa en el controlador del inversor de frecuencia, al igual se empleó en la simulación dinámica para obtener los mismos resultados.

(6.20)

$$\frac{d\dot{m}_i}{dt} = K_{fd}(\Delta P_i - \Delta P_{i+1})$$

(6.21)

$$\dot{m}_n = \dot{m}_{tot} - \sum_{i=1}^{n-1} \dot{m}_i$$

(6.22)

$$\frac{dm_{i\text{tot}}}{dt} = \left( K_i(X_{\text{mix}} - X_{\text{set}}) + K_p \frac{dX_{\text{mix}}}{dt} \right)$$

$K_p$  = Constante proporcional

$K_i$  = Constante integral

$m_i$  = Flujo de másico para  $n=i$

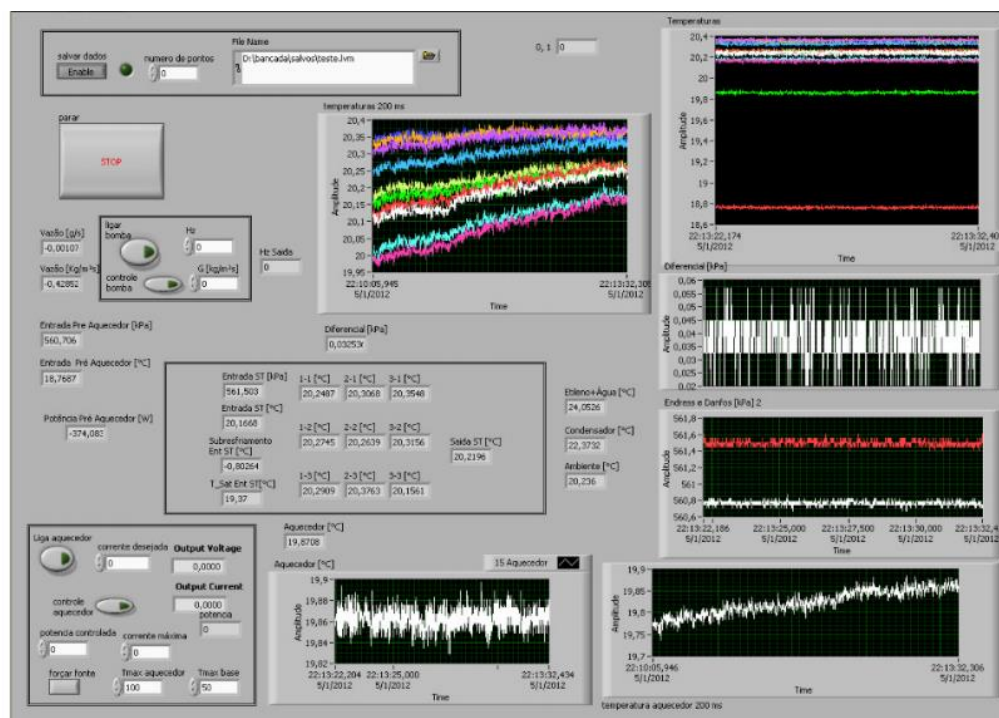
$X_{\text{mix}}$  = Calidad del vapor mezcla

$X_{\text{set}}$  = Set Point de la calidad del vapor

$m_n$  = Flujo másico para  $n=1, 2, 3, \dots, n$ .

$K_{fd}$  = constante de pérdidas de presión

Figura 21. Interfaz gráfica de Labview de National Instruments



Fuente. STELUTE, 2004. Modificado por el autor.

## **7. SIMULACIÓN.**

### **7.1. PLATAFORMA IMPLEMENTADA PARA LA SIMULACIÓN.**

El desarrollo de este proyecto fue necesario elegir una de las diferentes plataformas de programación que se encuentran en el mercado como lo son MATLAB, SCILAB, OCTAVE, FORTRAN etc. La elección está basada en la capacidad del solucionador y el alcance de las licencias. El laboratorio de Ingeniería Térmica y Fluidos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos (EESC- USP), quien posee la licencia para el uso privativo para el desarrollo de proyecto académicos y científicos. Por lo anterior se escogió MATLAB.

Para la solución de las ecuaciones se utilizaron las diferencias finitas y ODE45 de Matlab que es un solucionador de ecuaciones diferenciales de primer orden con condiciones iniciales para múltiples variables. La precisión del loop interno del ODE45 para la solución de cada step en el tiempo es de residual máximo de  $10^{-9}$ .

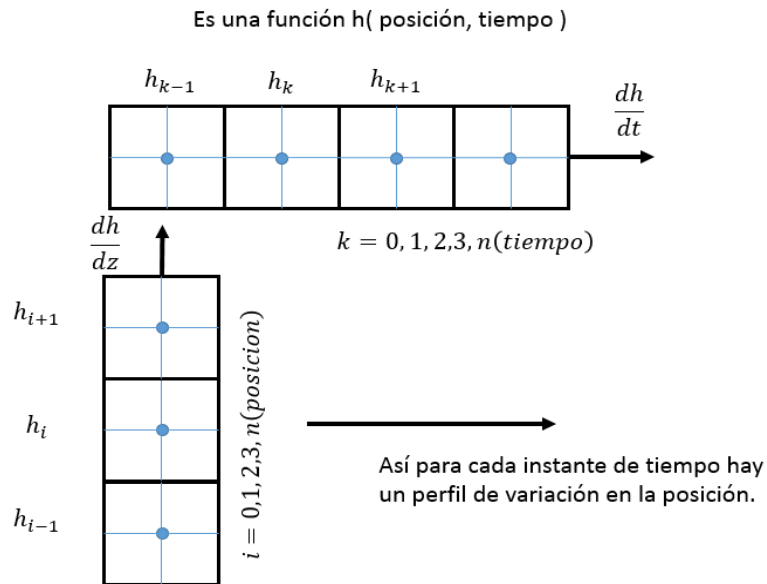
### **7.2. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN.**

El modelo unidimensional se discretizó a lo largo de su longitud con un tamaño de celda de 0,4 mm, como se muestra en la figura 22.

El modelo para las diferencias finitas se discretizó en 200 celdas a lo largo de la longitud y 60 por cada sección de material sólido en dirección del eje y, que comprende los materiales de cobre, metal líquido y silicona.

La discretización realizada para la simulación computacional fue la recomendada por muchas de las referencias que tratan sobre la transferencia de calor en fase bifásica, esta consiste en utilizar 18000 celdas para la conducción de calor y 200 para los balances de energía en la frontera del micro-evaporador como se muestra en la figura 23.

Figura 22. Discretización para la modelación unidimensional de los componentes del ciclo de refrigeración.



El diagrama de flujo de la figura 24 es una representación gráfica de las etapas del código programado para la solución de las ecuaciones diferenciales.

En primer lugar se hace el ingreso de todas las variables conocidas como son datos geométricas, condiciones iniciales, propiedades termodinámicas y relación matemáticas; estas son ingresadas por el usuario a través de Excel y subplataformas como lo son COOLPROP y REFPROP, que proporcionaban las propiedades termodinámicas como sustancias puras y en la región bifásicas.

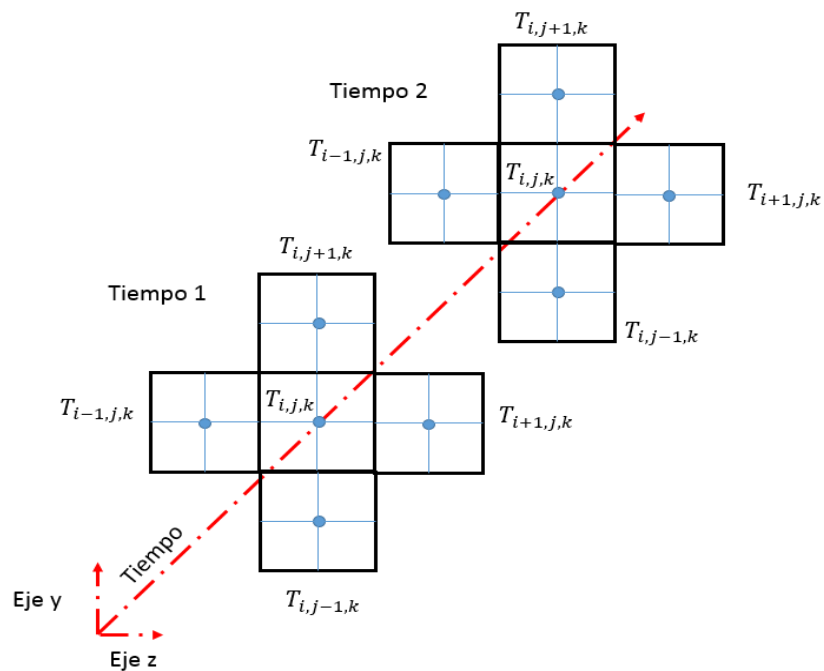
Luego son inicializadas todas las variables bajo un estado estable inicial sin flujo de calor hasta que se consiga una estabilización del sistema permitiendo tener un estado cero a la hora de iniciar con el suministro del flujo de calor, que fue determinado por la literatura consultada y recomendaciones de otros colegas del laboratorio.

Después es calculado y recalculado para cada instante de tiempo los diferentes balances y correlaciones de las propiedades termodinámicas, luego de tener

estas son calculados CHF, la temperatura del chip y los coeficientes de transferencia de calor. Por último se comparan se va comparando la salida de los datos con valores de una estado estable para comprobar la veracidad y aproximación de cada loop y sino coinciden se recalculan los balances de energías y se procede a una nueva iteración.

A continuación se muestra la ecuación 7.1 una de las expresiones referentes a la diferencias finitas, para la determinación del perfil de temperatura bidimensional y en estado transitorio.

Figura 23 Discretización para la modelación bidimensional del micro-evaporador.



Donde:

$i$ =Temperatura en  $z$

$j$ = Temperatura en  $y$

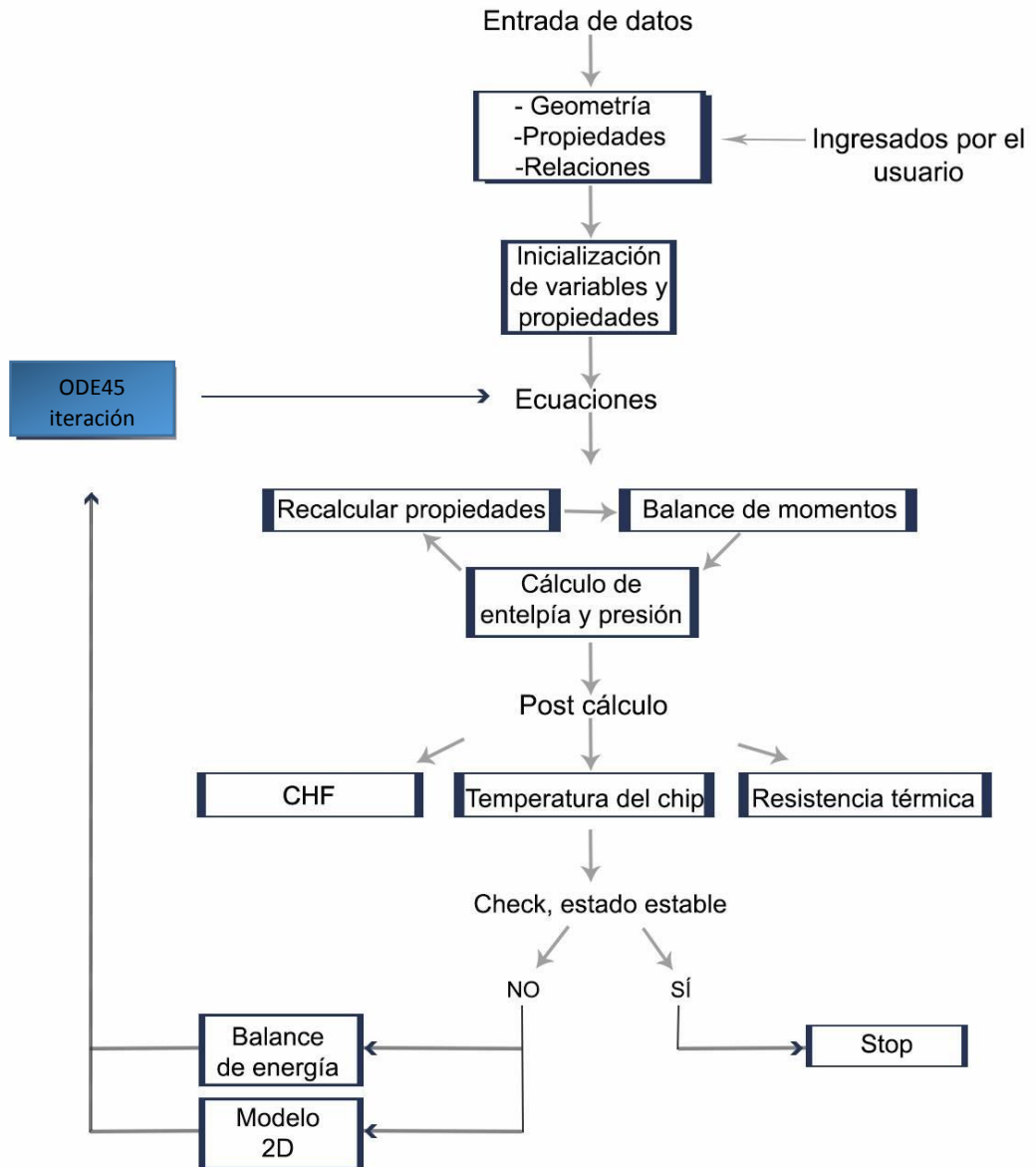
$k$ = El tiempo

$Fo_{11}$ =Numero de Fourier en la sección del material de silicona

(7.1)

$$T(i, j, k + 1) = Fo11 * (T(i + 1, j, k) + T(i - 1, j, k) - 2 * T(i, j, k)) + Fo12 * (T(i, j + 1, k) + T_q - 2 * T(i, j, k)) + \left( \frac{q * Li}{rho1 * Cp1} \right);$$

Figura 24. Esquema del flujo de procesos de la simulación.



## **8. VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO COMPUTACIONAL.**

La validación realizada nos permitirá conocer los errores y dispersiones con los que cuentan las correlaciones utilizadas en la simulación computacional comparadas con los datos obtenidos en el banco experimental del laboratorio de sistemas térmicos.

La validación de la calidad del vapor y la temperatura del chip, en estado estable y transitorio, se usaron, la presión y el sub-enfriamiento como datos de entrada para la estabilización del sistema.

Algunos problemas presentados a la hora de la toma de datos, fue por el cálculo de las pérdidas de calor, siendo difíciles de definir para el banco experimental. La temperatura ambiente de los alrededores en el laboratorio fue un factor importante ya que se considerada cambiante a lo largo del día y el espesor del material aislante es muy difícil de estimar. Por lo tanto, las pérdidas de calor no son bien predichas, produciendo que, los balances de energía y temperatura del chip tengan poca exactitud.

El desarrollo de la toma de datos para la respectiva validación se realizó en un periodo muy pequeño de aproximadamente 100 segundos, en el cual la presión y el grado de sub-enfriamiento fueron considerados constantes bajo algunos flujos de calor.

Para la validación solo se utilizaron los datos arrojados por el micro-evaporador y de igual manera fueron comparados con los del modelo computacional.

### **8.1. VALIDACIÓN DE LOS ESTADOS ESTABLES DEL MICRO-EVAPORADOR**

La validación de los estados estables del sistema fue realizada bajo diferentes condiciones de operación permitiendo obtener varios puntos de comparación con respecto a los datos adquiridos experimentalmente esto permitió establecer un

error de dispersión con respecto a las correlaciones usadas en el modelo computacional.

A través de los balances de energía en los diferentes estados estables permitieron estimar pérdidas de calor entre los 21 y 35  $\frac{W}{cm^2}$  obtenidos con un fluido refrigerante HFC134a.

Los rangos de las condiciones de operación que se manejaron, se especifican a continuación en la tabla 6, donde las unidades de presión son bar, las de temperatura son grados Celsius [ $^{\circ}C$ ] y flujo másico en [ $\frac{Kg}{h}$ ].

Tabla 6. Condiciones de operación.

	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>
<b>Presión</b>	17 [bar]	19 [bar]
<b>Temperatura de saturación</b>	57.9 [ $^{\circ}C$ ]	62.9 [ $^{\circ}C$ ]
<b>Sub-enfriamiento</b>	9 [ $^{\circ}K$ ]	16 [ $^{\circ}K$ ]
<b>Flujo másico</b>	4 [ $\frac{Kg}{h}$ ]	9 [ $\frac{Kg}{h}$ ]

Las figuras 25, 26 y 27 muestran respectivamente la calidad del vapor y la temperatura de los microprocesadores obtenidos en sus estados estables, donde los resultados experimentales y simulados son comparados para conocer su desviación y su error.

Se observó que el comportamiento de la calidad del vapor tiene un 5% de error aproximadamente, el cual está asociado con las incertidumbres de las correlaciones utilizadas para la simulación computacional de los diferentes parámetros como lo son flujo másico, temperatura, presión y las pérdidas de calor.

En cuanto a la temperatura del Chip se encuentra sobre 2  $^{\circ}K$  con un porcentaje de error del 18%, cual es considerada satisfactoria para ambos micro-evaporadores.

Figura 25. Validación de la calidad del vapor en estado estable.

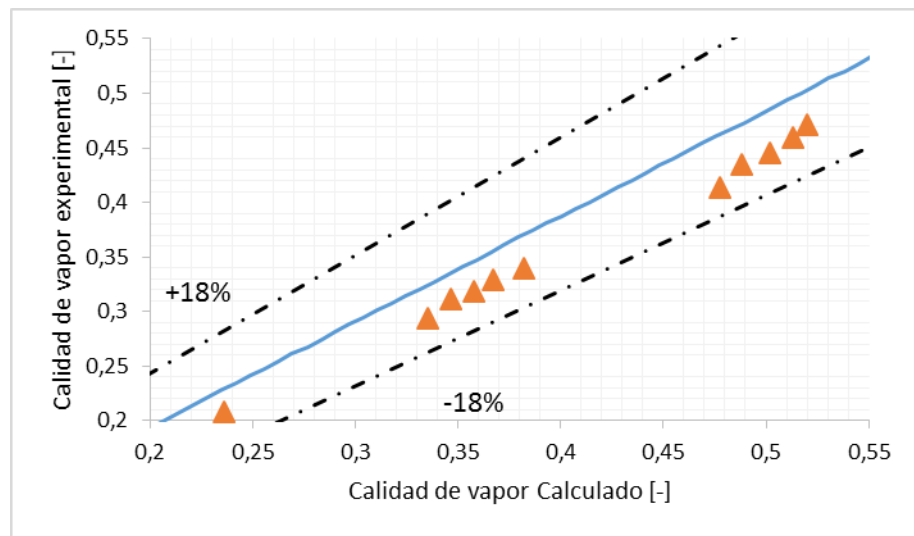


Figura 26. Validación de la temperatura del chip en el micro-evaporador 1 en estado estable.

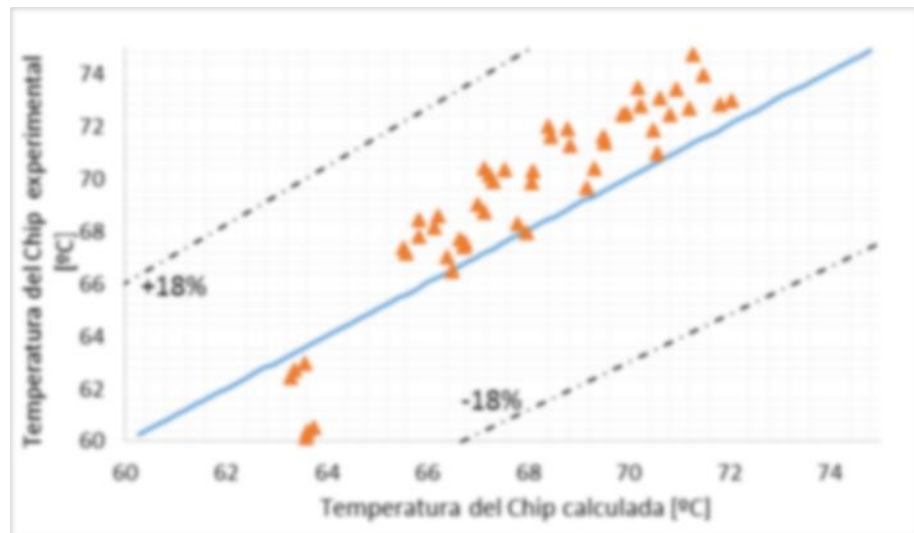
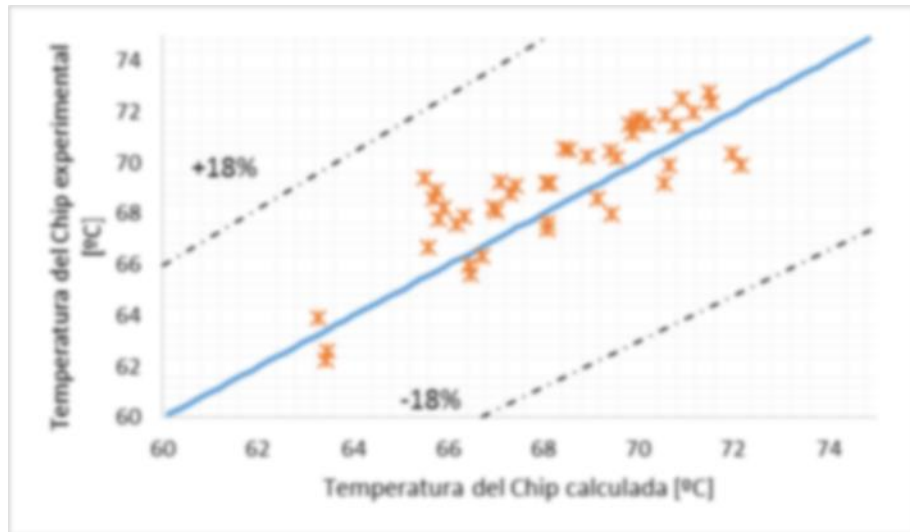


Figura 27. Validación de la temperatura del chip en el micro-evaporador 2 en estado estable.



## 8.2. VALIDACIÓN DEL ESTADO TRANSITORIO DEL MICRO-EVAPORADOR

Se quiere validar el estado transitorio para comparar el comportamiento dinámico del sistema obtenido con correlaciones teóricas para el flujo másico y para la calidad del vapor, bajo una fluctuación de flujo de calor constante.

Para el desarrollo de la validación transitoria se establecieron unas condiciones de estado estable previas, las cuales constan de una presión de 16.8 bar y una calidad de vapor del 30% en el condensador.

Las fluctuaciones de flujo de calor utilizadas en los micro-evaporadores son de 28.32 y 33.34  $\frac{W}{cm^2}$  respectivamente, donde las condiciones termodinámicas constantes del tiempo de simulación son de 16.92 bar y 8.5 K a la entrada del micro-evaporador.

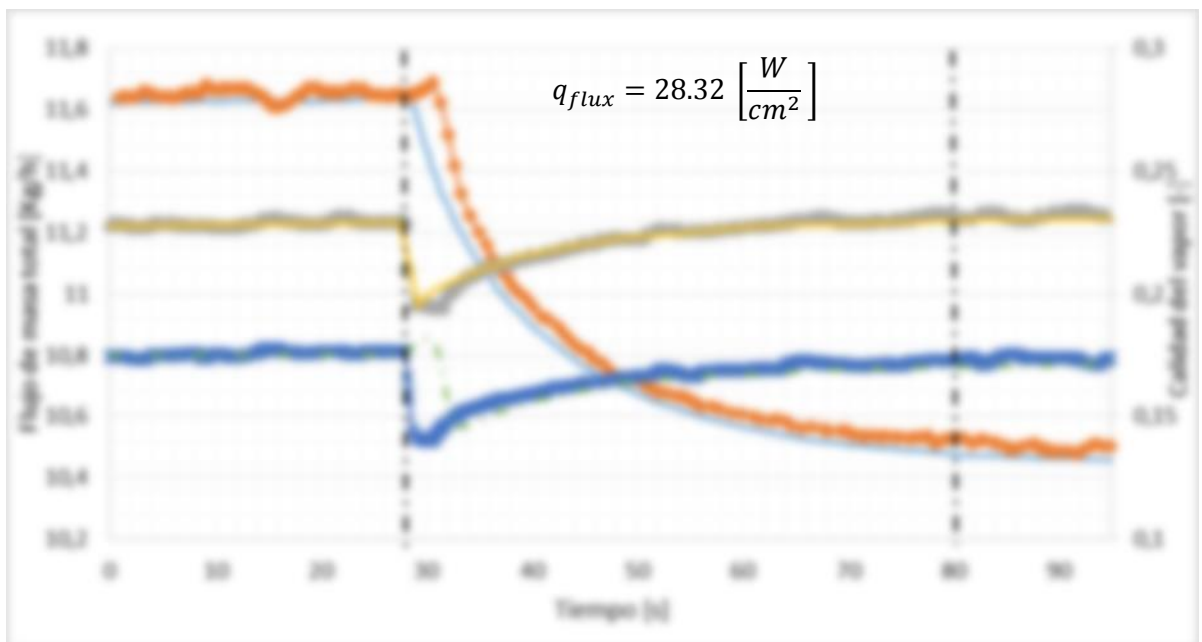
La figura 28, nos muestra el perfil del comportamiento transitorio del flujo másico y la calidad del vapor con pérdidas y sin pérdidas de calor a la salida del micro-evaporador, la cual permite ver que en los primeros 30 segundos prevalece el estado estable con el que se estableció el sistema antes de la perturbación. La caída repentina de los valores de las variables analizadas son causadas por la

fluctuación de calor aplicado a los 30 segundos. De aquí en adelante el sistema busca su estado estable para disipar el flujo de calor correspondiente.

Por lo tanto, el comportamiento dinámico del sistema con el modelo computacional muestra un alto grado de exactitud con respecto al arrojado por el banco experimental, lo cual permite concluir que las correlaciones y balances energéticos utilizados en el modelamiento muestran datos veraces para su análisis.

Figura 28. Validación de la calidad del vapor.

- Flujo de masa experimental
- Flujo de masa calculado
- Calidad de vapor instantaneo calculado
- - - Calidad de vapor instantaneo calculado con perdidas de calor
- ▲ - Calidad de vapor instantaneo experimental
- \*— Calidad de vapor instantaneo calculado con perdidas de calor



## 9. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.

La simulación será dividida en 3 partes; La primera consiste en el análisis del micro-evaporador de forma individual, dada por la geométrica mostrada en la figura 12, donde se representa cada uno de los 3 elementos principales la fuente, el amortiguador de calor y el disipador de calor por micro-canales.

La segunda parte tendrá en cuenta las tuberías, donde se observarán las caídas de presión y las pérdidas de calor por convección natural. Y por último todos los componentes del sistema de enfriamiento.

Para el correcto funcionamiento se debe ingresar un estado estable de inicialización. Algunos parámetros implementados para iniciar la simulación del micro-evaporador son los siguientes:

- Refrigerante HFC134a
- Presión 7.7 bar
- Temperatura de sub-enfriamiento 9 K
- Temperatura de saturación 30°C
- Flujo de masa  $8 \frac{Kg}{h}$

### 9.1. SIMULACIÓN DEL MICRO-EVAPORADOR BAJO DIFERENTES FLUCTUACIONES DE CALOR.

El objetivo de la simulación es apreciar los diferentes comportamientos de la temperatura del chip, la calidad del vapor y el coeficiente de transferencia de calor, cuando el sistema en estado transitorio es sometido a un perfil de fluctuaciones de calor constantes y variables, permitiendo observar las ventajas de la transferencia de calor en la región bifásica.

En la primera fase de la simulación se considera que el micro-evaporador se encuentra inundado de líquido saturado sub-enfriado a un flujo másico constante. Y sometido a un flujo de calor constante de  $110 \frac{W}{cm^2}$ .

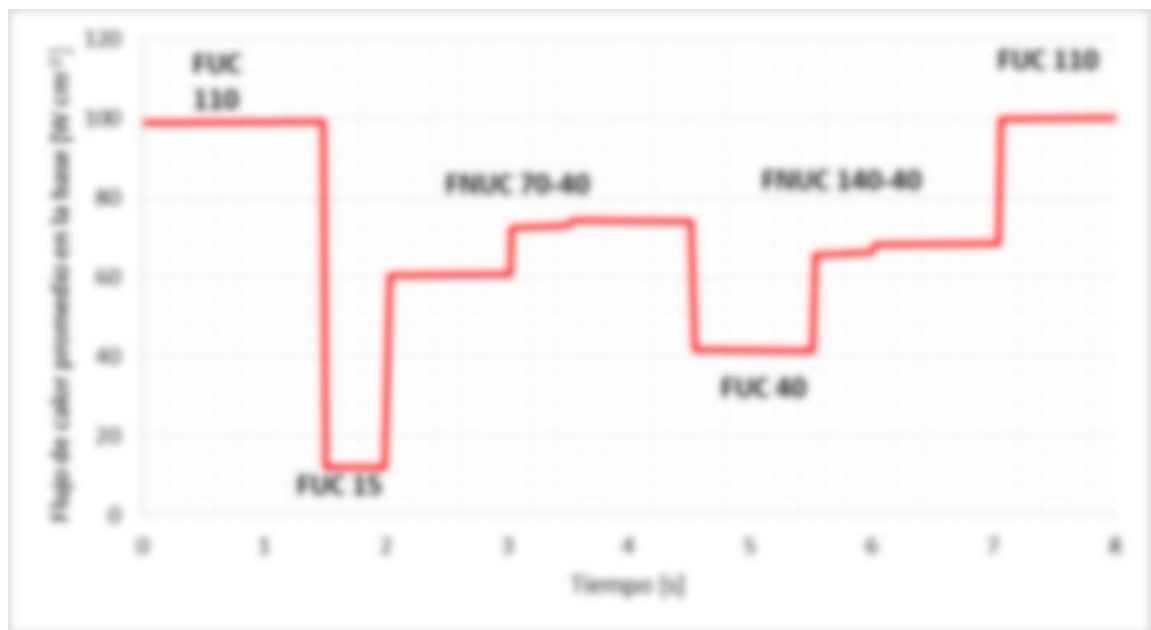
Después del primer parámetro de flujo de calor, se comienza a suministrar una rutina de fluctuaciones de flujos de calor variable a través del tiempo.

En la figura 29 se muestran las perturbaciones de flujo de calor uniforme y no uniforme, realizadas a lo largo del tiempo para simular una situación real que presentaría un centro de datos.

Figura 29. Variación de los flujos de calor utilizados en la simulación como perturbaciones.

**FUC:** Flujo uniforme de calor.

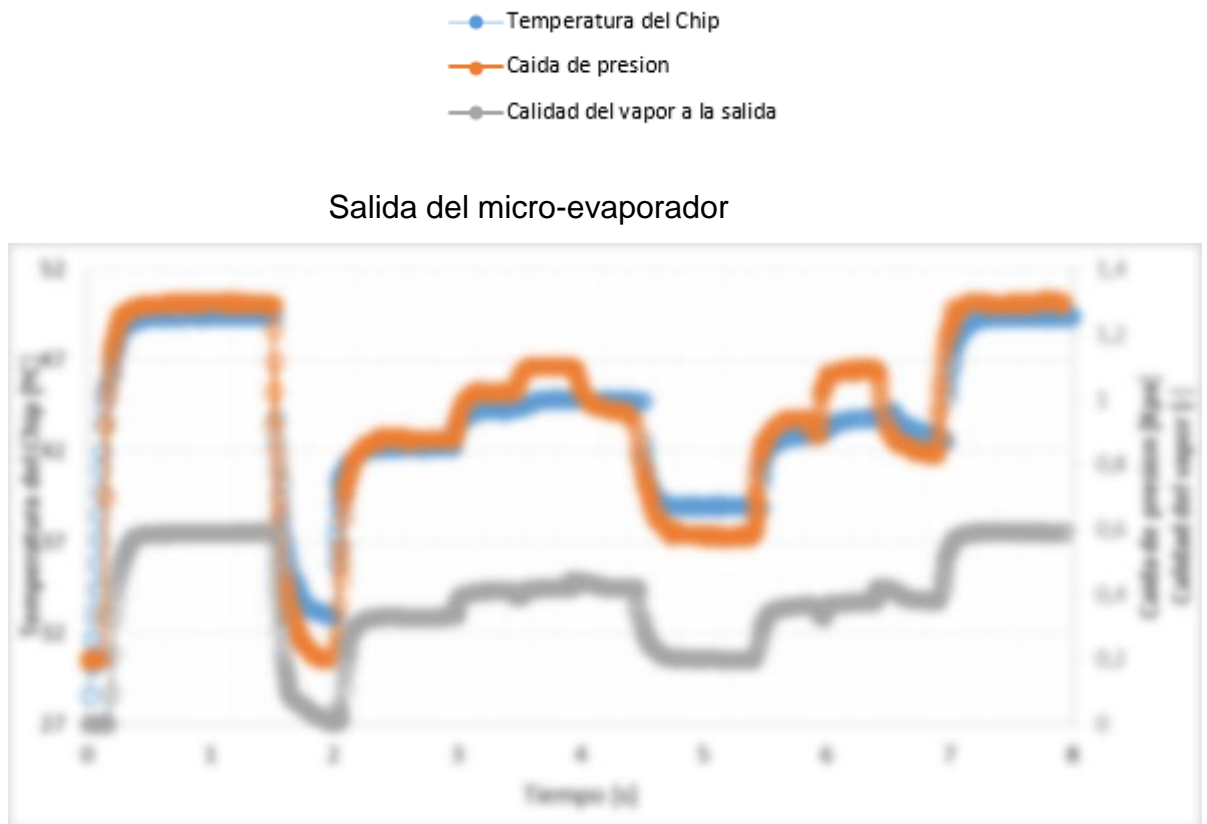
**FNUC:** Flujo no uniforme de calor.



Los flujos de calor variable fueron simulados con rampas en función del tiempo a través de una correlación dada en la literatura, donde se asemeja la funcionalidad de los microprocesadores cuando inician una tarea de alto procesamiento hasta estado óptimo.

En la figura 30 se muestran los resultados obtenidos en términos de la calidad del vapor, la caída de presión total a la salida de los micro-canales, al igual que la temperatura del microprocesador, observando los diferentes perfiles presentados para cada una de las propiedades termodinámicas.

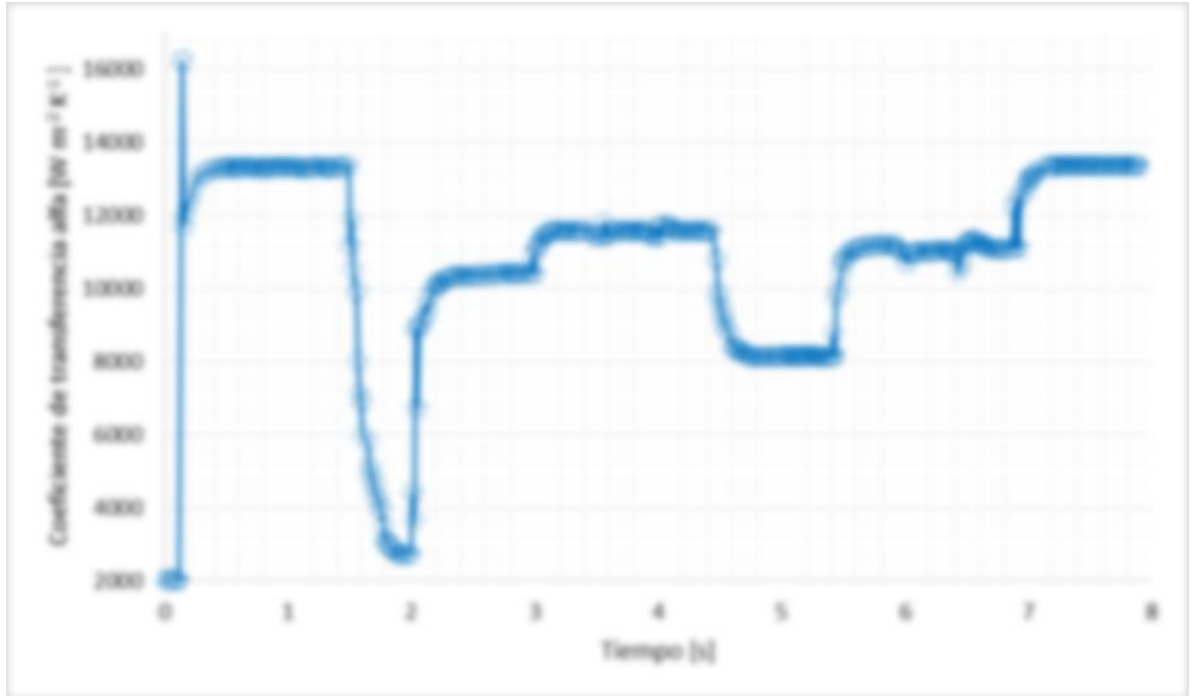
Figura 30. Perfiles de temperatura, caída de presión y calidad del vapor en estado transitorio.



El perfil del coeficiente de transferencia de calor ( $\alpha_{ftp}$ ) en la frontera del micro- evaporador se muestra en la figura 31. Los efectos de la posición de los puntos calientes se pueden apreciar en dos intervalos de instantes de tiempo entre 3 y 4,5 segundos de la simulación al igual que en el intervalo 5,5 y 7 segundos, aquí podemos encontrar calidades del 30 % aproximadamente y coeficientes de calor altos y con rangos de temperatura en el chip de 42 a 47 °C.

Se concluye que la variación de la calidad del vapor a la salida del micro- evaporador es despreciable, ya que la velocidad de la transferencia de calor en la frontera de las aletas y los materiales conductores no cambia, solo ocurre en un transitorio muy corto.

Figura 31. Perfiles coeficiente de transferencia de calor en estado transitorio.

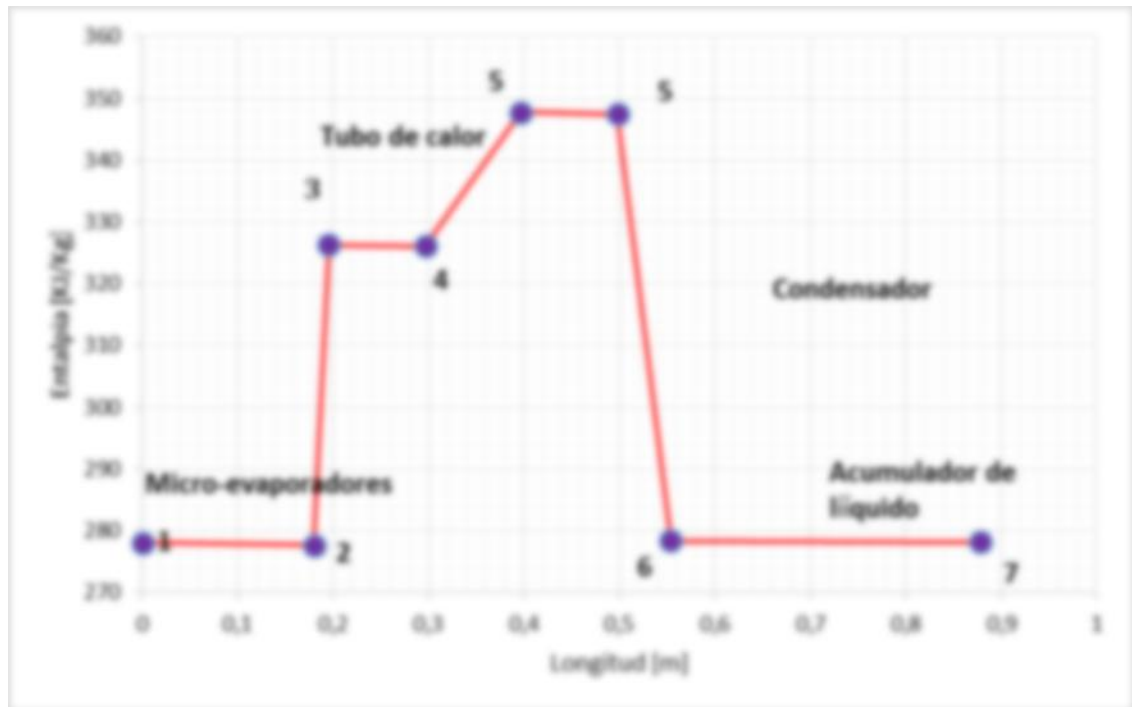


## 9.2. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CON TODOS SUS DISPOSITIVOS.

El sistema de enfriamiento con micro-canales y bomba de líquido es simulado completamente con el objetivo de conocer el comportamiento energético, que el ciclo de refrigeración proporciona a la industria de los microprocesadores, así en primera instancia se realizó un análisis de las entalpías a lo largo de su longitud del sistema pasando por cada uno de sus componentes.

A continuación, se muestra el perfil de las entalpías del ciclo de refrigeración. Se observa como ocurren cambios energéticos para diferentes caídas de presión en cada componente del sistema donde los puntos representan entradas y salidas según su orden, esto se aprecia en la figura 32, representando bajo un estado estable con las siguientes condiciones:

Figura 32. Entalpia del sistema en cada posición del ciclo de refrigeración.



La presión de saturación es de 5.7 bar y la temperatura ambiente de 24°C, con flujo de refrigerante de 22.4 gramos de R134a. El sistema es puesto en marcha iniciando con un flujo de calor de  $30 \frac{W}{cm^2}$  y unas pérdidas de calor de 100 W en los dispositivos auxiliares.

El condensador es también puesto en marcha con un flujo de agua  $11 \frac{Kg}{h}$  y temperatura de 37°C, esta temperatura es supuesta para tratar de recuperar el calor rechazado en los microprocesadores. Y la bomba de engranajes tiene una eficiencia isentrópica de 18%.

- **Refrigerante R134a**
- **Flujos de calor**

$$q_{ME1} = 30 \frac{W}{cm^2}, q_{ME2} = 30 \frac{W}{cm^2}$$

- **Flujo de refrigerante total**

$$m_{tot} = 10 \frac{Kg}{h}$$

- **Temperatura y flujo másico del agua en el condensador.**

$$T_{agua} = 37 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad m_{agua} = 11 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

- **Temperatura ambiente**

$$T_{amb} = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Después de 2 minutos de la simulación nos permitió concluir que se observa un incremento de la presión de condensación a 146 Kpa. Los flujos másicos del refrigerante en el sistema y el acumulador fueron de 8.9 y 18.5 gramos respectivamente en ese estado estable seleccionado.

La calidad del vapor obtenido en este instante es del 0,33, la caída de presión del sistema es tan solo de 4.3 Kpa y un consumo de la bomba de tan solo 132 mW, permitiendo ver que el sistema obtuvo un consumo energético muy pequeño para 2 microprocesadores.

### **9.3. ANÁLISIS PUESTA EN MARCHA Y SUMINISTRO DE FLUJO DE CALOR DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.**

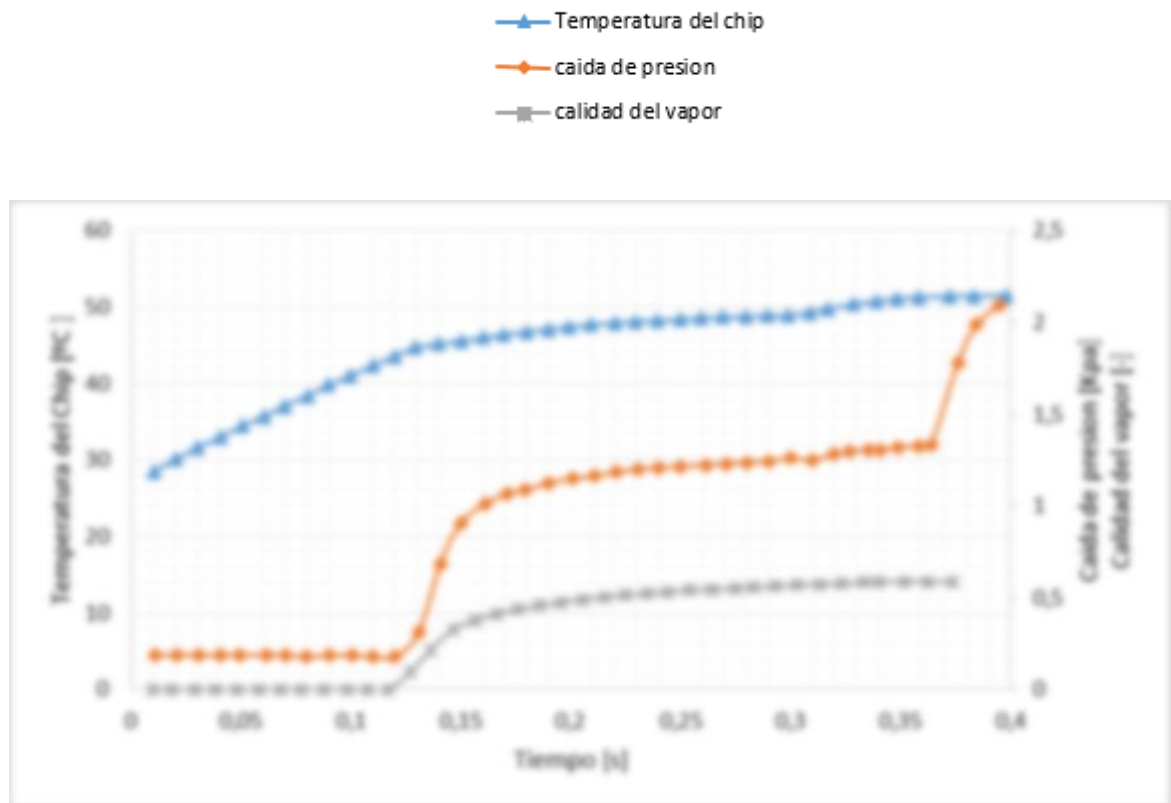
La puesta en marcha de un sistema de enfriamiento representa altos consumo, para conocer los efectos de esta estado se realizó la simulación para los primeros instantes de tiempo en donde se inicia el ciclo desde cero hasta su estabilización, al igual para el instante donde son suministrados los flujos de calor.

En la figura 33 se muestra la transición de la fase líquida a la fase bifásica, es observada en los primeros 0,2 segundos, cual lleva un decremento en la resistencia de la transferencia de calor. El overshoot del coeficiente de transferencia de calor promedio de la pared del microprocesador es dado por la acumulación del calor en el dispositivo durante el flujo monofásico y luego la

repentina liberación de calor en flujo bifásico aumenta la eficiencia de la transferencia de calor como se observa en la figura 34.

El siguiente overshoot, es de la temperatura del microprocesador que decrece rápidamente, donde el sistema comienza a buscar su estado estable después de ser puesto en marcha a los 0,5 segundos de ser iniciada la simulación.

Figura 33. Perfiles de temperatura, caída de presión y calidad del vapor en con el modelo del micro-evaporador, puesta en marcha.



Al iniciar las perturbaciones de los flujos de calor es cuando comienza a incrementarse las diferentes propiedades termodinámicas, el primero en tener efecto es la temperatura del microprocesador, la presión y la calidad del vapor toma valores muy altos como se muestra en la figura 35, cuando es suministrado un flujo de calor de 15 a  $80 \frac{W}{cm^2}$ . En la figura 36 el coeficiente de transferencia de

calor se incrementa en 0,02 segundos de 2800 a casi 9000  $\frac{W}{m^2K}$  y se estabiliza en una calidad de 0,3.

Figura 34. Perfiles de coeficiente de transferencia de calor con el modelo del micro-evaporador, puesta en marcha.

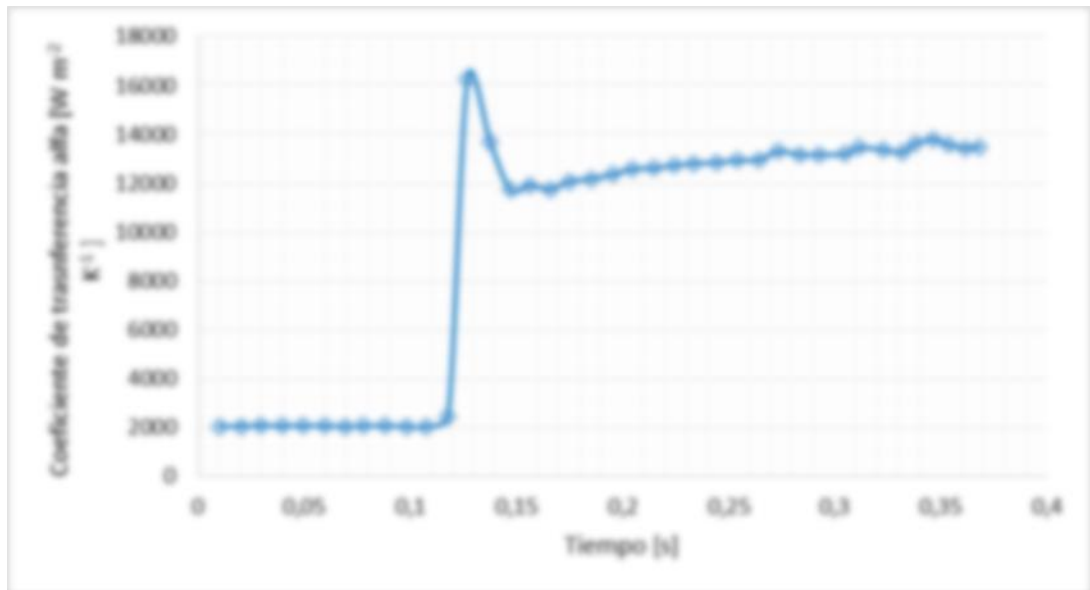


Figura 35. Perfiles de temperatura, caída de presión y calidad del vapor con el modelo del micro-evaporador, con flujo de calor.

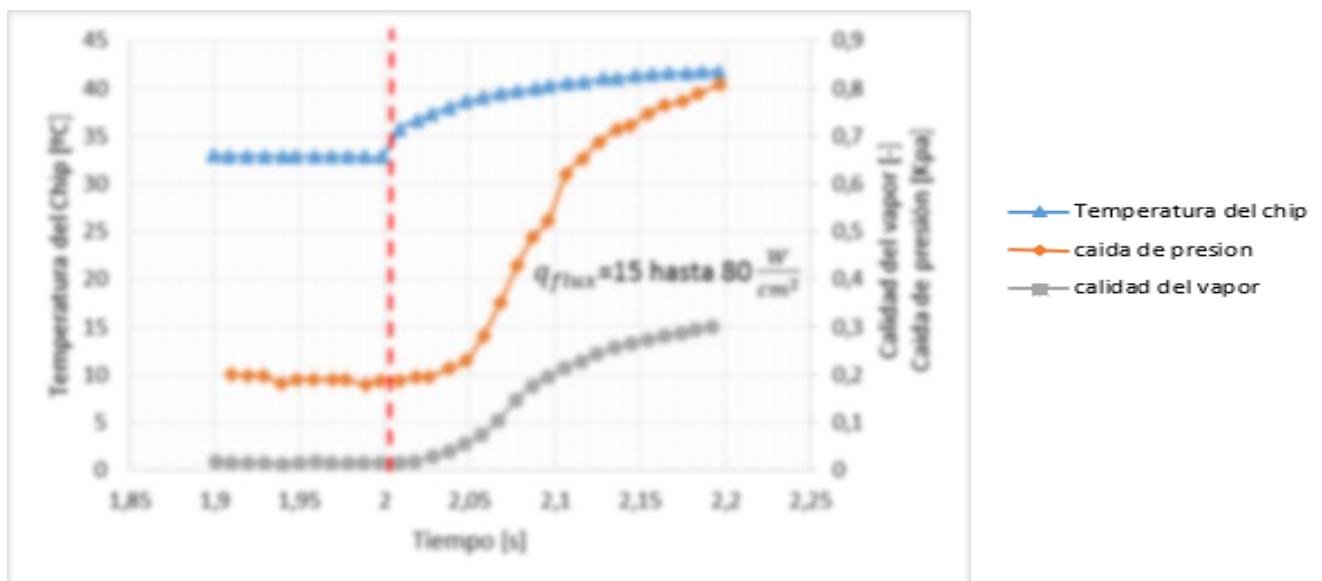
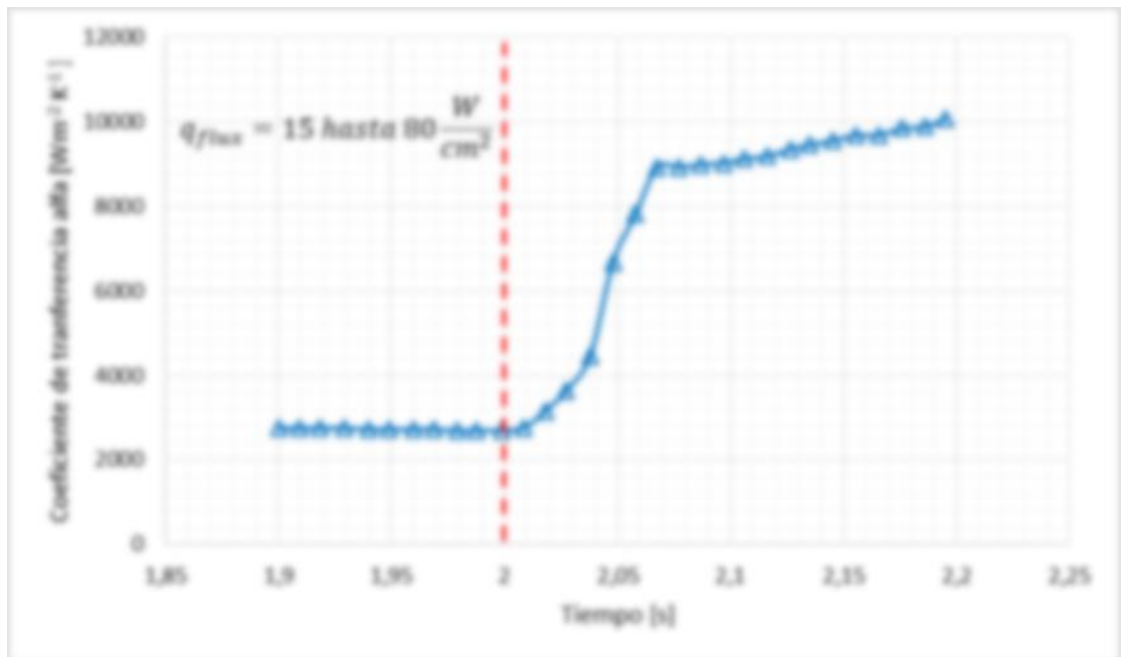


Figura 36. Perfiles de coeficiente de transferencia de calor en con el modelo del micro-evaporador, con flujo de calor.



### 9.3. SIMULACIÓN DEL MICRO-EVAPORADOR A TRAVÉS DE SU LONGITUD.

La siguiente simulación nos permitirá ver la respuesta del micro-evaporador a través de 6 diferentes instantes de tiempo, observando el comportamiento a lo largo de la longitud ( $L_{length}$ ), lo cual nos deja ver como el sistema pasa de monofásico a la entrada y bifásico a la salida.

Las figuras 37 y 38 representan el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura del chip para 6 diferentes instantes de la simulación, donde se aprecian las ventajas de este sistema, sometido a un flujo de calor variable.

La zona de sub-enfriamiento y la zona anular de burbujas aisladas (Efectos de puntos calientes) permiten apreciar el perfil de cambio de fase ocurrido en el estado transitorio de la figura 37 donde se percibe como pasa de flujo monofásico a flujo bifásico en los instantes de tiempos  $t_4$ ,  $t_5$  y  $t_6$ . Mostrando un incremento del coeficiente de transferencia de calor a través de la región de los puntos calientes y del flujo de las burbujas en la zona anular.

Figura 37. Perfil del coeficiente de transferencia de calor, bajo perturbaciones de flujos de calor en el modelo de simulación del micro- evaporador, para diferentes instantes de tiempo.

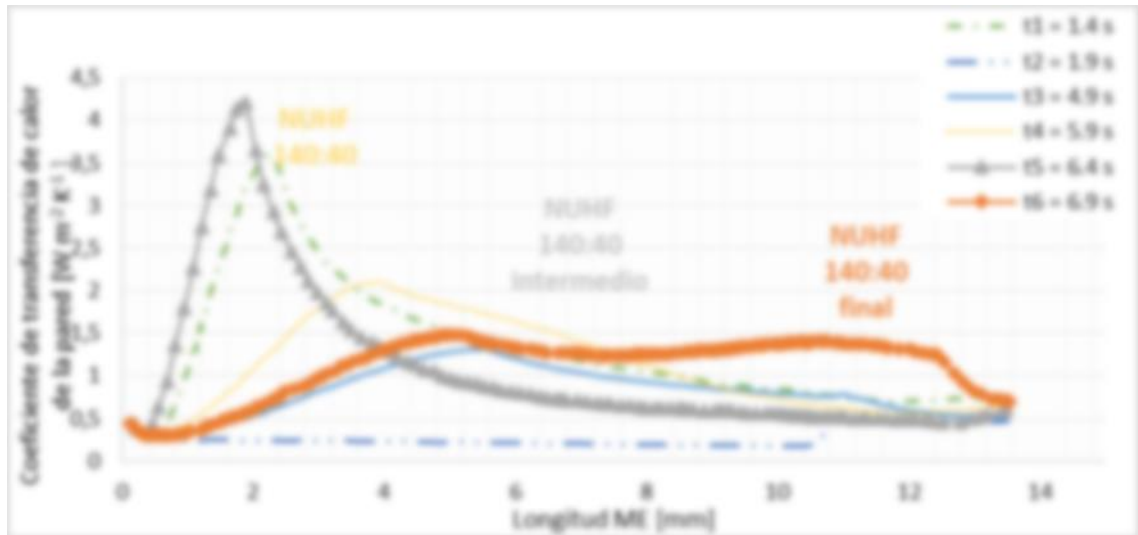
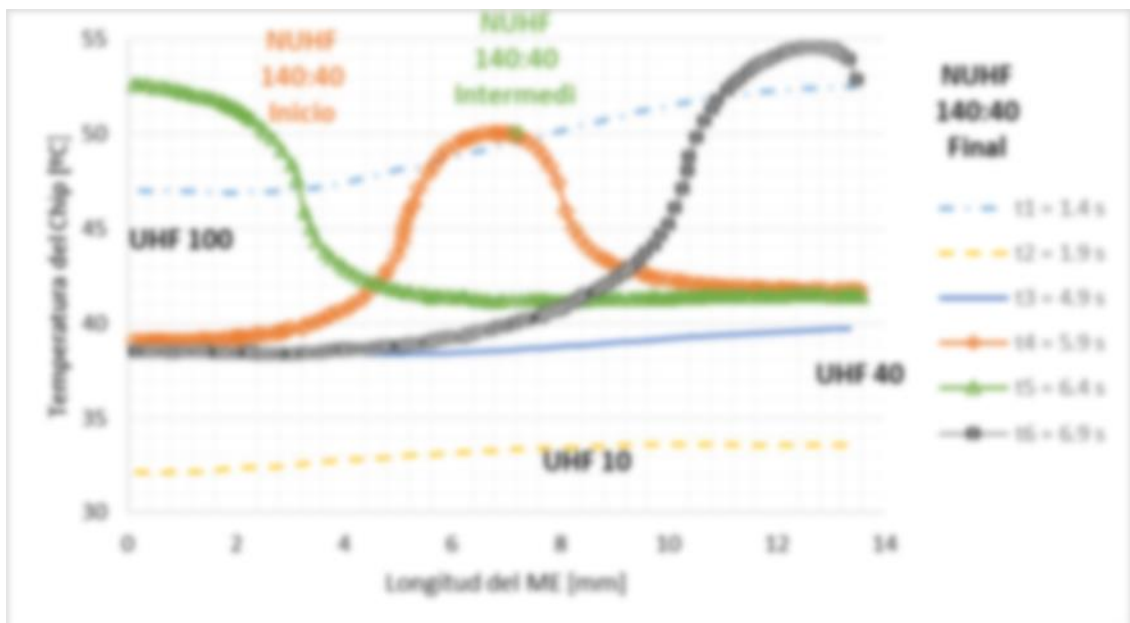


Figura 38. Perfil de temperatura, bajo perturbaciones de flujos de calor en el modelo de simulación del micro- evaporador, para diferentes instantes de tiempo.



La anterior simulación nos permite concluir que se obtienen buenos resultados del coeficiente de transferencia de calor en a la entrada del micro- evaporador

gracias a que se garantiza una calidad del vapor de 30% aproximadamente y esto es posible de obtener gracias a los micro-canales.

Las figuras 39, 41, 43 y 45 donde se muestra la simulación de diferencias finitas para varios instantes de tiempo de la simulación. Con el objetivo de apreciar la variación de la temperatura a lo largo de los materiales conductores que amortiguan el calor transferido desde el microprocesador. Su sistema de coordenadas está determinada de la siguiente manera. Para el eje de las y, es 0 a nivel del microprocesador y el eje de las z, es 0 en la entrada del micro-evaporador en dirección a donde fluye el refrigerante a través de los micro-canales.

En las figuras 39 y 41 es observada esa retención de calor generada por los materiales conductores para permitir que llegue flujos de calor más distribuidos a los micro-canales, en estos instantes la transferencia de calor es muy poca.

La propagación del calor desde el punto más caliente es percibida claramente en la figura 43 y 45, al igual la alta resistencia térmica del metal líquido y la silicona es mostrada en el bosquejo de las temperaturas. De igual manera en las figuras 40, 42, 44 y 46 es mostrado el perfil del coeficiente de transferencia de calor en la pared ( $\alpha_w$ ) para cada uno de los casos anteriores en los respectivos instantes de tiempo.

Figura 39. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de  $t=0,2$  s.

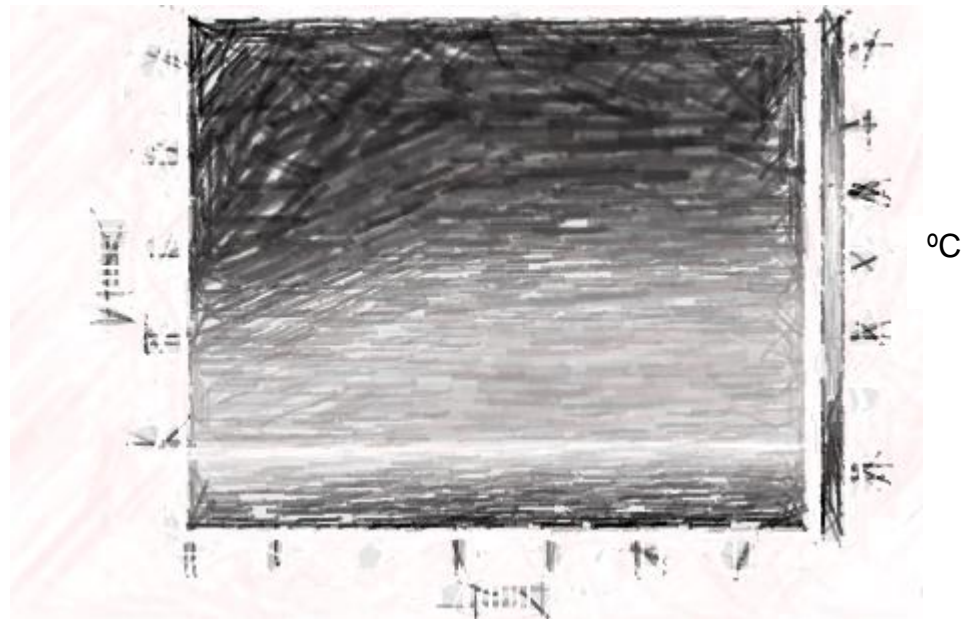


Figura 40. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de  $t=0,2$  s.

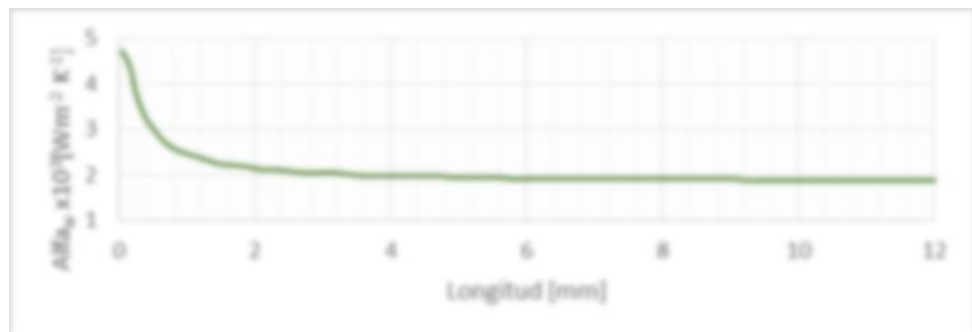


Figura 41. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de  $t=0,3$  s.

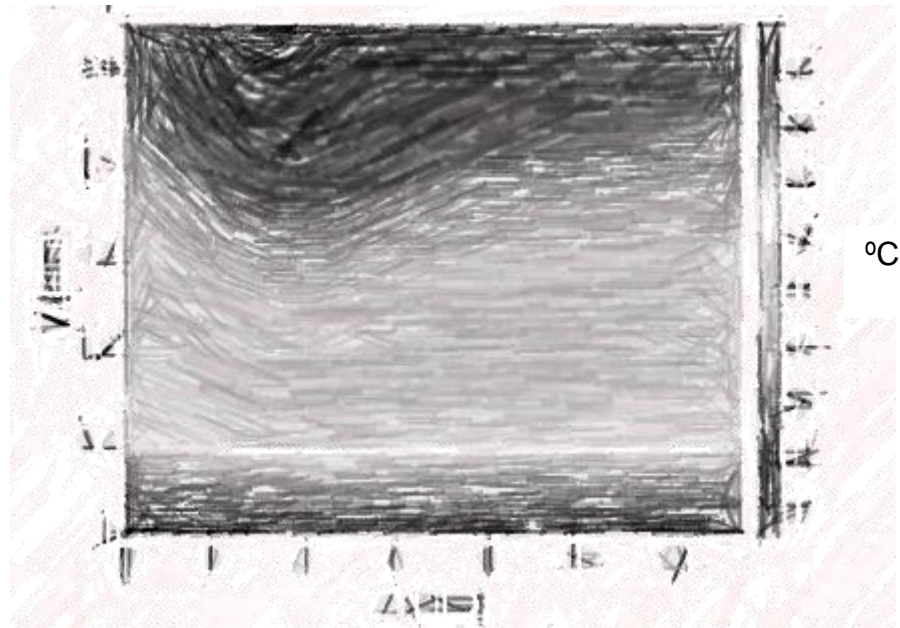


Figura 42. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de  $t=0,3$  s.

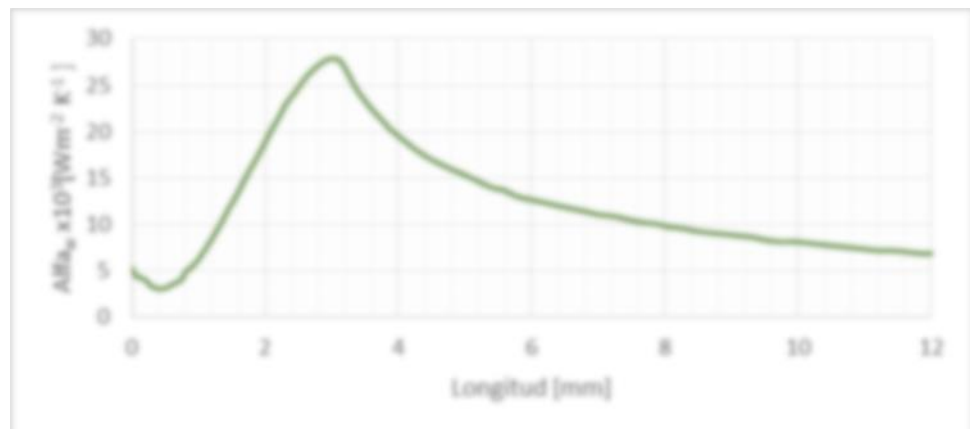


Figura 43. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de  $t=1,8$  s.

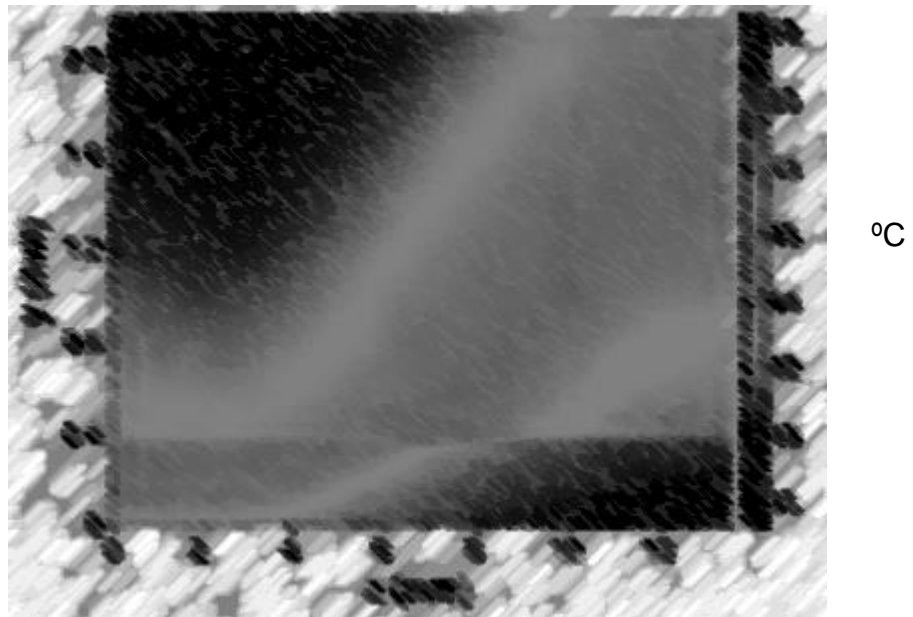


Figura 44. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de  $t=1,8$  s.

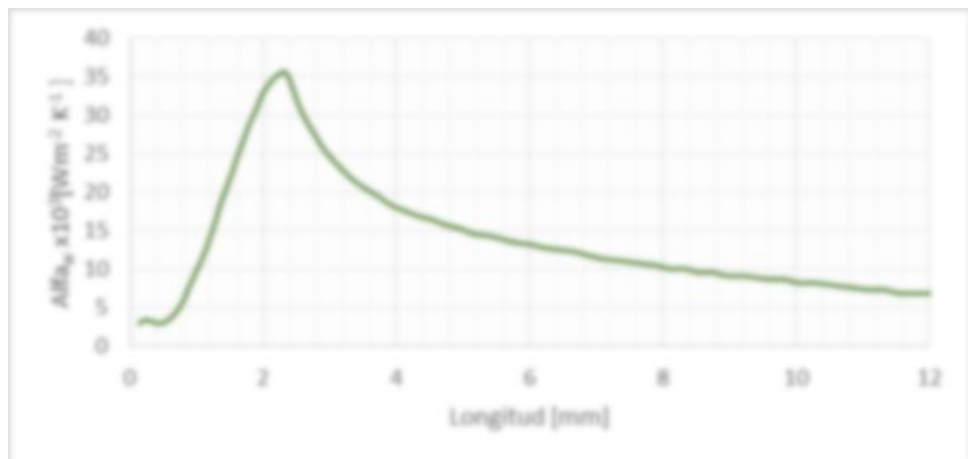


Figura 45. Simulación de diferencias finitas del perfil de temperatura del micro-evaporador en 2 dimensiones, para un tiempo de  $t=6,6$  s.

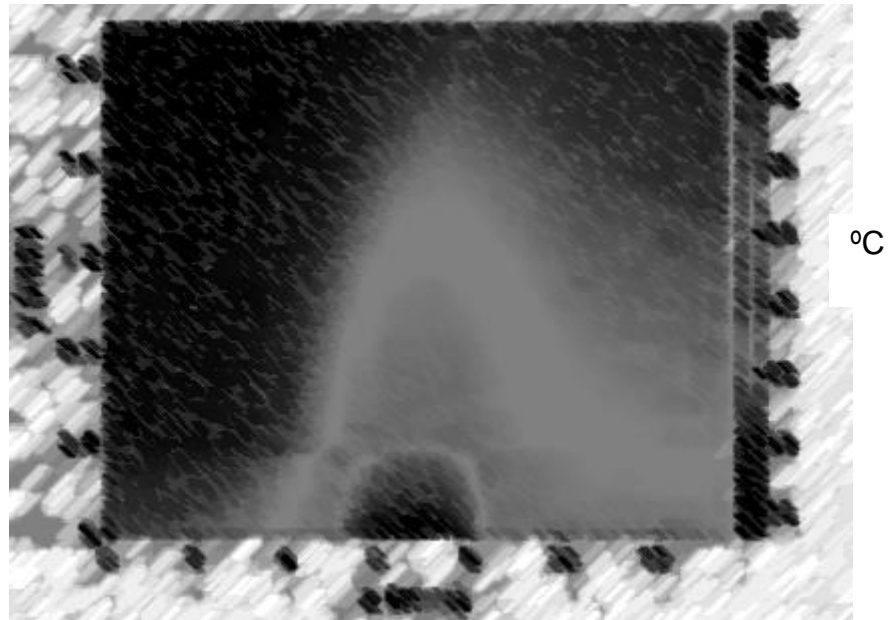
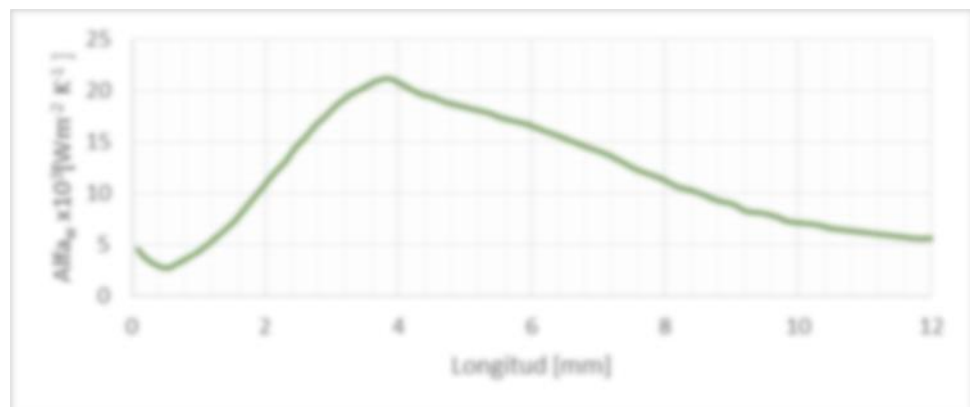


Figura 46. Perfil coeficiente de transferencia de calor del micro-evaporador a través de su longitud, para un tiempo de  $t=6,6$  s.



En la figura 47 y 48 se representará el resultado de un estado estable para ambos micro-evaporadores, el fluido a la entrada esta sub-enfriado a 0.4 °C, el cual es una apreciable consecuencia del pequeño tamaño del disipador de calor. Además, al ser compacto el sistema trae consigo pequeñas pérdidas de calor.

Desde la temperatura del fluido hasta la temperatura de la frontera de los materiales conductores con los micro-canales, el coeficiente de transferencia de calor en la frontera ( $\alpha_{ftp}$ ) está determinado por el coeficiente de transferencia de calor en la pared ( $\alpha_w$ ) y la eficiencia de las aletas de los micro-canales dada por la ecuación 5.28 (es calculado por el modelo propuesto por Costa-Patry y Thome, 2013).

La eficiencia de la aleta decrece cuando  $\alpha_w$  aumenta, porque al inducir un gran gradiente de temperatura este necesita mayor longitud de las aletas para disipar el mismo calor.

El calor convectivo de la ebullición da como resultado una alta resistencia térmica de la transferencia de calor con un valor de  $0,013 \frac{cm^2}{KW}$

Finalmente para este estado estable los valores de CHF en los disipadores arrojan un valor muy bajo de  $68,7 \frac{W}{cm^2}$ .

El estado estable del micro-condensador simulado se muestra en la figura 49. El intercambio de calor entre los micro-canales con el flujo de refrigerante del condensador y el flujo de agua en fase monofásica, es resultado de un alto coeficiente de transferencia de calor global con un valor de aproximadamente  $17000 \frac{W}{m^2K}$ ; en consecuencia esta pequeña resistencia térmica presenta un excelente resultado, ya que la temperatura mínima entre los dos fluidos de 5°C incluso para una corta longitud de 6 cm lo cual es de alta consideración para la recuperación de calor rechazado de los microprocesadores.

Figura 47. Perfil de temperatura y eficiencia de aleta en estado estable en ambos micro-evaporadores.

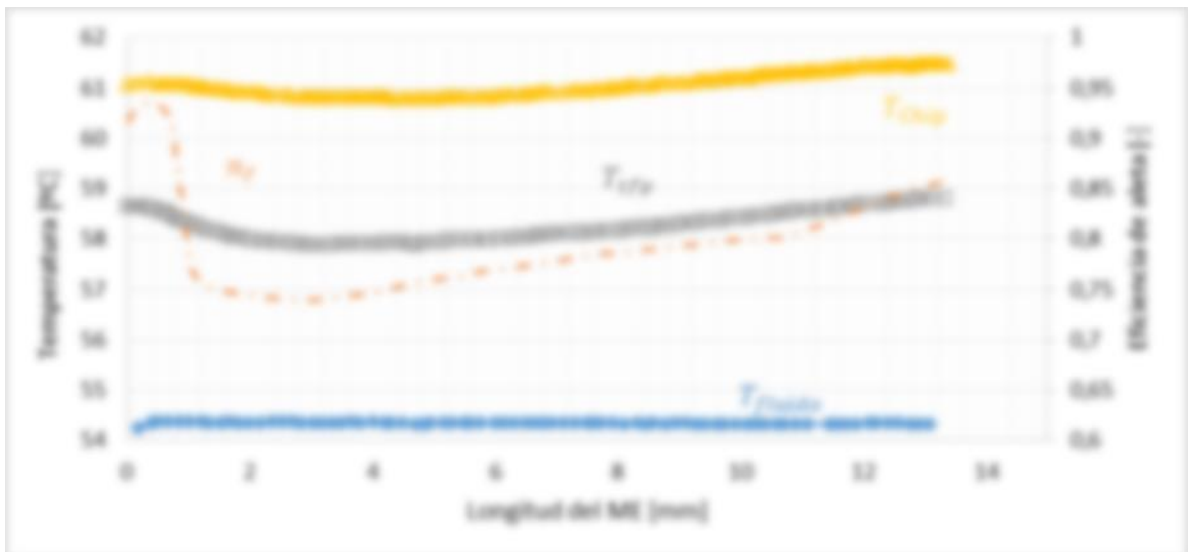
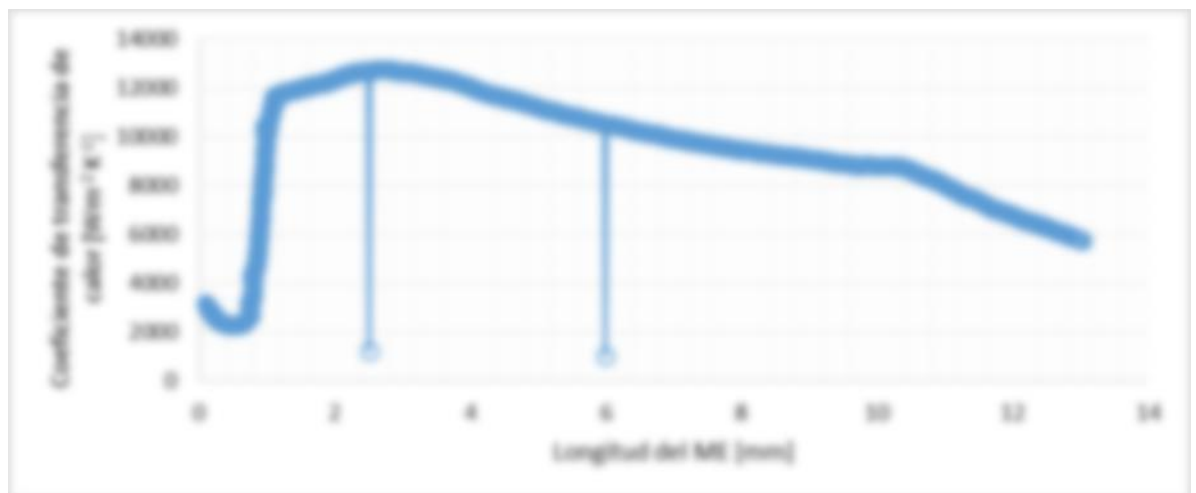
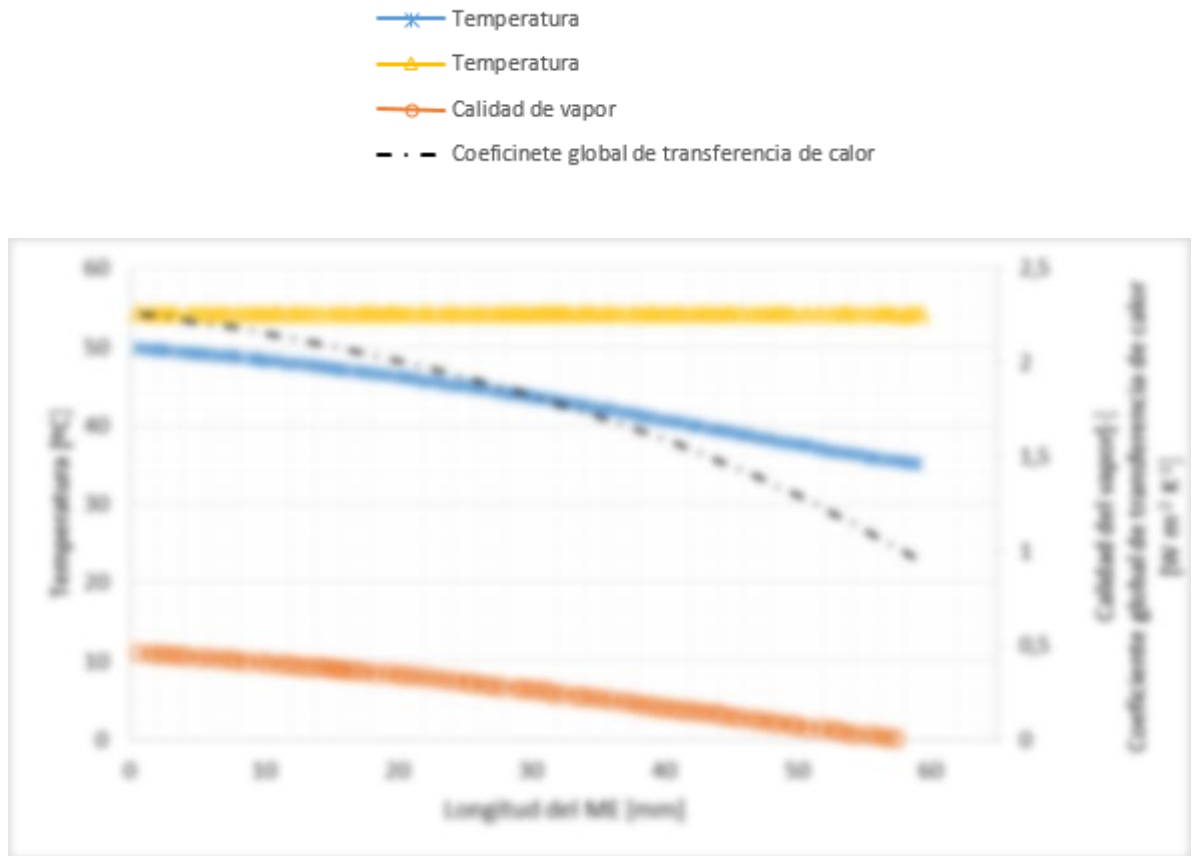


Figura 48. Perfil coeficiente de transferencia de calor en estado estable en ambos micro-evaporadores.



Para un condensador compacto con las especificaciones enunciadas anteriormente 191,5 W son recuperados para una temperatura de agua a la salida de 49,9 °C, con una recuperación de calor casi 90 %.

Figura 49. Perfil de temperatura, calidad del vapor y coeficiente de transferencia de calor en estado estable en micro-condensador.



#### 9.4 SIMULACIÓN DEL CONDENSADOR Y EL ACUMULADOR BAJO EFECTOS DEL CONTROLADOR.

Los resultados mostrados en la figura 50 están en términos de la presión de condensación, el flujo másico de agua y la masa de refrigerante en el acumulador, para todo el tiempo de simulación.

Para el caso donde no se aplica control (las líneas punteadas) el flujo másico de agua es constante, cuando las cargas de calor totales decrecen, la calidad del vapor decrece al mismo tiempo en el sistema.

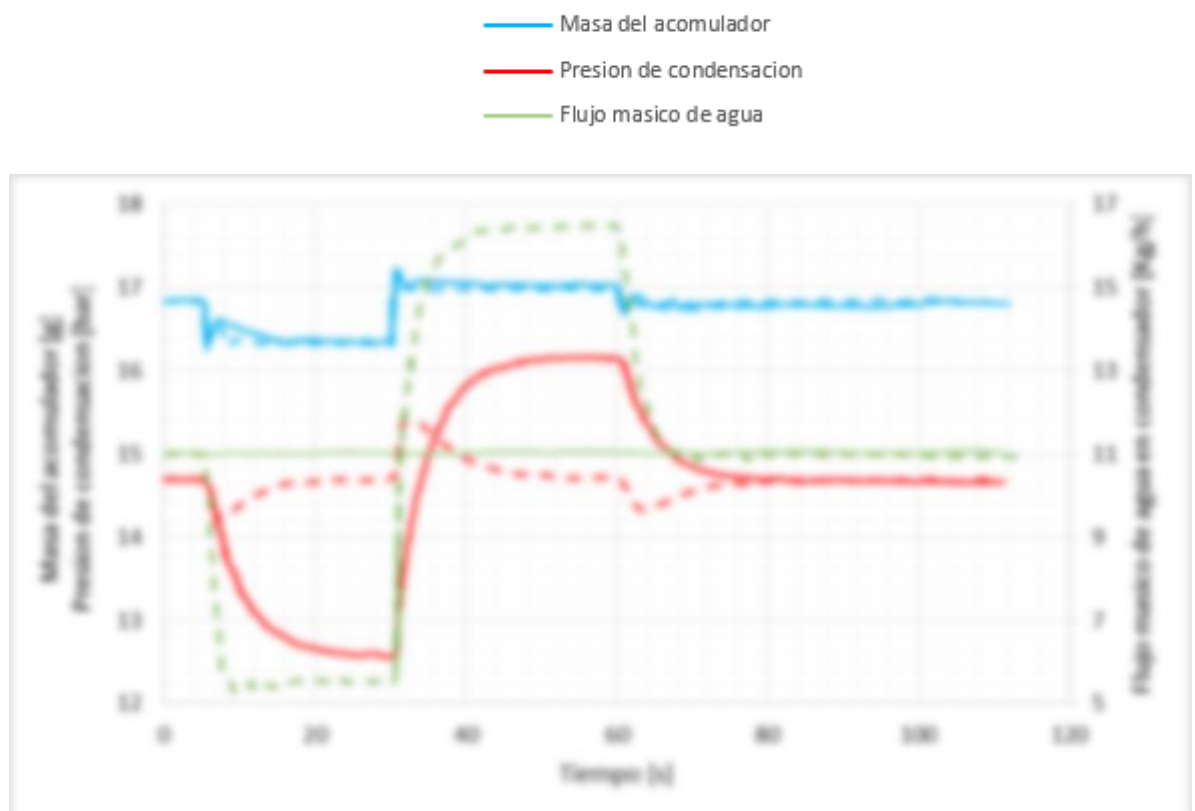
La masa de refrigerante que va saliendo del acumulador hacia el sistema disminuye, esto significa una pérdida de la presión de condensación.

Consecuentemente esta disminución de presión en el sistema produce un incremento en la calidad del vapor en la región bifásica, empujando la masa hacia el acumulador de nuevo.

Para el caso del flujo de agua en el condensador con control, se presenta efectos de amortiguamiento en la variación del flujo másico del agua en el condensador, significa que el desarrollo del controlador es efectivo y eficiente ya que el tiempo en el que ocurre el overshoot es pequeño.

La máxima presión de condensación posee un set point que es del 6,6% (68 Kpa) donde se presenta la mayor fluctuación.

Figura 50. Perfil de presión, flujo másico de agua en el condensador y masa de refrigerante en el acumulado de líquido en condiciones de control.



## 10. CONCLUSIONES.

Se desarrolló una simulación dinámica de un ciclo de refrigeración bifásico con bomba de líquido, por medio de procedimiento de solución obtenido mediante un set de ODE45 de solución semi-implícita conociendo la capacidad de solucionar problemas rígidos y complejos.

La validación de las correlaciones utilizadas en el modelamiento computacional mostró errores menores al 18 %, para los estados estables y transitorios, demostrando la veracidad de los datos obtenidos.

La variación de los parámetros termodinámicos como son la temperatura, la presión, la calidad del vapor y el coeficiente de transferencia de calor en estado transitorio permitió observar las ventajas y desventajas del ciclo de refrigeración, al igual los comportamientos que este tiene consecuencia de las variaciones de cargas térmicas que se implementaron como perturbaciones.

Entre las ventajas tenemos que la temperatura se mostró como un factor importante para el buen funcionamiento de los microprocesadores, se obtuvo un perfil de temperatura en el tiempo con un flujo de calor constante de  $110 \frac{W}{cm^2}$  siendo la máxima temperatura que se registró de  $50^{\circ}C$ , estando dentro el rango de temperatura de trabajo de los procesadores más reconocidos en el mercado. La calidad de vapor juega papel importante y se observa claramente que la mejor calidad de vapor es de 30% porque se presenta menor cantidad de paredes secas y un coeficiente de transferencia de calor de  $13000 \frac{W}{m^2K}$  que bajo carga constante es altamente beneficioso para el rechazo de calor en los centros de datos.

Otra ventaja es que el valor de la potencia consumida por la bomba de engranajes utilizada para la impulsión del fluido refrigerante y siendo el único elemento que consume potencia fue de 132 mW en 120 seg, por lo tanto en una hora se tiene un consumo de 3.96 W considerado como un valor muy bueno para el ahorro energético que necesita estos sistemas de refrigeración.

El coeficiente de transferencia de calor en el micro-evaporador tiene comportamiento muy significativo a la hora de transportar el calor, ya que presenta un punto muy alto a la entrada de  $4,3 \cdot 10^4 \frac{W}{m^2K}$  a los 1,9 mm para un instante de tiempo de 6.4 seg. Bajo un flujo de calor no uniforme nos permite concluir que la configuración de micro-canales proporciona al sistema un comportamiento bueno en cuanto al rechazo de calor generado por el microprocesador ayudando a que en poco tiempo se pueda retirar una gran carga térmica.

El comportamiento de los otros componentes del sistema no tiene mucha relevancia, si se compara con el micro-evaporador ya que ellos se encargan de la carga térmica retirada y no representan puntos clave para el aumento de la eficiencia global.

Una de las desventajas que se presentan, es en el sistema de control que es utilizado para garantizar condiciones de flujo bifásico, ya que requiere de sensores de caudal y de presión con buena precisión, para dar la condición de un parámetro que no es medible como lo es la calidad del vapor. Además otra desventaja el límite de flujo de calor del micro-evaporador ya que para obtener buenos resultados en la transferencia de calor se debe trabajar por debajo del calor crítico.

Los diferentes perfiles de temperaturas y coeficientes de transferencia de calor permitieron argumentar que los sistemas de refrigeración en flujo bifásico y con micro-canales son de gran ayuda en la disipación de cargas térmicas sensibles, permitiendo dar solución a los problemas que se presentan de consumo energético y de eficiencia térmica que actualmente se tiene en los centros de datos, además que permite dar veracidad a las correlaciones utilizadas.

A través del intercambio académico en la Universidad São Paulo (USP), Escuela de Ingeniería de São Carlos (EESC), en la modalidad de pasantía de investigación, con ayuda de los diferentes profesores y estudiantes de posgrado logré mejorar mi capacidad de adaptabilidad, resolución de problemas, toma de

decisiones, comunicación oral y escrita en otro idioma. Además de ayudar en el desarrollo investigativo y formativo en las áreas de la ingeniería mecánica.

## **11.RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar el análisis con refrigerantes diferentes al R134a ya que este también representa efectos negativos en el medio ambiente, los nuevos refrigerantes que la industria nos ofrece pueden presentar ventajas aún más pronunciadas en cuanto a la capacidad de transporte de calor. Igualmente se invita a continuar con la investigación variando las dimensiones y configuraciones del ciclo de refrigeración o haciendo combinaciones con otros ciclos para la recuperación del calor, permitiendo mayores eficiencias globales y ahorrando altos consumos de potencia eléctrica.

Además se recomienda hacer un análisis energético y económico de los ahorros y consumos para poder evidenciar las ventajas de la implementación de ciclos de refrigeración con micro-canales y bomba de líquido.

## BIBLIOGRAFÍA

ALAIN VANDE WOUWER, SAUCEZ P., VILAS, C. Simulation of ODE/PDE Models with MATLAB®, OCTAVE and SCILAB: Scientific and Engineering Applications, (auth.).

ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI), “CHAPTER 5, TWO-PHASE FLOW”, 2009.

BERTSCH, S. S.; GROLL, E. A.; GARIMELLA. S V.; “A Composite Heat Transfer Correlation for Saturated Flow Boiling in Small Channels”, Bertsch, S S.; Groll, E A.; and Garimella, S V., "A Composite Heat Transfer Correlation for Saturated Flow Boiling in Small Channels"(2009). CTRC Research Publications. Paper 113. <http://docs.lib.purdue.edu/coolingpubs/113>.

BRUNO AGOSTINI,RE´MI REVELLIN, THOME, J. R.; FABBRI, M.; BRUNO M.; CALMI, D.; URS KLOTER “High heat flux flow boiling in silicon multi-microchannels – Part III: Saturated critical heat flux of R236fa and two-phase pressure drops”, 0017-9310/\$ - see front matter 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.005.

CHEN, J.C; Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow, EC Process Des & I. Dev. 5 (3) (1966) 322–329.

COLLIER JG, THOME JR (1994) Convective boiling and condensation, 3rd edn. Oxford Science Publications, New York, 1–33, 131–182, 183–213, 325–374.

COOPER, M.G; Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling – a wideranging examination using reduced properties, Adv. Heat Transfer 16 (1984) 157–239.

COSTA-PATRY, THOME, J. R. “Flow pattern-based flow boiling heat transfer model for microchannels” 0140-7007/\$esee front matter©2012 Elsevier Ltd and IIR. All rights reserved. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.12.00>.

GONÇALVES, R. J. “CONTROLE ATIVO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO BIFÁSICO”, Universidad de federal de rio de janeiro.

HAHNEMANN, R., MARSALA, J. and PITASI, M., 2004, “Pumped Liquid Multiphase Cooling”, in Proceedings IMECE - International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, CA, USA, paper 60669.

HAUSEN, H. Darstellung des Wärmeüberganges in Rohrendurchverallgemeinerte Potenzbeziehungen, Z. VDI BeiheftVerfahrenstechnik 4 (1943) 91–102.

MARCINICHEN, J. B; DUAN WU, PAREDES,S; THOME, J. R; BRUNO M. “Dynamic flow control and performance comparison of different concepts of two-phase on-chip cooling cycles” B. Marcinichen et al. / Applied Energy 114 (2014) 179–191.

MARCINICHEN, J. B; OLIVIER, J. A; VINICIUS DE OLIVEIRA AND THOME, J. R. “A review of on-chip micro-evaporation: Experimental evaluation of liquid pumping and vapor compression driven cooling systems and control” J.B. Marcinichen et al. / Applied Energy 92 (2012) 147–161.

MÜLLER/STEINHAGEN, H. e HECK K. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. Chemical Engineering and Processing. Process Intensification. Vol. 20, n.6, p. 297-308. 1986. doi: 10.1016/0255-2701(86)80008-3.

NACIMENTO, F. J. “Studio teorico- experimental de la transferencia de calor y la perdida de presion en un dissipador de calor basado en microcanales”.

REVELLIN, THOME, J. R. “Adiabatic two-phase frictional pressure drops in microchannels”, 0894-1777/\$ - see front matter 2006 Elsevier Inc. All rights reserved. doi:10.1016/j.expthermflusci.2006.07.001.

RODRIGUES, V. M. “Simulação computacional de um sistema de refrigeração de adsorção acionado por gases quentes de exaustão”, Universidad de CAMPINAS.

ROHSENOW, W.M. 1963. Boiling heat transfer. In Modern developments in heat transfer, W. Ibele, ed. Academic Press, New York.

WOJTAN, L.; RIBASTKI, G.; THOME, J. R.; “An analysis of experimental data and prediction methods for two-phase frictional pressure drop and flow boiling heat transfer in micro-scale channels”, 0894-1777 - see front matter 2006 Elsevier Inc. All rights reserved. doi:10.1016/j.expthermflusci.2006.01.006.

ZHOU, R.; ZHANG, T.; CATANO, J.; WEN, J. T.; GREGORY J. MICHNA,. PELES, Y.; JENSEN, M. K. "The steady-state modeling and optimization of a refrigeration system for high heatflux removal", 1359-4311/\$esee front matter 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.05.023.

ZUBER, N., TRIBUS, M.; AND WESTWATER, J.W. 1962. The hydrodynamic crisis in pool boiling of saturated and subcooled liquids. Proceedings of the International Heat Transfer Conference 2:230, and discussion of the papers, vol. 6

## **ANEXOS**

## **ANEXOS A. DATOS DEL BANCO EXPERIMENTAL**

**Tabla A1. Datos experimentales del banco de pruebas para la validación.**

$T_{disipador}$	$T_2$	$T_3$	$\Delta p$	$\dot{m}$	$P_{entrada}$	Q
23,6	20,5	23	3,3	1	677	3,6
26,9	20,6	25,7	3,3	1	677	7,7
27,8	20,6	25,9	3,1	1	681	10,2
27,6	20,6	25,5	3,9	1	677	11,5
28,1	20,4	25,6	4,6	1	678	15,3
28,6	20,6	25,6	5,5	1	677	19,1
29,1	20,6	25,6	6,3	1	678	23
29,6	20,4	25,6	7	1	677	26,8
30	20,6	25,6	7,9	1	678	30,6
30,6	20,7	25,7	8,5	1	678	34,4
30,9	20,5	25,6	9,3	1	677	38,3
31,4	20,5	25,5	9,9	1	677	42,1
31,9	20,6	25,6	10,6	1	677	45,9
32,2	20,7	25,6	11,5	1	678	49,7
32,6	20,5	25,6	12,1	1	677	53,6
33,2	20,6	25,6	12,9	1	677	57,4
33,2	20,4	25,4	13,7	1	677	61,2
33,6	20,5	25,4	14,4	1	677	65
34	20,7	25,4	15,3	1	678	68,9
33,6	20,4	25,6	14,3	1	677	65
33,2	20,5	25,4	13,7	1	677	61,2
32,9	20,3	25,5	12,9	1	677	57,4
32,6	20,6	25,6	12,2	1	678	53,6
32,1	20,3	25,6	11,3	1	677	49,7
31,9	20,7	25,7	10,7	1	677	45,9
31,5	20,4	25,8	9,9	1	676	42,1
31	20,6	25,7	9,3	1	677	38,3
30,5	20,5	25,6	8,5	1	677	34,4
30,1	20,6	25,8	7,8	1	676	30,6
29,7	20,5	25,7	7,1	1	677	26,8
29,1	20,6	25,6	6,5	1	677	23
28,5	20,4	25,6	5,7	1	677	19,1
25	20,5	25,6	4,9	1	677	15,3
27,4	20,6	25,5	4,2	1	677	11,5
26,4	20,4	25,2	3,4	1	677	6,8
24,1	20,5	23,5	3,2	1	676	4,3
19	15,9	18,5	3,7	1	683	3,7
22,2	15,8	21,1	3,7	1	683	7,4
25,6	15,9	23,7	3,6	1	683	11
27,9	15,9	25,6	3,7	1	685	13,6
28,8	16,1	26,1	4,1	1	685	19,1
29,2	15,8	26	4,8	1	684	23

29,8	15,9	26,2	5,4	1	686	26,8
30,4	15,7	26,3	5,9	1	685	30,6
30,9	16	26,3	6,6	1	684	34,4
31,6	15,9	26,4	7,2	1	684	38,3
31,8	15,7	26,2	7,9	1	684	42,1
32,4	16	26,3	8,6	1	683	45,9
32,8	16	26,2	9,25	1	686	49,7
33,2	16	26,2	9,9	1	684	53,6
33,5	15,9	26	10,6	1	684	57,4
33,9	15,9	26	11,3	1	684	61,2
34,4	16,3	26,2	12	1	684	65
34,8	16,1	26,1	12,7	1	685	68,9
34,4	16	26,1	12	1	683	65
34	15,8	26	11,4	1	684	61,2
33,7	16	26,2	10,7	1	684	57,4
33,1	15,6	26,1	9,9	1	684	53,6
32,9	15,9	26,3	9,4	1	685	49,7
32,4	15,9	26,2	8,8	1	683	45,9
31,9	15,7	26,2	8,1	1	684	42,1
31,5	16	26,3	7,5	1	685	38,3
31	15,8	26,3	6,8	1	684	34,4
30,4	15,7	26,21	6,2	1	682	30,6
29,9	15,7	26,2	5,5	1	683	26,8
29,4	15,8	26,3	4,9	1	685	23
28,6	15,7	26	4,3	1	682	19,1
27,7	15,6	25,7	3,7	1	683	14,2
26,2	15,9	24,5	3,4	1	684	12,1
22,9	158,6	21,7	3,4	1	684	8,5
19,8	15,8	19,2	3,4	1	685	4,8
23	20,2	22,4	2,7	1,25	671	3,8
25,7	20,2	24,4	2,7	1,25	671	7,4
28,7	20,3	26,7	2,8	1,25	672	11,5
27	20,3	24,9	3,9	1,27	675	12,3
27,3	20,5	24,9	4,1	1,25	676	13,4
27,8	20,6	25,1	4,4	1,25	677	15,3

28,2	20,6	25,2	4,7	1,25	687	17,2
28,6	20,6	25,3	5	1,25	679	19,1
29,3	20,6	25,5	5,5	1,25	681	23
30,1	20,8	25,7	5,9	1,25	683	26,8
30,7	20,8	25,8	6,4	1,25	684	30,6
31,1	21	26	7,9	1,25	687	34,4
31,7	21,1	26	8,6	1,25	689	38,3

32,2	21,3	26,1	9,3	1,25	691	42,1
32,7	21,3	26,2	10	1,25	693	45,9
32,3	21,2	26,2	9,3	1,25	692	42,1
31,8	21,1	26,2	8,6	1,25	691	38,3
31,6	21,2	26,1	9,5	1,25	690	38,3
31,1	21,2	26	8,9	1,25	688	34,4
30,4	20,8	25,8	8,2	1,25	684	30,6
29,6	20,6	25,5	7,4	1,25	680	26,8
29,1	20,7	25,6	6,5	1,25	681	23
28,3	20,5	25,2	5,6	1,25	676	19,1
27,8	20,4	25,1	4,9	1,25	675	17,2
27,4	20,3	24,9	4,3	1,25	673	15,3
26,9	20,2	24,7	3,8	1,25	672	13,4
26,5	20,2	24,6	3	1,25	671	11,5
26	20,2	24,4	2,4	1,25	670	9,6
25,4	20,2	24,1	1,8	1,25	670	7,7
24,5	20,2	23,4	1,8	1,25	671	5,8
23,2	20,3	22,5	1,9	1,25	673	4
18,1	15,4	17,5	4,8	1,25	677	3,6
21,1	15,6	19,8	4,8	1,25	678	7,4
23,9	15,8	22	4,8	1,25	679	11
26,6	15,6	24	4,7	1,25	678	14,8
29,4	15,6	26,1	4,7	1,25	680	19,1
32,2	15,6	28,2	4,7	1,25	680	23
29,5	15,7	25,8	6,2	1,25	679	26,8
30,2	15,8	25,9	7	1,25	681	30,6
30,6	15,6	25,8	7,8	1,25	680	34,4
31,1	15,7	25,9	8,6	1,25	678	38,3
31,6	15,6	25,9	9,3	1,25	679	42,1
32	15,5	25,8	10,2	1,25	679	45,9
32,4	15,5	25,7	10,9	1,25	679	49,7
33	15,7	25,8	11,8	1,25	679	53,6
33,2	15,7	25,9	12,5	1,25	679	57,4
33,5	15,6	25,8	13,2	1,25	679	61,2
33,2	15,7	25,9	12,5	1,25	680	57,4
32,6	15,5	25,8	11,7	1,25	679	53,6
32,4	15,5	25,7	11	1,25	679	49,7
32	15,6	25,8	10,2	1,25	678	45,9
31,6	15,6	25,9	9,5	1,25	679	42,1
31,1	15,7	25,9	8,8	1,25	679	38,3

30,6	15,6	25,9	8	1,25	678	34,4
30	15,6	25,9	7,2	1,25	679	30,6
28,5	15,6	25,9	6,5	1,25	678	26,8
28,8	15,5	25,7	5,8	1,25	679	23
28	15,6	25,4	5,1	1,25	678	17,2
26,9	15,6	24,5	4,7	1,25	678	15,6
24,5	15,5	22,5	4,6	1,25	678	12,3

21,8	15,7	20,6	4,6	1,25	679	8,5
18,8	15,5	18,2	4,6	1,25	679	4,6
22	19,6	21,4	4,8	1,5	659	3,7
24,5	19,7	23,2	4,8	1,5	660	7,4
27,1	19,8	25,1	4,7	1,5	662	11,5
28,5	19,9	26,1	4,7	1,5	665	13,4
29,9	20	27,1	0,7	1,5	667	15,3
28	20,1	24,9	6,2	1,5	667	17,2
28,5	20,1	25	6,5	1,5	670	19,1
29,1	20,2	25,1	7,3	1,5	670	23
29,6	20	25	8,2	1,5	668	26,8
30,1	20	24,9	8,9	1,5	667	30,6
30,5	250	24,8	9,6	1,5	666	34,4
30,5	20,1	24,8	12,4	1,5	668	38,3
31,1	20,1	24,9	13,3	1,5	671	42,1
31,4	20,1	24,8	13,8	1,5	670	45,9
31,9	20,2	24,9	14,7	1,5	672	49,7
32,5	20,5	25,2	15,5	1,5	678	53,7
33,1	20,8	25,3	16,4	1,5	682	57,4
33,5	20,8	25,3	17,3	1,5	682	61,2
32,5	20	24,3	18,5	1,5	663	61,2
31,9	20	24,5	16,6	1,5	666	53,5
31	20	24,5	14,6	1,5	665	45,9
30,3	20	24,6	12,5	1,5	665	38,3
29,3	19,9	24,7	10,6	1,5	665	30,6
28,2	19,9	24,6	8,8	1,5	664	23
27	19,9	24,5	6,8	1,5	665	15,3
24,9	19,8	23,6	5,2	1,5	663	7,9
22,4	19,8	21,8	5,2	1,5	663	4,1
19,2	16,8	18,5	4,7	1,5	702	3,7
21,9	16,9	20,5	4,7	1,5	704	7,5
24,4	16,9	22,3	4,7	1,5	704	11,3
27	17	24,2	4,6	1,5	706	15
29,5	17	25,9	4,6	1,5	708	18,8
30,8	17	26,8	4,5	1,5	708	20,7
32,1	17,1	27,8	4,5	1,5	709	23
30,6	17,4	26,7	5,8	1,5	716	24,9
31	17,5	26,9	6,1	1,5	715	26,8
31,6	17,4	27	6,6	1,5	714	30,6
32,3	17,4	27,2	7,2	1,5	717	34,4

32,8	17,4	27,2	7,8	1,5	715	38,3
33,3	17,4	27,3	8,4	1,5	716	42,1
33,6	17,4	27,2	9,2	1,5	716	45,9
34	17,4	27,2	10	1,5	715	49,7
33,8	17,4	27,3	10,1	1,5	716	49,7
34,4	17,6	27,5	10,9	1,5	720	53,6
34,6	17,6	27,3	12,1	1,5	718	57,4

34,7	18	27,8	12,5	1,51	728	53,6
33,8	17,5	27,2	12,5	1,5	715	49,7
33,5	17,4	27,4	11,8	1,5	718	45,9
32,9	17,4	27,2	11,5	1,5	715	42,1
32,5	17,4	27,3	10,8	1,5	718	38,3
362	17,4	27,2	10,1	1,5	717	34,4
31,3	17,4	27,1	9,4	1,5	715	30,6
30,7	17,4	27	8,7	1,5	716	26,8
30	17,4	26,7	7,9	1,5	715	23
29	17,3	26,1	7,2	1,5	715	18,6
28,3	17,3	25,5	7	1,5	713	17,3
27,4	17,4	24,7	6,7	1,5	716	15,5
25,1	17,4	23	6,8	1,5	715	11,9
22,6	17,4	21,2	6,6	1,5	718	8
20	17,4	19,3	4,8	1,5	717	4
22,7	21	22	9,5	2,5	687	3,5
24,4	20,9	23	9,5	2,5	686	7,4
26,1	20,9	24,1	9,5	2,51	686	11,2
27,9	21	25,2	9,5	2,5	688	15
29,1	21,2	25,8	9,9	2,5	690	19,1
29,8	21,2	25,9	11,1	2,5	691	23
30,3	21,3	25,9	12,7	2,5	691	26,8
30,9	21,3	25,8	13,7	2,5	692	30,6
31,4	21,2	25,8	14,8	2,5	692	34,4
31,9	21,2	25,7	16	2,5	692	38,3
32,3	21,2	25,7	17	2,5	691	42,1
32,7	21,3	25,6	18,2	2,5	691	45,9
33	21,3	25,6	19,8	2,5	693	49,7
33,5	21,4	25,7	20,9	2,5	696	53,6
34,1	21,6	25,9	22,3	2,5	700	57,4
34,6	21,8	26	23,3	2,5	704	61,2
34,6	22	26	24,5	2,5	705	61,3
34,4	22,1	26,2	23,4	2,5	708	57,4
33,7	21,7	26	22,5	2,5	702	53,6
32,9	21,3	25,6	21,7	2,5	694	49,7
32,5	21,3	25,5	20,6	2,5	693	45,9
32	21,2	25,6	19,6	2,5	692	42,1
31,4	21,2	25,5	18,1	2,5	690	38,2
31	21,3	25,5	17	2,5	691	34,4
30,4	21,2	25,5	15,6	2,5	690	30,6

29,8	21,1	25,5	14,2	2,5	689	26,8
29,2	21,1	25,5	13	2,5	689	23
28,4	21	25,5	11,6	2,5	687	19,1
27,5	21	25,5	10,6	2,5	685	14,6
26	20,8	24,2	10,3	2,5	683	11,9
24,2	20,8	23	10,3	2,5	682	7,7
22,5	20,8	21,9	10,4	2,5	684	3,8

18,3	16,6	17,7	10,6	2,5	700	3,8
20,1	16,6	18,8	10,7	2,5	701	7,5
21,8	16,7	20	10,7	2,5	701	11,4
23,6	16,8	21,1	10,6	2,5	701	15,2
25,4	16,8	22,3	10,7	2,5	702	19,2
27,2	16,9	23,4	10,7	2,5	705	23
28,2	17	24,1	10,7	2,5	707	24,9
29,1	17	24,7	10,7	2,5	709	26,9
30,2	17,2	25,4	10,7	2,5	710	28,8
31,1	17,2	25,9	10,7	2,5	712	30,7
31,9	17,3	26,5	10,7	2,5	712	32,5
31,2	16,8	25,7	11,4	2,5	703	34,4
31,7	17	26	11,7	2,5	708	36,5
31,9	17	26,3	12,2	2,5	708	38,3
32,5	17,1	26,5	13,3	2,5	710	42
33	17,1	26,4	14,3	2,5	708	45,9
33,5	17,1	26,5	15,2	2,49	709	49,7
33,9	17,2	26,5	16,5	2,5	711	53,6
34,6	17,2	26,3	18,8	2,5	708	61,2
35,3	17,2	26,3	20,9	2,5	708	68,9
34,9	17	26,1	22,5	2,5	706	68,9
34	16,9	26,1	20,2	2,5	704	61,2
33,2	169,8	26,2	18,3	2,5	705	53,6
32,2	16,9	26,1	16,1	2,5	703	45,9
31,2	16,8	26,1	13,9	2,5	704	38,3
29,6	16,7	25,3	12,7	2,5	703	30,1
29,1	16,8	25	12,6	2,5	701	28,8
28,4	16,8	24,5	10,4	2,5	702	27
27,1	16,7	23,4	10,2	2,5	702	23,4
23,8	16,8	21,3	10,3	2,5	702	15,9
20,2	16,8	19	10,5	2,5	702	7,7
18,6	16,8	17,9	10,5	2,5	703	4
12,7	11	12,1	9,9	2,5	686	3,9
14,4	10,9	13,1	9,9	2,5	685	7,6
16,2	11	14,3	9,9	2,5	685	11,3
18	11	15,4	9,9	2,5	685	15,1
19,9	11,1	16,6	9,8	2,5	686	18,9
21,7	11,1	17,7	9,9	2,5	687	22,9
23,5	11,1	18,8	9,9	2,5	687	26,7
25,4	11,2	20	9,9	2,5	689	30,6

27,3	11,2	21,1	9,8	2,5	690	34,3
28,8	11	22	9,9	2,5	688	38,1
30,1	10,9	22,7	10	2,5	684	40,8
30,8	11	23,5	10,3	2,5	687	43,7
31,3	11,1	24,4	11,2	2,5	688	49,7
32	11	24,7	11,8	2,5	688	53,6
32,7	11,2	25,1	12,6	2,49	691	57,4

33,2	11,2	25,2	13,6	2,5	691	61,2
33,7	11,2	25,3	14,2	2,5	692	65
34,25	11,2	25,5	15	2,5	693	68,9
35,2	13	26,9	16	2,49	722	68,9
34,9	13	27	15,1	2,51	724	65
34,6	13,1	27,1	14,1	2,5	730	61,2
33,9	13	26,8	13,5	2,5	727	57,4
33,4	13	26,6	12,8	2,5	725	53,6
32	12,9	25,8	11,5	2,5	727	45,1
30	12,9	24,1	10,6	2,5	726	39,3
26,9	12,7	21,8	10,6	2,5	724	31,5
23,4	12,6	19,6	10,6	2,5	722	24
19,8	12,5	17,2	10,7	2,5	719	16,1
16,2	12,4	14,8	10,8	2,5	716	8,4
14,3	12,3	13,6	10,8	2,5	712	4,4
22,1	21,1	21,7	24	3,75	690	3,3
23,4	21,1	22,5	24,3	3,75	689	7
24,7	21,1	23,2	24,4	3,75	690	10,9
25,9	21	23,9	25,1	3,75	689	15,4
27,1	21	24,5	25,3	3,75	690	19
28,1	20,9	25,1	25,5	3,75	689	23
29,3	21,3	25,6	26,3	3,75	692	26,8
29,8	21	25,4	27,3	3,75	689	30,6
30,4	20,9	25,3	28,3	3,75	689	34,4
31	20,8	25,3	30	3,75	688	38,3
31,5	21,1	25,2	32,3	3,75	690	42,1
31,9	21,1	25	34,5	3,75	690	45,9
32,6	21,3	25,1	36,3	3,75	694	49,7
32,8	21,2	24,8	38,7	3,75	690	53,6
33,2	21,1	24,7	40,3	3,75	691	57,4
33,7	21,3	24,9	42,4	3,75	691	61,3
33,8	21	24,5	44,4	3,75	690	65
33,3	21,1	24,5	42,8	3,75	690	61,2
32,8	21	24,5	40,7	3,75	689	57,4
32,4	21,1	24,6	39,2	3,75	688	53,5
32	21,1	24,6	37,2	3,75	687	49,7
31,6	21,1	24,7	35,2	3,75	689	45,9
31	20,9	24,8	32,9	3,75	687	42,1
30,6	20,9	24,9	30,9	3,75	687	38,3
30	21	25	29,2	3,75	688	34,4

29,5	21,2	25,1	27,4	3,75	689	30,6
28,7	20,9	25,1	25,8	3,75	689	26,8
28	21,1	25,1	24,7	3,75	688	23
27,2	21,2	24,8	24	3,75	689	18,7
26	21,1	24	23,5	3,75	688	15,4
24,9	21,2	23,4	23,4	3,75	688	11,6
23,6	21,1	22,5	23,2	3,75	688	7,8

22,3	21,1	21,8	23,1	3,75	688	4,1
18,8	18,2	18,6	22	3,75	733	1,8
19,4	18,2	18,6	21,8	3,75	733	3,6
20,1	18,3	19,3	21,7	3,75	733	5,5
20,7	18,2	19,8	21,9	3,75	734	7,5
21,3	18,2	20	21,4	3,75	733	9
22	18,2	20,4	21,4	3,75	733	11,3
22,7	18,3	20,8	21,4	3,75	733	13,2
23,2	18,2	21,1	21,4	3,75	733	15,2
24	18,3	21,6	20,5	3,75	733	17,2
24,6	18,3	22	20,2	3,75	733	19,2
25,7	18,2	22,6	20,3	3,75	733	22,9
26,9	18,2	23,3	22,1	3,75	733	26,7
28,1	18,2	24	22,3	3,75	734	30,4
29,5	18,3	24,8	22,5	3,75	733	34,3
30,6	18,2	25,5	22,2	3,75	734	38,3
32,8	18,3	26,2	21,9	3,75	734	42,1
32,6	18,4	26,7	22	3,75	735	46
33,3	18,5	27	22,5	3,75	736	50
33,9	18,6	27,2	23,5	3,75	738	53,8
34,6	18,6	27,4	24,7	3,75	743	57,7
35,2	18,7	27,5	25,8	3,75	745	61,6
35,7	18,8	27,6	26,9	3,75	748	65,1
36,2	19,1	27,8	28,6	3,75	751	67,7
35,7	18,9	27,7	27,7	3,75	749	65
35,2	19	27,7	26,9	3,75	748	61,7
34,6	18,8	27,6	25,8	3,75	747	58,6
34	18,7	27,5	24,8	3,75	745	54,6
33,4	18,9	27,4	24,1	3,75	744	50,6
32,6	18,7	27,2	23,2	3,75	743	47,2
31,8	18,7	26,7	22,6	3,75	743	43,3
30,8	18,6	26,1	22	3,75	742	39,6
29,8	18,6	25,4	21,6	3,75	742	35,9
28,7	18,6	24,6	21,7	3,75	741	31,8
27,5	18,5	23,9	21,5	3,75	741	28,1
26,4	18,6	23,2	21,5	3,75	742	24,2
25,2	18,6	22,2	21,5	3,75	742	20,4
23,9	18,6	21,7	21,5	3,75	742	16,5
22,4	18,4	20,8	21,5	3,75	742	12,4
21,3	18,6	20,2	21,5	3,75	742	8,6

20,1	18,6	19,5	21,5	3,75	742	4,7
12,1	10,9	11,6	23,5	3,75	685	3,4
13,4	10,9	12,3	24,25	3,75	686	7,4
14,6	10,9	13	24,5	3,75	686	11
15,9	10,9	13,8	24,7	3,75	686	14,8
17,2	10,9	14,5	24,9	3,75	686	18,96
18,5	10,9	15,3	25,1	3,75	686	22,6

19,9	11,1	16,2	25,2	3,75	686	26,5
21	11	16,8	25,3	3,75	686	30,4
22,2	10,9	17,5	25,5	3,75	686	34,3
23,5	10,9	18,3	25,6	3,75	686	38,3
24,9	11,1	19,2	25,6	3,75	686	42,1
26,2	11,1	20	25,7	3,75	686	46
27,3	11	20,6	25,8	3,75	686	50
28,5	11	21,3	25,9	3,75	686	53,8
29,8	11	22,1	26	3,75	686	57,7
30,9	10,9	22,7	26	3,75	687	61,6
32,1	11,1	23,5	26,3	3,75	687	65,1
32,8	11	23,9	26,5	3,75	686	67,7
33	11,1	23,9	28,3	3,75	687	66,4
33,6	11,4	24,4	29,3	3,75	686	67,8
34,1	11,1	24,5	30	3,75	687	69,9
33,2	11	24,3	29,3	3,75	688	69,5
32,5	10,9	24	28,4	3,75	686	68,8
31,7	11	23,8	27,8	3,75	687	67
31,3	11	23,4	27	3,75	686	65
30,5	11	22,8	26,5	3,75	687	61,7
29,6	11,2	22,4	25,9	3,75	687	58,6
28,3	10,8	21,3	25,3	3,75	687	54,6
27,3	11	20,7	25	3,75	687	50,6
26,2	11	20,1	24,7	3,75	687	47,2
24,9	11	19,3	24,6	3,75	688	43,3
23,8	11,1	18,7	24,3	3,75	689	39,6
22,3	10,8	17,7	24,2	3,75	687	35,8
21,3	11,1	17,2	24	3,75	687	31,7
20,1	11,1	16,5	23,9	3,75	687	28
18,8	11,1	15,7	23,7	3,75	687	23,9
17,5	11,1	15	23,6	3,75	688	20
16,1	10,9	14	23,5	3,75	688	16,1
14,9	11,1	13,4	23,5	3,75	687	12
13,8	11,1	12,7	23,5	3,75	687	8,4
12,3	11,1	11,9	23,4	3,75	687	4,2

**ANEXO B. DATOS DE LA SIMULACION.**

**Tabla 1B. Datos de simulados para la validación del transitorio**

Tiempo	Flujo de masa	Tiempo	Calidad del vapor	Tiempo	Calidad del vapor
0,80515	11,6403	0	0,228788	7,11E-15	0,174621
1,45401	11,6433	0,261438	0,228419	0,392157	0,174636
1,97399	11,6402	0,392157	0,228424	0,653595	0,174646
2,62285	11,6432	0,653595	0,228434	0,915033	0,174656
3,1394	11,6613	0,784314	0,228818	1,04575	0,174661
3,14038	11,6553	0,915033	0,228823	1,43791	0,174676
3,52999	11,6553	1,17647	0,228454	2,0915	0,173943
4,04996	11,6522	1,56863	0,228469	2,35294	0,173574
4,31117	11,6432	1,96078	0,228105	2,87582	0,173215
4,57091	11,6432	2,0915	0,227731	3,13725	0,173225
5,35014	11,6432	2,22222	0,227736	3,39869	0,173614
5,74024	11,6401	2,35294	0,227362	3,92157	0,174391
6,12985	11,6401	2,61438	0,227372	4,05229	0,174775
6,51897	11,6431	2,87582	0,227003	4,44444	0,175168
6,77774	11,6491	3,00654	0,227387	4,70588	0,175178
7,03699	11,6521	3,13725	0,227392	4,96732	0,175188
7,42611	11,6551	3,39869	0,22778	5,35948	0,175203
7,68585	11,6551	3,79085	0,228174	5,4902	0,175208
8,20583	11,6521	3,92157	0,228179	5,75163	0,175218
8,46557	11,6521	4,18301	0,228568	6,14379	0,175233
8,59397	11,6611	4,31373	0,228572	6,27451	0,175238
8,72237	11,6702	4,44444	0,228577	6,40523	0,175621
9,11052	11,6792	4,70588	0,228966	6,66667	0,175253
9,50111	11,6732	4,96732	0,228976	6,79739	0,174879
9,76183	11,6671	5,62092	0,229001	7,32026	0,175277
9,89219	11,6641	5,75163	0,229006	7,71242	0,175671
10,4117	11,6641	6,01307	0,229016	7,97386	0,17606
10,6709	11,6671	6,14379	0,228642	8,36601	0,175317
10,9307	11,6671	6,53595	0,228278	8,62745	0,174948
11,1899	11,6701	6,66667	0,228283	8,75817	0,174195
11,8393	11,6701	6,79739	0,228288	8,88889	0,1742
12,2289	11,6701	7,05882	0,228298	9,01961	0,173827
12,6185	11,6701	7,18954	0,227924	9,41176	0,173841
13,0081	11,67	7,45098	0,227934	9,6732	0,174988
13,3987	11,664	7,71242	0,228322	9,93464	0,175376
13,6594	11,658	8,36601	0,228347	10,3268	0,175391
13,9201	11,6519	8,49673	0,228352	10,719	0,175406
14,3107	11,6459	8,75817	0,227983	11,1111	0,175042
14,4411	11,6429	9,28105	0,227624	11,3725	0,174673

14,7013	11,6399	9,54248	0,227634	11,5033	0,174678
14,9625	11,6308	9,80392	0,227644	11,634	0,174683
14,963	11,6278	10,0654	0,227275	11,7647	0,174688
15,0934	11,6248	10,4575	0,22729	12,0261	0,174698
15,2242	11,6188	10,8497	0,227305	12,4183	0,174713
15,2247	11,6157	11,3725	0,227325	12,9412	0,175111
15,4849	11,6127	11,634	0,227335	13,0719	0,175116
15,6153	11,6097	11,7647	0,22734	13,7255	0,17552
15,8751	11,6097	12,0261	0,227728	13,8562	0,175904
16,394	11,6127	12,2876	0,227738	13,9869	0,176287
16,5234	11,6157	12,4183	0,227743	14,2484	0,176297
17,0414	11,6247	12,8105	0,228137	14,3791	0,176681
17,3002	11,6307	13,0719	0,228525	14,5098	0,177065
17,5585	11,6398	13,5948	0,228924	14,6405	0,17707
17,8172	11,6458	14,1176	0,229701	14,7712	0,177453
17,9466	11,6488	14,2484	0,229706	14,902	0,177458
18,4646	11,6578	14,5098	0,230095	15,1634	0,177847
18,5935	11,6638	14,7712	0,230484	15,4248	0,177857
18,8518	11,6729	15,1634	0,230877	15,6863	0,177867
19,631	11,6729	15,5556	0,230892	15,817	0,177872
19,7629	11,6608	15,9477	0,230907	15,9477	0,177498
20,1525	11,6608	16,2092	0,230538	16,0784	0,177124
20,2823	11,6608	16,4706	0,230169	16,2092	0,17675
20,6729	11,6547	16,8627	0,229805	16,4706	0,17676
20,9327	11,6547	17,2549	0,22982	16,8627	0,176775
21,0625	11,6547	17,5163	0,22983	17,2549	0,176411
21,1924	11,6547	18,0392	0,229471	17,3856	0,176037
21,4522	11,6547	18,4314	0,229107	17,7778	0,176052
21,7119	11,6547	18,5621	0,228733	18,1699	0,175688
21,8413	11,6577	18,9542	0,228748	18,5621	0,175703
22,101	11,6577	19,4771	0,228768	18,9542	0,176097
22,7494	11,6637	19,8693	0,228783	19,2157	0,176107
23,0086	11,6667	20,2614	0,229555	19,6078	0,176122
23,1385	11,6667	20,6536	0,229949	19,7386	0,176126
23,2684	11,6667	21,0458	0,230343	19,8693	0,176131
23,7884	11,6637	21,3072	0,23111	20,2614	0,176525
24,0476	11,6667	21,5686	0,231499	20,3922	0,17653
24,3093	11,6546	21,6993	0,231504	20,915	0,17655
24,4397	11,6516	21,8301	0,231509	21,4379	0,17657
24,6994	11,6516	22,3529	0,231529	21,8301	0,176584
24,9596	11,6486	22,4837	0,231155	22,0915	0,176594
25,3493	11,6486	22,8758	0,23117	22,2222	0,176599
25,7389	11,6486	23,0065	0,231174	22,4837	0,17623

26,2593	11,6425	23,1373	0,230801	22,7451	0,175483
26,6489	11,6425	23,268	0,230427	23,1373	0,175498
26,7788	11,6425	23,3987	0,230053	23,268	0,175503
27,0376	11,6485	23,6601	0,229684	23,5294	0,175512
27,167	11,6515	23,7908	0,229689	23,6601	0,175517
27,5571	11,6485	24,183	0,229325	24,0523	0,17629
27,6869	11,6485	24,3137	0,22933	24,3137	0,176679
28,2064	11,6485	24,7059	0,229345	24,4444	0,176684
28,4662	11,6485	24,8366	0,22935	24,7059	0,176693
28,7259	11,6485	25,2288	0,229365	24,8366	0,176698
28,8553	11,6515	25,6209	0,22938	25,3595	0,176339
29,114	11,6575	25,8824	0,229389	25,6209	0,176349
29,2439	11,6575	26,2745	0,229404	25,8824	0,176359
29,5027	11,6635	26,5359	0,229414	26,0131	0,176364
29,7619	11,6665	26,9281	0,229429	26,2745	0,176374
30,1506	11,6725	27,0588	0,229434	26,4052	0,176
30,4088	11,6816	27,451	0,229828	27,0588	0,176404
30,5382	11,6846	27,7124	0,229838	27,451	0,176419
30,6671	11,6906	27,9739	0,229847	27,5817	0,176424
31,3272	11,6243	28,1046	0,229852	27,9739	0,176438
32,1236	11,5188	28,2353	0,211297	28,2353	0,165842
32,6592	11,4194	28,8889	0,195791	28,366	0,158271
33,3237	11,3259	29,1503	0,195801	28,7582	0,144271
34,1142	11,2566	29,8039	0,195447	28,8889	0,142003
35,0326	11,1993	30,3268	0,195467	29,281	0,140882
35,6883	11,1601	30,3268	0,195467	29,5425	0,140892
36,2146	11,1179	30,5882	0,194719	29,6732	0,140518
36,739	11,0878	30,719	0,194724	29,8039	0,140523
37,0007	11,0757	30,9804	0,194355	30,0654	0,140533
37,6535	11,0546	31,2418	0,194365	30,1961	0,140159
38,1778	11,0245	31,3725	0,194749	30,4575	0,13979
38,8301	11,0064	31,7647	0,1959	30,5882	0,140553
39,3526	10,9883	31,8954	0,199693	30,719	0,140936
40,1367	10,9581	31,8954	0,199693	30,8497	0,142456
40,9213	10,9249	31,8954	0,199693	30,9804	0,143219
41,5721	10,9159	32,2876	0,200465	31,1111	0,143603
42,4851	10,8918	32,4183	0,201986	31,3725	0,144749
43,1384	10,8676	32,549	0,202748	31,5033	0,145511
43,9215	10,8435	32,9412	0,20352	31,634	0,146274
44,5743	10,8224	33,3333	0,205429	31,8954	0,147041
45,4858	10,8073	33,5948	0,206197	32,1569	0,148188
45,8789	10,7862	33,8562	0,206964	32,2876	0,148571
46,66	10,7741	34,1176	0,207353	32,6797	0,149723

47,3128	10,753	34,5098	0,208125	32,8105	0,150106
47,8357	10,7319	34,6405	0,208509	32,9412	0,15049
48,6154	10,7289	35,0327	0,20966	33,2026	0,151258
49,5255	10,7228	35,4248	0,210054	33,4641	0,152025
50,3047	10,7228	35,6863	0,210821	33,7255	0,152414
50,566	10,7137	36,0784	0,211215	34,1176	0,153186
50,6973	10,7047	36,6013	0,211614	34,3791	0,153196
51,2182	10,6956	36,9935	0,212007	34,902	0,153974
51,7397	10,6836	37,3856	0,212401	35,1634	0,154362
52,2597	10,6805	37,7778	0,212795	35,5556	0,154756
53,0399	10,6745	38,1699	0,213188	35,817	0,155145
53,8201	10,6684	38,5621	0,213961	35,9477	0,155528
54,3395	10,6684	39,085	0,214359	36,2092	0,155917
54,8605	10,6594	39,6078	0,215137	36,4706	0,156306
55,2516	10,6503	39,8693	0,215147	36,8627	0,156699
55,6427	10,6413	40,1307	0,215156	37,1242	0,157088
56,1636	10,6322	40,7843	0,215939	37,2549	0,157472
57,0727	10,6322	41,1765	0,216332	37,5163	0,157482
57,8534	10,6231	41,4379	0,216342	37,9085	0,157497
58,8938	10,614	41,8301	0,216736	38,1699	0,157885
59,9338	10,608	42,3529	0,217513	38,8235	0,158289
60,9742	10,5989	42,7451	0,217907	39,085	0,158677
61,7544	10,5929	43,0065	0,218296	39,4771	0,158692
62,6645	10,5868	43,3987	0,218689	39,7386	0,159081
63,3129	10,5928	43,6601	0,219078	40	0,15947
64,2234	10,5838	44,183	0,219477	40,2614	0,15948
64,615	10,5717	44,4444	0,219865	40,5229	0,159868
65,6554	10,5626	44,7059	0,220254	41,0458	0,160267
66,564	10,5656	45,098	0,220648	41,3072	0,160277
67,7338	10,5595	45,3595	0,220658	41,4379	0,160661
68,1244	10,5535	45,7516	0,220672	42,0915	0,161443
69,2933	10,5535	46,0131	0,221061	42,2222	0,161827
69,8128	10,5535	46,2745	0,221829	42,4837	0,161837
70,2038	10,5444	46,6667	0,222222	43,0065	0,162235
70,5939	10,5414	47,1895	0,222242	43,268	0,161866
71,3736	10,5383	47,451	0,222252	43,7908	0,162644
71,7637	10,5353	47,5817	0,222257	44,0523	0,162653
72,543	10,5353	47,8431	0,222267	44,183	0,162658
73,1928	10,5323	47,9739	0,222272	44,4444	0,163047
73,5819	10,5353	48,1046	0,222655	44,8366	0,163441
74,3617	10,5322	48,2353	0,22266	45,098	0,163829
75,011	10,5322	48,6275	0,222675	45,4902	0,163844
75,7907	10,5292	49,1503	0,222695	46,4052	0,164258

76,4396	10,5322	49,4118	0,222705	46,5359	0,164263
77,0889	10,5321	50,0654	0,22273	47,0588	0,164661
77,6079	10,5351	50,5882	0,223128	47,7124	0,165065
77,8691	10,5261	50,719	0,224648	48,2353	0,165463
78,2607	10,514	51,3725	0,22581	48,366	0,165468
79,0385	10,523	51,8954	0,226208	48,4967	0,165473
79,557	10,5291	52,2876	0,226223	48,8889	0,165488
80,3357	10,532	52,4183	0,226228	49,1503	0,165498
81,1154	10,529	52,6797	0,226238	49,5425	0,165892
81,7672	10,5139	53,2026	0,226258	49,9346	0,165907
82,545	10,5229	53,4641	0,226268	50,0654	0,16629
82,9341	10,5259	53,9869	0,225909	50,3268	0,166679
83,7148	10,5169	54,1176	0,225914	50,4575	0,166684
84,2348	10,5138	54,2484	0,22554	50,9804	0,166704
85,0155	10,5048	54,902	0,225564	51,3725	0,166719
85,2772	10,4927	55,0327	0,225569	51,634	0,167486
85,926	10,4957	55,5556	0,225589	51,8954	0,167875
86,7043	10,5017	56,0784	0,225609	52,1569	0,168642
87,4815	10,5137	56,3399	0,225619	52,4183	0,169031
87,8726	10,5047	56,6013	0,225629	52,549	0,169036
88,1328	10,5017	56,732	0,225634	53,0719	0,168677
88,3936	10,4956	57,3856	0,226037	53,2026	0,168682
88,7832	10,4956	57,5163	0,226042	53,4641	0,168313
89,0444	10,4866	57,9085	0,226436	53,5948	0,168318
89,5639	10,4866	58,5621	0,226839	53,8562	0,167949
90,3431	10,4865	58,6928	0,226844	53,9869	0,167575
90,9924	10,4865	59,085	0,226859	54,2484	0,167206
91,7727	10,4805	59,4771	0,227253	54,7712	0,166847
92,2907	10,4895	59,6078	0,227258	54,902	0,166474
92,9376	10,5045	60,2614	0,227661	55,1634	0,166105
93,4556	10,5136	60,3922	0,227666	55,4248	0,166493
94,2363	10,5045	61,0458	0,227691	55,6863	0,166882
94,8856	10,5045	61,3072	0,227701	55,817	0,167266
95,4056	10,5015	61,4379	0,227706	56,0784	0,167654
95,9251	10,5014	61,8301	0,227721	56,2092	0,168038
96,574	10,5044	61,9608	0,228105	56,4706	0,168806
97,2233	10,5044	62,3529	0,228119	57,3856	0,16884
97,7438	10,4984	62,6144	0,228129	57,7778	0,168855
98,1334	10,4984	63,1373	0,228528	58,0392	0,169244

**Tabla 2B. Perfil de flujo de calor utilizado**

Tiempo	Flujo de calor
0,0290029	99,0688
1,48893	99,4263
1,5124	11,9524
1,99621	11,822
2,03975	60,6121
3,03248	60,7281
3,04324	72,3181
3,50218	72,9325
3,54416	74,2458
4,51182	74,1719
4,54675	41,6527
5,51437	41,3919
5,53608	65,5066
6,0034	66,3088
6,03716	68,1819
7,04661	68,4868
7,0615	99,8904
8,01255	100,188

**Tabla 3B. Datos Temperatura, presión y calidad del vapor del modelo computacional**

Tiempo	Temperatura del chip	Tiempo	Presión	Tiempo	calidad del vapor
0,024518	28,5793	0,0135993	0,202178	0,0128772	0,00362319
0,0474298	31,6929	0,0123141	0,194935	0,0258013	0,00362319
0,0489887	30,2037	0,0252358	0,202143	0,0387254	0,00362319
0,059051	33,0917	0,0252591	0,194923	0,0516495	0,00362319
0,0823407	35,8443	0,0381808	0,202132	0,0645735	0,00362319
0,0838052	34,4454	0,0381808	0,202132	0,0774976	0,00362319
0,0926392	38,5067	0,0511258	0,20212	0,0904217	0,00362319
0,0940564	37,1529	0,0511492	0,1949	0,103346	0,00362319
0,103032	41,0788	0,0640708	0,202108	0,11627	0,00362319
0,104355	39,8153	0,0640708	0,202108	0,12917	0,00543478
0,115079	42,0716	0,0770159	0,202097	0,142095	0,00543478
0,126653	43,5155	0,0899609	0,202085	0,155042	0,00362319
0,13799	45,1852	0,102906	0,202073	0,192597	0,0978261
0,138604	44,5985	0,128796	0,20205	0,203952	0,219203
0,163642	45,6814	0,14132	0,332002	0,215448	0,32971
0,189341	46,1325	0,152349	0,92405	0,227248	0,416667
0,201482	47,035	0,153074	0,700223	0,22774	0,378623
0,201813	46,7191	0,165014	1,01068	0,239845	0,442029
0,202143	46,4032	0,177795	1,06121	0,252534	0,460145
0,214001	47,5764	0,190507	1,1334	0,265295	0,472826
0,214142	47,441	0,1906	1,10452	0,277868	0,5
0,214331	47,2605	0,203335	1,16949	0,278031	0,487319
0,226945	47,7117	0,203382	1,15505	0,290487	0,523551
0,239416	48,2983	0,21621	1,19114	0,303294	0,532609
0,239464	48,2532	0,229108	1,20557	0,303341	0,528986
0,239511	48,2081	0,229108	1,20557	0,303528	0,514493
0,239558	48,1629	0,241983	1,22722	0,316148	0,538043
0,2397	48,0275	0,242006	1,22	0,328885	0,552536
0,239794	47,9373	0,26778	1,25608	0,328908	0,550725
0,239936	47,8019	0,267803	1,24886	0,328955	0,547101
0,252313	48,4787	0,26785	1,23442	0,328978	0,54529
0,252408	48,3885	0,280701	1,26328	0,329025	0,541667

0,265304	48,5689	0,293623	1,27049	0,341715	0,559783
0,265304	48,5689	0,319513	1,27047	0,341739	0,557971
0,278248	48,7042	0,332435	1,27768	0,341785	0,554348
0,291098	48,9298	0,34538	1,27767	0,354522	0,568841
0,291192	48,8395	0,371246	1,28486	0,354546	0,567029
0,291239	48,7944	0,384191	1,28485	0,354569	0,565217
0,304278	48,8395	0,410081	1,28483	0,354616	0,561594
0,317222	48,9748	0,423026	1,28482	0,367399	0,572464
0,330213	49,0649	0,435948	1,29203	0,367423	0,570652
0,343252	49,11	0,435972	1,28481	0,380253	0,577899
0,35629	49,1551	0,461838	1,292	0,380277	0,576087
0,369376	49,155	0,461862	1,28478	0,393177	0,577899
0,382414	49,2	0,474783	1,29199	0,431879	0,583333
0,395453	49,2451	0,474783	1,29199	0,44478	0,585145
0,42153	49,3352	0,487728	1,29198	0,457681	0,586957
0,434615	49,3351	0,500673	1,29197	0,470605	0,586957
0,434615	49,3351	0,500673	1,29197	0,483529	0,586957
0,460787	49,335	0,513618	1,29196	0,496453	0,586957
0,499949	49,425	0,526563	1,29194	0,509377	0,586957
0,513082	49,3798	0,539508	1,29193	0,522301	0,586957
0,552292	49,4247	0,552453	1,29192	0,535225	0,586957
0,578463	49,4246	0,565398	1,29191	0,548149	0,586957
0,591596	49,3794	0,578343	1,2919	0,561073	0,586957
0,604682	49,3793	0,591288	1,29189	0,573997	0,586957
0,617721	49,4244	0,591288	1,29189	0,586921	0,586957
0,643939	49,3791	0,604233	1,29187	0,599822	0,588768
0,656978	49,4241	0,617178	1,29186	0,61277	0,586957
0,683149	49,424	0,643068	1,29184	0,625694	0,586957
0,70932	49,4238	0,65599	1,29905	0,638618	0,586957
0,722406	49,4238	0,656014	1,29183	0,651518	0,588768
0,722453	49,3786	0,668935	1,29904	0,651542	0,586957
0,748625	49,3785	0,668935	1,29904	0,664442	0,588768
0,774749	49,4235	0,68188	1,29902	0,677366	0,588768
0,80092	49,4233	0,68188	1,29902	0,690291	0,588768
0,814006	49,4233	0,681904	1,2918	0,703215	0,588768
0,840177	49,4231	0,694825	1,29901	0,716139	0,588768
0,853263	49,423	0,70777	1,299	0,729063	0,588768
0,866349	49,423	0,720715	1,29899	0,741987	0,588768
0,89252	49,4228	0,73366	1,29898	0,754911	0,588768
0,918692	49,4227	0,746605	1,29897	0,767835	0,588768
0,931825	49,3775	0,75955	1,29895	0,780759	0,588768
0,944863	49,4225	0,772495	1,29894	0,793683	0,588768
0,970987	49,4675	0,772519	1,29172	0,806607	0,588768

0,971034	49,4224	0,78544	1,29893	0,819531	0,588768
0,98412	49,4223	0,798385	1,29892	0,832455	0,588768
1,01024	49,4673	0,798385	1,29892	0,845356	0,59058
1,03642	49,4672	0,81133	1,29891	0,85828	0,59058
1,0495	49,4671	0,824275	1,2989	0,871204	0,59058
1,06263	49,4219	0,83722	1,29888	0,884128	0,59058
1,07572	49,4218	0,850165	1,29887	0,897052	0,59058
1,08881	49,4217	0,850189	1,29165	0,909976	0,59058
1,11493	49,4667	0,86311	1,29886	0,9229	0,59058
1,1411	49,4666	0,876056	1,29885	0,935824	0,59058
1,15419	49,4665	0,889001	1,29884	0,948749	0,59058
1,18036	49,4663	0,889001	1,29884	0,961673	0,59058
1,19349	49,4211	0,901946	1,29882	0,974597	0,59058
1,21962	49,4661	0,901969	1,2916	0,987521	0,59058
1,2327	49,4661	0,914891	1,29881	1,00044	0,59058
1,25883	49,511	0,927836	1,2988	1,01337	0,59058
1,27196	49,4658	0,940781	1,29879	1,02632	0,588768
1,29813	49,4657	0,953726	1,29878	1,03924	0,588768
1,31126	49,4205	0,966671	1,29877	1,05216	0,588768
1,3243	49,4655	0,966671	1,29877	1,06509	0,588768
1,33743	49,4203	0,979616	1,29875	1,07801	0,588768
1,35047	49,4654	0,992561	1,29874	1,09094	0,588768
1,36356	49,4653	0,992561	1,29874	1,10386	0,588768
1,38973	49,4652	1,00551	1,29873	1,11678	0,588768
1,40282	49,4651	1,01845	1,29872	1,12971	0,588768
1,4159	49,465	1,0314	1,29871	1,14261	0,59058
1,42894	49,5101	1,0314	1,29871	1,15553	0,59058
1,44207	49,4649	1,04434	1,2987	1,16846	0,59058
1,45516	49,4648	1,04434	1,2987	1,18138	0,59058
1,46829	49,4196	1,04434	1,2987	1,19431	0,59058
1,48138	49,4195	1,05729	1,29868	1,20723	0,59058
1,50755	49,4194	1,07023	1,29867	1,22011	0,594203
1,52649	43,8236	1,08318	1,29866	1,23305	0,592391
1,52786	42,515	1,08318	1,29866	1,23308	0,59058
1,55531	41,2964	1,08318	1,29866	1,246	0,59058
1,55725	39,4462	1,08318	1,29866	1,25893	0,59058
1,56953	40,2133	1,10907	1,29864	1,27185	0,59058
1,57113	38,679	1,10907	1,29864	1,28473	0,594203
1,57175	38,0923	1,12199	1,30585	1,28477	0,59058
1,5855	37,4605	1,12201	1,29863	1,2977	0,59058
1,59905	37,0091	1,12203	1,29141	1,31062	0,59058
1,61261	36,5578	1,12203	1,29141	1,32355	0,59058
1,62617	36,1065	1,13498	1,29139	1,33647	0,59058

1,63954	35,8356	1,1479	1,2986	1,34939	0,59058
1,63996	35,4295	1,1479	1,2986	1,3623	0,592391
1,6796	35,0683	1,14792	1,29138	1,37522	0,592391
1,67988	34,7975	1,16082	1,30581	1,38814	0,592391
1,69306	34,7072	1,16087	1,29137	1,40107	0,592391
1,69316	34,6169	1,17377	1,3058	1,41399	0,592391
1,6932	34,5718	1,18674	1,29857	1,42692	0,592391
1,70638	34,4815	1,18676	1,29135	1,43984	0,592391
1,70653	34,3461	1,19968	1,29856	1,45276	0,592391
1,71971	34,2558	1,19968	1,29856	1,46571	0,59058
1,7199	34,0753	1,21263	1,29854	1,49156	0,59058
1,71994	34,0301	1,22557	1,29853	1,53096	0,541667
1,73312	33,9398	1,23852	1,29852	1,53171	0,483696
1,73317	33,8947	1,25148	1,29129	1,53244	0,427536
1,7463	33,8495	1,26441	1,2985	1,54604	0,375
1,7464	33,7592	1,26441	1,2985	1,56004	0,291667
1,75958	33,6689	1,27735	1,29849	1,57243	0,333333
1,75962	33,6238	1,2903	1,29847	1,58664	0,233696
1,75967	33,5786	1,30324	1,29846	1,58699	0,206522
1,77281	33,5334	1,30326	1,29124	1,60022	0,182971
1,78594	33,4882	1,31619	1,29845	1,60036	0,172101
1,79907	33,443	1,32913	1,29844	1,6005	0,161232
1,79912	33,3979	1,32915	1,29122	1,61354	0,152174
1,81225	33,3527	1,34208	1,29843	1,62656	0,144928
1,82534	33,3526	1,35502	1,29842	1,62668	0,13587
1,82538	33,3075	1,35502	1,29842	1,62677	0,128623
1,83852	33,2623	1,35504	1,2912	1,62684	0,123188
1,85165	33,2171	1,36797	1,2984	1,62691	0,117754
1,87782	33,217	1,38091	1,29839	1,62698	0,112319
1,89095	33,1718	1,39386	1,29838	1,62703	0,108696
1,90409	33,1266	1,39386	1,29838	1,64009	0,0978261
1,91717	33,1265	1,4068	1,29837	1,64014	0,0942029
1,93031	33,0813	1,41975	1,29836	1,64016	0,0923913
1,94344	33,0361	1,41977	1,29114	1,65313	0,0887681
1,95652	33,036	1,43269	1,29835	1,66615	0,0815217
1,96961	33,036	1,44564	1,29833	1,66617	0,0797101
1,98274	32,9908	1,44566	1,29111	1,67912	0,0778986
1,99583	32,9907	1,4586	1,2911	1,67917	0,0742754
2,00896	32,9455	1,47153	1,29831	1,69212	0,0724638
2,01742	37,3678	1,47155	1,29109	1,70506	0,0706522
2,01902	35,8335	1,48449	1,29108	1,70509	0,0688406
2,02975	38,0898	1,49744	1,29107	1,71804	0,067029
2,03121	36,6908	1,51038	1,29106	1,71806	0,0652174

2,04047	40,346	1,51062	1,21885	1,73101	0,0634058
2,0417	39,1727	1,51125	1,02391	1,73103	0,0615942
2,05323	40,6618	1,51158	0,922823	1,74398	0,0597826
2,05375	40,1655	1,52389	1,11776	1,744	0,057971
2,05403	39,8947	1,53772	0,843378	1,74402	0,0561594
2,05436	39,5788	1,5509	0,771163	1,75695	0,0561594
2,05507	38,9019	1,55114	0,698961	1,76992	0,0525362
2,06617	40,7972	1,55132	0,641199	1,78289	0,048913
2,07907	40,9776	1,5645	0,568985	1,78294	0,0452899
2,10496	41,2482	1,57766	0,503991	1,79588	0,0434783
2,105	41,2031	1,60369	0,460646	1,79591	0,0416667
2,10505	41,1579	1,60378	0,431766	1,80885	0,0398551
2,1051	41,1128	1,6038	0,424545	1,8218	0,0380435
2,11795	41,3384	1,61677	0,417313	1,82183	0,0362319
2,11799	41,2933	1,61682	0,402873	1,83477	0,0344203
2,13094	41,4286	1,61684	0,395653	1,84772	0,0326087
2,14388	41,5639	1,61687	0,388432	1,84777	0,0289855
2,14398	41,4736	1,62983	0,381201	1,86069	0,0289855
2,14398	41,4736	1,62986	0,37398	1,86072	0,0271739
2,15692	41,6089	1,62988	0,36676	1,87366	0,0253623
2,16996	41,654	1,64285	0,359528	1,88663	0,0217391
2,18295	41,7442	1,64287	0,352308	1,89956	0,0217391
2,183	41,699	1,65582	0,352296	1,9125	0,0199275
2,19594	41,8343	1,65584	0,345076	1,91253	0,0181159
2,20893	41,9245	1,65586	0,337856	1,92548	0,0163043
2,20893	41,9245	1,66883	0,330624	1,9255	0,0144928
2,22192	42,0147	1,66886	0,323404	1,93845	0,0126812
2,23501	42,0146	1,68182	0,316172	1,95137	0,0126812
2,24809	42,0146	1,69482	0,301719	1,95139	0,0108696
2,26109	42,1047	1,69482	0,301719	1,96432	0,0108696
2,27412	42,1498	1,69484	0,294499	1,96434	0,00905797
2,27417	42,1047	1,70781	0,287267	1,97727	0,00905797
2,28721	42,1497	1,7208	0,272815	1,99021	0,00724638
2,3003	42,1496	1,72082	0,265595	2,00314	0,00724638
2,31338	42,1496	1,73377	0,265583	2,01606	0,00724638
2,33951	42,1945	1,73379	0,258363	2,02896	0,00905797
2,35259	42,1945	1,74674	0,258351	2,04128	0,0561594
2,36568	42,1944	1,75971	0,251119	2,04146	0,0416667
2,37876	42,1943	1,75973	0,243899	2,04179	0,0163043
2,39185	42,1943	1,77267	0,243887	2,04184	0,0126812
2,40489	42,2393	1,78564	0,236656	2,04186	0,0108696
2,41802	42,1941	1,79861	0,229424	2,05453	0,0307971
2,43101	42,2843	1,81158	0,222192	2,05458	0,0271739

2,44414	42,2391	1,82452	0,22218	2,05462	0,0235507
2,45728	42,1939	1,82455	0,21496	2,05467	0,0199275
2,47036	42,1938	1,83749	0,214948	2,07883	0,150362
2,49644	42,2839	1,85044	0,214936	2,07937	0,108696
2,50953	42,2839	1,86341	0,207705	2,09138	0,179348
2,52271	42,1935	1,87635	0,207693	2,10363	0,231884
2,5357	42,2837	1,8893	0,207681	2,10398	0,20471
2,53574	42,2386	1,90226	0,200449	2,11622	0,257246
2,54883	42,2385	1,91521	0,200438	2,11641	0,242754
2,57495	42,2835	1,9411	0,200414	2,11664	0,224638
2,58799	42,3285	1,96697	0,207611	2,12898	0,269928
2,58804	42,2834	2,00575	0,222016	2,14179	0,278986
2,58809	42,2383	2,03146	0,279755	2,15448	0,297101
2,61416	42,3284	2,03155	0,250874	2,1545	0,29529
2,62725	42,3283	2,04412	0,366386	2,15455	0,291667
2,64038	42,2831	2,05648	0,54688	2,15464	0,28442
2,65347	42,2831	2,05665	0,496339	2,16733	0,302536
2,66655	42,283	2,05681	0,445797	2,16738	0,298913
2,67964	42,2829	2,08188	0,698482	2,18021	0,306159
2,67964	42,2829	2,08207	0,64072	2,18023	0,304348
2,67969	42,2378	2,09469	0,741792	2,19309	0,309783
2,69277	42,2377	2,09473	0,727351	2,19311	0,307971
2,70586	42,2376	2,09478	0,712911	2,20594	0,315217
2,70591	42,1925	2,10761	0,749	2,20597	0,313406
2,7189	42,2827	2,12048	0,770649	2,21887	0,315217
2,71899	42,1924	2,12051	0,763429	2,23174	0,318841
2,73203	42,2375	2,13338	0,785078	2,23177	0,317029
2,74511	42,2374	2,1334	0,777858	2,24464	0,320652
2,75815	42,2825	2,14628	0,799507	2,25752	0,324275
2,77124	42,2824	2,15918	0,813936	2,27042	0,326087
2,78437	42,2372	2,1721	0,821144	2,28335	0,326087
2,81054	42,237	2,18502	0,828353	2,29625	0,327899
2,83671	42,2369	2,19794	0,835561	2,30917	0,327899
2,8498	42,2368	2,21086	0,84277	2,335	0,32971
2,86289	42,2368	2,22379	0,849979	2,34792	0,32971
2,87592	42,2818	2,23673	0,849967	2,34794	0,327899
2,9021	42,2817	2,24965	0,857175	2,36082	0,331522
2,91518	42,2816	2,2626	0,857164	2,36084	0,32971
2,92827	42,2815	2,27552	0,864372	2,37374	0,331522
2,94135	42,2814	2,28846	0,864361	2,38667	0,331522
2,96752	42,2813	2,30141	0,864349	2,39957	0,333333
2,96752	42,2813	2,31433	0,871557	2,41249	0,333333
2,97943	43,4094	2,32728	0,871546	2,42542	0,333333

2,99242	43,4996	2,34022	0,871534	2,43834	0,333333
2,99261	43,3191	2,36606	0,885951	2,45127	0,333333
2,99266	43,2739	2,36611	0,871511	2,46419	0,333333
2,9927	43,2288	2,37903	0,878719	2,47711	0,333333
2,99275	43,1837	2,39195	0,885928	2,50294	0,335145
2,99285	43,0934	2,39198	0,878708	2,50296	0,333333
2,99289	43,0483	2,40492	0,878696	2,51586	0,335145
3,0184	43,6799	2,41784	0,885904	2,51589	0,333333
3,0185	43,5897	2,43079	0,885893	2,52883	0,331522
3,03144	43,725	2,45668	0,885869	2,54178	0,32971
3,04443	43,8152	2,46963	0,885858	2,55468	0,331522
3,05747	43,8602	2,48257	0,885846	2,5547	0,32971
3,07046	43,9504	2,49554	0,878614	2,56763	0,32971
3,07051	43,9053	2,50848	0,878602	2,59345	0,331522
3,0835	43,9955	2,52141	0,885811	2,59348	0,32971
3,09654	44,0405	2,52143	0,878591	2,60638	0,331522
3,10953	44,1307	2,53435	0,885799	2,63223	0,331522
3,10958	44,0856	2,5473	0,885788	2,64515	0,331522
3,13565	44,1757	2,54732	0,878567	2,65807	0,331522
3,14869	44,2207	2,56024	0,885776	2,671	0,331522
3,16178	44,2207	2,57319	0,885764	2,68392	0,331522
3,17482	44,2657	2,5991	0,878521	2,69685	0,331522
3,1879	44,2656	2,61207	0,871289	2,70977	0,331522
3,20094	44,3107	2,63793	0,878486	2,72269	0,331522
3,22711	44,3105	2,63796	0,871265	2,73562	0,331522
3,24015	44,3556	2,65088	0,878474	2,74854	0,331522
3,26632	44,3554	2,66382	0,878462	2,76147	0,331522
3,26637	44,3103	2,67677	0,878451	2,78731	0,331522
3,27941	44,3554	2,68971	0,878439	2,80024	0,331522
3,29254	44,3102	2,70266	0,878427	2,81316	0,331522
3,30558	44,3552	2,7156	0,878416	2,82609	0,331522
3,33175	44,3551	2,72855	0,878404	2,85194	0,331522
3,34488	44,3099	2,74149	0,878392	2,86484	0,333333
3,35792	44,3549	2,75444	0,87838	2,86486	0,331522
3,3711	44,2646	2,76738	0,878369	2,87778	0,331522
3,38409	44,3548	2,79327	0,878345	2,89068	0,333333
3,38419	44,2645	2,80622	0,878334	2,90361	0,333333
3,39718	44,3547	2,81916	0,878322	2,92946	0,333333
3,39723	44,3096	2,83211	0,87831	2,94238	0,333333
3,41027	44,3546	2,84505	0,878299	2,95528	0,335145
3,4234	44,3094	2,858	0,878287	2,9682	0,335145
3,43639	44,3996	2,87094	0,878275	2,98085	0,356884
3,44948	44,3996	2,88389	0,878264	2,99344	0,382246

3,46256	44,3995	2,89683	0,878252	2,99351	0,376812
3,47565	44,3994	2,90978	0,87824	2,99356	0,373188
3,48868	44,4445	2,92272	0,878229	2,99366	0,365942
3,50177	44,4444	2,93567	0,878217	2,99384	0,351449
3,50177	44,4444	2,94861	0,878205	2,99394	0,344203
3,51481	44,4894	2,96156	0,878194	2,99401	0,338768
3,52789	44,4894	2,97446	0,892622	3,00634	0,384058
3,54093	44,5344	2,97448	0,885402	3,01918	0,391304
3,55402	44,5344	2,98736	0,907051	3,01922	0,387681
3,56706	44,5794	2,98738	0,899831	3,03201	0,398551
3,5801	44,6245	3,00021	0,93592	3,03203	0,396739
3,59313	44,6695	3,00025	0,92148	3,03205	0,394928
3,60617	44,7146	3,01306	0,96479	3,05783	0,400362
3,6323	44,7595	3,01308	0,957569	3,07073	0,402174
3,64534	44,8046	3,01311	0,950349	3,09656	0,403986
3,65833	44,8948	3,02598	0,971998	3,12238	0,405797
3,65837	44,8497	3,0389	0,979207	3,13528	0,407609
3,67146	44,8496	3,0518	0,993636	3,16113	0,407609
3,6845	44,8946	3,06472	1,00084	3,17403	0,40942
3,69758	44,8946	3,07764	1,00805	3,18695	0,40942
3,71067	44,8945	3,10351	1,01525	3,19988	0,40942
3,72376	44,8944	3,10353	1,00803	3,2128	0,40942
3,73684	44,8943	3,12938	1,02245	3,2386	0,413043
3,73689	44,8492	3,14235	1,01521	3,23863	0,411232
3,74993	44,8943	3,15529	1,0152	3,23865	0,40942
3,77605	44,9393	3,16819	1,02963	3,25153	0,413043
3,80222	44,9391	3,18113	1,02962	3,26445	0,413043
3,80232	44,8489	3,19408	1,02961	3,27738	0,413043
3,81531	44,939	3,21999	1,02236	3,2903	0,413043
3,81536	44,8939	3,23294	1,02235	3,30322	0,413043
3,82844	44,8938	3,24588	1,02234	3,32907	0,413043
3,84153	44,8938	3,24588	1,02234	3,35492	0,413043
3,85461	44,8937	3,27177	1,02232	3,38077	0,413043
3,8677	44,8936	3,28472	1,02231	3,40662	0,413043
3,8677	44,8936	3,28474	1,01509	3,41956	0,411232
3,88078	44,8935	3,29769	1,01507	3,43249	0,411232
3,89387	44,8935	3,32355	1,02227	3,45836	0,40942
3,92004	44,8933	3,3365	1,02226	3,45838	0,407609
3,92004	44,8933	3,36236	1,02946	3,47133	0,405797
3,93313	44,8933	3,37533	1,02222	3,47135	0,403986
3,94621	44,8932	3,38828	1,02221	3,47138	0,402174
3,9593	44,8931	3,40122	1,0222	3,4714	0,400362
3,97238	44,893	3,42709	1,0294	3,47142	0,398551

3,97238	44,893	3,42711	1,02218	3,47145	0,396739
3,98547	44,893	3,46595	1,02214	3,48437	0,396739
3,99855	44,8929	3,47887	1,02935	3,4844	0,394928
4,01164	44,8928	3,49172	1,05822	3,48442	0,393116
4,02473	44,8927	3,49177	1,04378	3,49737	0,391304
4,03786	44,8475	3,50462	1,07265	3,51024	0,394928
4,05094	44,8475	3,51754	1,07986	3,52305	0,403986
4,07712	44,8473	3,54338	1,09427	3,5231	0,400362
4,07716	44,8022	3,54341	1,08705	3,52314	0,396739
4,0903	44,757	3,55633	1,09426	3,5359	0,40942
4,10338	44,7569	3,56927	1,09425	3,53593	0,407609
4,11647	44,7568	3,5822	1,10146	3,53595	0,405797
4,12955	44,7568	3,59514	1,10145	3,5488	0,411232
4,15572	44,7566	3,60809	1,10144	3,56168	0,414855
4,16876	44,8017	3,62103	1,10143	3,57458	0,416667
4,1818	44,8467	3,63398	1,10141	3,57461	0,414855
4,18185	44,8016	3,65987	1,10139	3,60043	0,416667
4,19489	44,8467	3,67281	1,10138	3,62628	0,416667
4,20797	44,8466	3,68576	1,10137	3,6392	0,416667
4,22106	44,8465	3,71165	1,10134	3,65213	0,416667
4,23419	44,8013	3,72459	1,10133	3,66503	0,418478
4,24723	44,8464	3,73754	1,10132	3,67795	0,418478
4,26032	44,8463	3,73754	1,10132	3,69088	0,418478
4,26032	44,8463	3,75048	1,10131	3,7038	0,418478
4,28653	44,801	3,76343	1,1013	3,71672	0,418478
4,29962	44,801	3,78932	1,10127	3,72962	0,42029
4,29962	44,801	3,78932	1,10127	3,74255	0,42029
4,31271	44,8009	3,80226	1,10126	3,74257	0,418478
4,33883	44,8459	3,82815	1,10124	3,7555	0,418478
4,33888	44,8007	3,8411	1,10123	3,76842	0,418478
4,35192	44,8458	3,85404	1,10121	3,78134	0,418478
4,36505	44,8006	3,85404	1,10121	3,79427	0,418478
4,37809	44,8456	3,86699	1,1012	3,80719	0,418478
4,39117	44,8456	3,87993	1,10119	3,82012	0,418478
4,40431	44,8004	3,89288	1,10118	3,83302	0,42029
4,40431	44,8004	3,90582	1,10117	3,83304	0,418478
4,41739	44,8003	3,91877	1,10116	3,84596	0,418478
4,41744	44,7552	3,93171	1,10114	3,85889	0,418478
4,43048	44,8002	3,94466	1,10113	3,87181	0,418478
4,4567	44,755	3,9576	1,10112	3,88474	0,418478
4,48282	44,7999	3,95765	1,08668	3,89764	0,42029
4,50899	44,7998	3,97062	1,07945	3,91056	0,42029
4,51145	42,4532	3,97064	1,07223	3,92318	0,443841

4,51206	41,8666	3,98363	1,05778	3,92323	0,440217
4,51253	41,4153	3,9966	1,05054	3,92325	0,438406
4,53913	41,009	3,99665	1,0361	3,92346	0,422101
4,53946	40,6931	4,00962	1,02887	3,92351	0,418478
4,55297	40,2869	4,02258	1,02164	3,9362	0,436594
4,57947	39,9709	4,03555	1,01441	3,93636	0,423913
4,59284	39,7	4,04852	1,00718	3,94903	0,443841
4,6192	39,5194	4,06149	0,999945	3,94917	0,432971
4,61925	39,4743	4,07446	0,992713	3,94919	0,431159
4,61935	39,384	4,08743	0,985481	3,94922	0,429348
4,63243	39,3839	4,10037	0,985469	3,94924	0,427536
4,63248	39,3388	4,11332	0,985457	3,96195	0,443841
4,63253	39,2937	4,12626	0,985446	3,9749	0,442029
4,64566	39,2485	4,13923	0,978214	3,98783	0,442029
4,65879	39,2033	4,15217	0,978202	4,0137	0,440217
4,65884	39,1582	4,16512	0,97819	4,02664	0,438406
4,68506	39,1129	4,17806	0,978179	4,03957	0,438406
4,69814	39,1128	4,19101	0,978167	4,03959	0,436594
4,72432	39,1127	4,20395	0,978155	4,05252	0,436594
4,73745	39,0675	4,21692	0,970923	4,06546	0,434783
4,75058	39,0223	4,22987	0,970912	4,07839	0,434783
4,76367	39,0222	4,25578	0,963668	4,09133	0,432971
4,78984	39,0221	4,28167	0,963645	4,10428	0,431159
4,80292	39,022	4,29462	0,963633	4,11721	0,431159
4,81601	39,0219	4,30756	0,963621	4,13015	0,429348
4,82914	38,9767	4,32051	0,96361	4,14308	0,429348
4,84218	39,0218	4,3464	0,963586	4,15603	0,427536
4,86835	39,0216	4,35934	0,963575	4,16895	0,427536
4,86835	39,0216	4,37231	0,956343	4,1819	0,425725
4,88139	39,0667	4,38525	0,956331	4,19482	0,425725
4,88144	39,0215	4,39822	0,949099	4,20777	0,423913
4,89452	39,0215	4,42414	0,941855	4,22072	0,422101
4,90761	39,0214	4,45012	0,912951	4,23364	0,422101
4,92065	39,0664	4,47613	0,876827	4,24656	0,422101
4,93383	38,9761	4,47624	0,840725	4,25949	0,422101
4,94691	38,9761	4,48926	0,819053	4,27241	0,422101
4,96005	38,9309	4,50227	0,797381	4,28536	0,42029
4,97308	38,9759	4,51529	0,775708	4,29828	0,42029
4,98612	39,021	4,51531	0,768488	4,31121	0,42029
4,99921	39,0209	4,52828	0,761256	4,32413	0,42029
5,01229	39,0208	4,5283	0,754036	4,33706	0,42029
5,02538	39,0207	4,52835	0,739595	4,34998	0,42029
5,03847	39,0207	4,54132	0,732363	4,36288	0,422101

5,05155	39,0206	4,54134	0,725143	4,3629	0,42029
5,06464	39,0205	4,55431	0,717911	4,3758	0,422101
5,07768	39,0656	4,55433	0,710691	4,38873	0,422101
5,09081	39,0204	4,5673	0,703459	4,38875	0,42029
5,09086	38,9752	4,56735	0,689019	4,40168	0,42029
5,10385	39,0654	4,58034	0,674566	4,4146	0,42029
5,10394	38,9752	4,58036	0,667346	4,42752	0,42029
5,11703	38,9751	4,59333	0,660114	4,44043	0,422101
5,13002	39,0653	4,59336	0,652894	4,4534	0,418478
5,13002	39,0653	4,60632	0,645662	4,45403	0,369565
5,14315	39,0201	4,61932	0,63121	4,4663	0,42029
5,15624	39,02	4,63226	0,631198	4,46665	0,393116
5,16932	39,0199	4,64523	0,623966	4,46723	0,347826
5,18241	39,0199	4,65817	0,623955	4,49329	0,331522
5,19549	39,0198	4,6582	0,616734	4,49348	0,317029
5,20858	39,0197	4,67117	0,609503	4,51954	0,300725
5,22167	39,0196	4,68411	0,609491	4,51968	0,289855
5,23475	39,0196	4,71003	0,602247	4,51982	0,278986
5,24784	39,0195	4,73599	0,580563	4,53286	0,269928
5,26092	39,0194	4,74888	0,594992	4,54585	0,264493
5,27401	39,0194	4,76181	0,602201	4,55885	0,259058
5,28709	39,0193	4,76183	0,59498	4,5589	0,255435
5,30018	39,0192	4,76188	0,58054	4,55894	0,251812
5,31327	39,0191	4,78772	0,594957	4,55897	0,25
5,32635	39,0191	4,80066	0,594945	4,55904	0,244565
5,33944	39,019	4,81363	0,587713	4,57201	0,240942
5,35257	38,9738	4,82658	0,587702	4,61087	0,233696
5,36566	38,9737	4,85247	0,587678	4,6109	0,231884
5,37874	38,9736	4,86541	0,587667	4,61092	0,230072
5,39183	38,9736	4,90425	0,587632	4,62387	0,228261
5,39183	38,9736	4,90425	0,587632	4,62389	0,226449
5,40496	38,9284	4,91722	0,5804	4,63684	0,224638
5,41805	38,9283	4,93014	0,587608	4,63686	0,222826
5,43113	38,9282	4,93016	0,580388	4,63689	0,221014
5,44422	38,9282	4,94308	0,587596	4,63691	0,219203
5,4573	38,9281	4,95605	0,580365	4,64986	0,217391
5,46779	41,41	4,969	0,580353	4,64988	0,21558
5,46812	41,0941	4,98192	0,587561	4,66283	0,213768
5,46845	40,7782	4,98194	0,580341	4,67577	0,211957
5,46892	40,3269	4,99489	0,58033	4,68872	0,210145
5,4805	41,7709	5,00781	0,587538	4,70167	0,208333
5,48059	41,6807	5,0208	0,573086	4,71459	0,208333
5,48073	41,5453	5,0337	0,587515	4,72752	0,208333

5,4934	41,9513	5,03374	0,573074	4,74046	0,206522
5,49344	41,9062	5,04664	0,587503	4,75341	0,20471
5,49349	41,8611	5,05959	0,587491	4,76634	0,20471
5,49354	41,816	5,05961	0,580271	4,77926	0,20471
5,50639	42,0415	5,07256	0,580259	4,79218	0,20471
5,51933	42,1768	5,09842	0,587456	4,79221	0,202899
5,51942	42,0866	5,09845	0,580236	4,80509	0,206522
5,53237	42,2219	5,11139	0,580224	4,81801	0,206522
5,54536	42,3121	5,11139	0,580224	4,81806	0,202899
5,54541	42,2669	5,13728	0,580201	4,84388	0,20471
5,5583	42,4474	5,1373	0,572981	4,84388	0,20471
5,55835	42,4022	5,1373	0,572981	4,85683	0,202899
5,5713	42,5376	5,15023	0,580189	4,86975	0,202899
5,57139	42,4473	5,15025	0,572969	4,8956	0,202899
5,58433	42,5826	5,17612	0,580166	4,90852	0,202899
5,59742	42,5825	5,18906	0,580154	4,92145	0,202899
5,6235	42,6726	5,18908	0,572934	4,93437	0,202899
5,62354	42,6275	5,20201	0,580143	4,94732	0,201087
5,64962	42,7176	5,21495	0,580131	4,96022	0,202899
5,66266	42,7627	5,2279	0,580119	4,96024	0,201087
5,70182	42,8527	5,24084	0,580108	4,97312	0,20471
5,72795	42,8977	5,25379	0,580096	4,98607	0,202899
5,74103	42,8976	5,25379	0,580096	4,99899	0,202899
5,74108	42,8525	5,27965	0,587293	5,01192	0,202899
5,75416	42,8524	5,27968	0,580072	5,02482	0,20471
5,78029	42,8974	5,2926	0,587281	5,05067	0,20471
5,78029	42,8974	5,29262	0,580061	5,05069	0,202899
5,79333	42,9425	5,30554	0,587269	5,06359	0,20471
5,79337	42,8973	5,30557	0,580049	5,07651	0,20471
5,80646	42,8973	5,31849	0,587258	5,08944	0,20471
5,8195	42,9423	5,31853	0,572817	5,08946	0,202899
5,83263	42,8971	5,33143	0,587246	5,10239	0,202899
5,84572	42,897	5,3444	0,580014	5,12826	0,201087
5,84572	42,897	5,37029	0,579991	5,14118	0,201087
5,87189	42,8969	5,38321	0,587199	5,15411	0,201087
5,88497	42,8968	5,38324	0,579979	5,16703	0,201087
5,89801	42,9419	5,39613	0,594408	5,17995	0,201087
5,9111	42,9418	5,39616	0,587188	5,19288	0,201087
5,92418	42,9417	5,40908	0,594396	5,2058	0,201087
5,95031	42,9867	5,42149	0,76045	5,21873	0,201087
5,95036	42,9416	5,42163	0,717128	5,23165	0,201087
5,96325	43,122	5,42195	0,616045	5,24457	0,201087
5,96335	43,0318	5,422	0,601605	5,2575	0,201087

5,98938	43,167	5,43432	0,796539	5,27042	0,201087
6,00232	43,3023	5,43462	0,702676	5,29627	0,201087
6,00237	43,2572	5,43467	0,688236	5,30919	0,201087
6,01531	43,3925	5,43471	0,673795	5,32212	0,201087
6,02835	43,4375	5,43478	0,652135	5,33507	0,199275
6,0284	43,3924	5,43485	0,630474	5,34799	0,199275
6,04139	43,4826	5,46009	0,832617	5,36091	0,199275
6,05443	43,5276	5,46011	0,825397	5,37384	0,199275
6,06751	43,5276	5,47296	0,854266	5,38674	0,201087
6,0805	43,6177	5,47299	0,847046	5,41242	0,213768
6,08055	43,5726	5,48586	0,868695	5,41252	0,206522
6,09354	43,6628	5,48589	0,861475	5,41254	0,20471
6,10663	43,6627	5,49878	0,875904	5,43804	0,231884
6,13275	43,7077	5,51171	0,883112	5,4507	0,251812
6,14584	43,7076	5,52463	0,890321	5,46337	0,271739
6,15888	43,7527	5,53755	0,897529	5,47585	0,306159
6,17196	43,7526	5,56339	0,911946	5,47594	0,298913
6,19809	43,7976	5,57631	0,919155	5,47611	0,286232
6,23734	43,7974	5,58926	0,919143	5,48868	0,313406
6,25043	43,7973	5,60218	0,926352	5,50139	0,32971
6,26347	43,8424	5,61513	0,92634	5,50142	0,327899
6,27655	43,8423	5,62805	0,933549	5,50146	0,324275
6,28964	43,8422	5,64099	0,933537	5,50151	0,320652
6,30272	43,8421	5,66686	0,940734	5,50153	0,318841
6,32885	43,8871	5,69275	0,940711	5,51425	0,335145
6,32885	43,8871	5,70569	0,940699	5,51427	0,333333
6,32894	43,7969	5,71864	0,940687	5,51429	0,331522
6,36811	43,8869	5,73158	0,940675	5,52708	0,342391
6,39428	43,8868	5,74453	0,940664	5,5271	0,34058
6,42045	43,8866	5,75747	0,940652	5,52715	0,336957
6,4205	43,8415	5,78336	0,940629	5,53995	0,346014
6,4205	43,8415	5,80925	0,940605	5,55283	0,349638
6,44667	43,8413	5,8222	0,940594	5,55286	0,347826
6,45975	43,8413	5,83514	0,940582	5,56573	0,351449
6,48578	43,9765	5,84809	0,94057	5,57861	0,355072
6,48588	43,8862	5,86103	0,940559	5,57863	0,353261
6,51181	44,1117	5,86106	0,933338	5,59153	0,355072
6,52476	44,247	5,874	0,933327	5,60443	0,356884
6,52485	44,1568	5,88704	0,904434	5,61734	0,358696
6,53794	44,1567	5,90001	0,897202	5,61736	0,356884
6,53803	44,0665	5,91295	0,89719	5,63026	0,358696
6,53808	44,0213	5,91298	0,88997	5,64318	0,358696
6,53813	43,9762	5,92592	0,889959	5,65608	0,360507

6,55126	43,931	5,93877	0,918828	5,66901	0,360507
6,55131	43,8859	5,95142	1,01268	5,68191	0,362319
6,55135	43,8408	5,95156	0,969358	5,69483	0,362319
6,56449	43,7956	5,95165	0,940477	5,70776	0,362319
6,57762	43,7504	5,96429	1,03433	5,72066	0,36413
6,57767	43,7052	5,96431	1,02711	5,74651	0,36413
6,59085	43,6149	5,97719	1,04876	5,75943	0,36413
6,60398	43,5697	5,97721	1,04154	5,77235	0,36413
6,61711	43,5245	5,99011	1,05597	5,78525	0,365942
6,63029	43,4342	6,00299	1,07761	5,7982	0,36413
6,65651	43,3889	6,00303	1,06317	5,81106	0,369565
6,6696	43,3888	6,01593	1,0776	5,8369	0,369565
6,69586	43,2984	6,02888	1,07759	5,84985	0,367754
6,70899	43,2532	6,05474	1,08479	5,86278	0,367754
6,72208	43,2532	6,08063	1,08476	5,8757	0,367754
6,72213	43,208	6,10652	1,08474	5,88865	0,365942
6,73526	43,1628	6,11944	1,09195	5,90157	0,365942
6,74839	43,1176	6,11944	1,09195	5,92751	0,358696
6,77461	43,0724	6,13239	1,09194	5,92758	0,353261
6,7877	43,0723	6,14533	1,09193	5,94062	0,344203
6,827	43,0269	6,15828	1,09191	5,94072	0,336957
6,82705	42,9818	6,17122	1,0919	5,95362	0,338768
6,85327	42,9365	6,18417	1,09189	5,96652	0,34058
6,86635	42,9365	6,19711	1,09188	5,96664	0,331522
6,8664	42,8913	6,22298	1,09908	5,96666	0,32971
6,89262	42,8461	6,223	1,09186	5,99206	0,36413
6,90571	42,846	6,22303	1,08464	5,99209	0,362319
6,91889	42,7557	6,24887	1,09905	5,99213	0,358696
6,93202	42,7105	6,24889	1,09183	5,9922	0,353261
6,94515	42,6653	6,26184	1,09182	5,9923	0,346014
6,95828	42,6201	6,27476	1,09903	6,00492	0,369565
6,98101	45,9142	6,27478	1,09181	6,00496	0,365942
6,98143	45,508	6,30065	1,09901	6,01782	0,371377
6,98195	45,0116	6,30067	1,09179	6,03074	0,371377
6,99367	46,3202	6,3136	1,09899	6,04367	0,371377
7,00642	46,6361	6,32654	1,09898	6,05659	0,371377
7,01871	47,4031	6,33949	1,09897	6,06951	0,371377
7,01918	46,9519	6,35243	1,09896	6,08241	0,373188
7,03108	48,08	6,36538	1,09895	6,12119	0,373188
7,03113	48,0348	6,37834	1,09172	6,13411	0,373188
7,03132	47,8543	6,39129	1,0917	6,14703	0,373188
7,03141	47,7641	6,40423	1,09169	6,15994	0,375
7,04436	47,8994	6,4172	1,08446	6,17286	0,375

7,05702	48,3054	6,43024	1,05557	6,18578	0,375
7,05707	48,2603	6,43033	1,02669	6,19871	0,375
7,05725	48,0798	6,44337	0,997795	6,21163	0,375
7,06982	48,5761	6,44347	0,968914	6,23748	0,375
7,07001	48,3956	6,48242	0,932778	6,25036	0,378623
7,07006	48,3505	6,49543	0,911105	6,2504	0,375
7,08286	48,6212	6,50843	0,896653	6,26328	0,378623
7,083	48,4858	6,52137	0,896641	6,26333	0,375
7,09585	48,7114	6,52139	0,889421	6,27621	0,378623
7,10889	48,7564	6,54731	0,882178	6,28913	0,378623
7,12188	48,8466	6,56028	0,874946	6,30208	0,376812
7,14786	49,027	6,57324	0,867714	6,31495	0,380435
7,14791	48,9818	6,58619	0,867702	6,315	0,376812
7,17389	49,1622	6,59916	0,86047	6,32788	0,380435
7,17394	49,1171	6,6121	0,860458	6,3408	0,380435
7,18698	49,1621	6,62505	0,860447	6,35373	0,380435
7,20006	49,1621	6,63799	0,860435	6,35375	0,378623
7,21305	49,2522	6,65094	0,860423	6,37957	0,380435
7,23918	49,2972	6,66391	0,853191	6,39205	0,414855
7,2653	49,3422	6,67685	0,85318	6,39208	0,413043
7,27844	49,297	6,68982	0,845948	6,39248	0,382246
7,27844	49,297	6,71571	0,845924	6,40493	0,418478
7,29147	49,342	6,71573	0,838704	6,40495	0,416667
7,30451	49,3871	6,72865	0,845913	6,40507	0,407609
7,30456	49,342	6,74162	0,838681	6,40514	0,402174
7,31765	49,3419	6,75457	0,838669	6,40533	0,387681
7,34377	49,3869	6,76751	0,838657	6,41785	0,418478
7,34382	49,3418	6,78046	0,838646	6,41814	0,396739
7,3569	49,3417	6,7934	0,838634	6,43078	0,418478
7,38303	49,3867	6,81929	0,838611	6,45663	0,418478
7,38307	49,3415	6,81929	0,838611	6,46955	0,418478
7,39616	49,3415	6,83226	0,831379	6,48248	0,418478
7,4092	49,3865	6,84518	0,838587	6,4954	0,418478
7,42224	49,4316	6,84521	0,831367	6,50835	0,416667
7,42228	49,3864	6,87107	0,838564	6,52127	0,416667
7,42228	49,3864	6,8711	0,831344	6,52129	0,414855
7,43532	49,4315	6,88404	0,831332	6,53422	0,414855
7,43537	49,3864	6,89696	0,838541	6,54717	0,413043
7,46149	49,4314	6,90946	0,975713	6,54719	0,411232
7,46154	49,3862	6,90953	0,954053	6,56014	0,40942
7,47458	49,4313	6,90972	0,896291	6,57308	0,407609
7,48766	49,4312	6,92218	1,0479	6,58606	0,403986
7,5008	49,386	6,92227	1,01902	6,58608	0,402174

7,51388	49,3859	6,92274	0,874618	6,59903	0,400362
7,52687	49,4761	6,93486	1,12732	6,59905	0,398551
7,54005	49,3858	6,935	1,08399	6,61197	0,398551
7,55305	49,476	6,96066	1,15617	6,612	0,396739
7,56618	49,4308	6,97349	1,19226	6,62492	0,396739
7,57922	49,4758	6,97351	1,18504	6,63789	0,393116
7,5923	49,4758	6,98639	1,20669	6,65084	0,391304
7,60544	49,4306	6,99926	1,22834	6,65086	0,389493
7,61852	49,4305	6,99928	1,22112	6,66379	0,389493
7,61857	49,3854	7,01221	1,22833	6,66381	0,387681
7,63161	49,4304	7,02496	1,28608	6,67673	0,387681
7,64469	49,4303	7,02506	1,2572	6,68968	0,38587
7,64474	49,3852	7,0251	1,24276	6,70261	0,38587
7,67086	49,4302	7,03798	1,26441	6,71553	0,38587
7,67091	49,3851	7,06385	1,2716	6,72845	0,38587
7,68395	49,4301	7,07674	1,28603	6,7543	0,38587
7,684	49,385	7,07677	1,27881	6,76723	0,38587
7,684	49,385	7,08969	1,28602	6,78015	0,38587
7,69708	49,3849	7,1285	1,29321	6,78017	0,384058
7,71017	49,3848	7,14142	1,30041	6,78017	0,384058
7,72325	49,3848	7,16731	1,30039	6,7931	0,384058
7,74943	49,3846	7,18026	1,30038	6,80605	0,382246
7,76251	49,3846	7,20615	1,30036	6,81897	0,382246
7,7756	49,3845	7,24498	1,30032	6,83189	0,382246
7,78868	49,3844	7,25793	1,30031	6,84482	0,382246
7,81485	49,3843	7,28382	1,30029	6,85774	0,382246
7,84103	49,3841	7,29676	1,30027	6,87067	0,382246
7,85411	49,384	7,29679	1,29305	6,88359	0,382246
7,88028	49,3839	7,32268	1,29303	6,89649	0,384058
7,89337	49,3838	7,34857	1,29301	6,89651	0,382246
7,90645	49,3837	7,36151	1,293	6,90925	0,396739
7,91954	49,3837	7,3874	1,29297	6,90937	0,387681
7,93263	49,3836	7,40035	1,29296	6,90939	0,38587
7,9588	49,3835	7,42624	1,29294	6,90941	0,384058
7,97184	49,4285	7,43918	1,29292	6,9344	0,451087
7,97188	49,3834	7,45213	1,29291	6,93486	0,414855
7,98492	49,4284	7,46507	1,2929	6,94713	0,46558

**Tabla 4B. Coeficiente de transferencia de calor simulado.**

Tiempo	Coeficiente de transferencia de calor
0,012966	2027,22
0,0259319	2000
0,0388979	2000
0,0518639	2000
0,0518639	2000
0,0648298	2000
0,0777958	2027,22
0,0907618	2027,22
0,103728	2027,22
0,116694	2027,22
0,142626	16237,7
0,142626	16237,7
0,142626	16237,7
0,155592	11718,7
0,155592	11718,7
0,168558	12045,4
0,194489	12317,6
0,220421	12535,4
0,233387	12753,2
0,272285	12998,2
0,311183	13161,5
0,324149	13161,5
0,363047	13243,2
0,401945	13270,4
0,414911	13270,4
0,440843	13297,6
0,440843	13297,6
0,453809	13297,6
0,466775	13297,6
0,479741	13324,9
0,492707	13297,6
0,505673	13297,6
0,505673	13297,6
0,518639	13324,9
0,531605	13324,9
0,557536	13324,9
0,570502	13297,6

0,583468	13297,6
0,596434	13297,6
0,596434	13297,6
0,6094	13324,9
0,622366	13324,9
0,635332	13324,9
0,661264	13324,9
0,661264	13324,9
0,67423	13324,9
0,687196	13324,9
0,700162	13324,9
0,713128	13297,6
0,726094	13297,6
0,73906	13297,6
0,764992	13324,9
0,777958	13297,6
0,790924	13297,6
0,80389	13324,9
0,80389	13324,9
0,816856	13297,6
0,829822	13297,6
0,842788	13297,6
0,855754	13297,6
0,86872	13324,9
0,881686	13324,9
0,894652	13324,9
0,894652	13324,9
0,907618	13324,9
0,907618	13324,9
0,920583	13324,9
0,933549	13324,9
0,946515	13324,9
0,959481	13324,9
0,972447	13324,9
0,998379	13324,9
1,01135	13324,9
1,03728	13324,9
1,05024	13324,9
1,06321	13324,9
1,07618	13324,9
1,08914	13297,6
1,11507	13297,6
1,12804	13297,6

1,141	13297,6
1,15397	13297,6
1,16694	13297,6
1,1799	13297,6
1,19287	13324,9
1,20583	13324,9
1,2188	13324,9
1,23177	13324,9
1,24473	13324,9
1,2577	13324,9
1,28363	13324,9
1,2966	13324,9
1,30956	13324,9
1,32253	13297,6
1,33549	13297,6
1,34846	13297,6
1,36143	13297,6
1,37439	13297,6
1,40032	13379,3
1,41329	13352,1
1,42626	13324,9
1,43922	13324,9
1,46515	13352,1
1,49109	13352,1
1,50405	11174,2
1,50405	11174,2
1,52	11882
1,52998	10520,9
1,55592	9921,96
1,55592	9921,96
1,56888	8016,33
1,58185	7145,19
1,59481	6900,18
1,59481	6900,18
1,60778	5974,59
1,64668	5811,25
1,65964	5157,89
1,67261	4967,33
1,68558	4776,77
1,69854	4586,21
1,71151	4341,2
1,73744	4205,08
1,75041	3960,07

1,75041	3960,07
1,75041	3960,07
1,77634	3497,28
1,7893	3116,15
1,7893	3116,15
1,80227	3061,71
1,80227	3061,71
1,80227	3061,71
1,81524	2980,04
1,8282	2925,59
1,8282	2925,59
1,84117	2898,37
1,84117	2898,37
1,85413	2843,92
1,8671	2816,7
1,89303	2762,25
1,89303	2762,25
1,906	2735,03
1,91896	2735,03
1,93193	2735,03
1,94489	2735,03
1,97083	2735,03
1,98379	2735,03
1,99676	2762,25
2,00972	4395,64
2,00972	4395,64
2,02269	3660,62
2,03566	8887,48
2,03566	8887,48
2,04862	6709,62
2,04862	6709,62
2,06159	8941,92
2,06159	8941,92
2,07455	9023,59
2,08752	9132,49
2,11345	9540,83
2,12642	9323,05
2,15235	9785,84
2,15235	9785,84
2,17828	9976,41
2,19125	10030,9
2,20421	10085,3
2,21718	10112,5

2,21718	10112,5
2,23	10167
2,24311	10221,4
2,26904	10248,6
2,28201	10275,9
2,29498	10275,9
2,30794	10275,9
2,32091	10303,1
2,33387	10330,3
2,34684	10330,3
2,35981	10330,3
2,37277	10330,3
2,38574	10330,3
2,3987	10357,5
2,41167	10357,5
2,42464	10357,5
2,4376	10357,5
2,46353	10357,5
2,4765	10357,5
2,48947	10357,5
2,5154	10357,5
2,52836	10384,8
2,54133	10384,8
2,56726	10357,5
2,59319	10384,8
2,60616	10384,8
2,63209	10384,8
2,65802	10384,8
2,67099	10384,8
2,68395	10384,8
2,71	10412
2,71	10412
2,72	10412
2,74	10412
2,75	10412
2,77	10412
2,79	10412
2,80	10412
2,81	10412
2,83	10412
2,84	10412
2,85	10412
2,87	10412

2,88	10412
2,89	10412
2,90	10412
2,94	10412
2,96	10412
2,97	10412
2,98	10902
3,00	10412
3,00	10412
3,0081	11065,3
3,02	11147
3,02	11147
3,03404	11201,5
3,03404	11201,5
3,047	11310,3
3,05997	11419,2
3,05997	11419,2
3,07293	11446,5
3,0859	11473,7
3,09887	11500,9
3,11183	11528,1
3,1248	11555,4
3,13776	11555,4
3,15073	11555,4
3,17666	11582,6
3,18963	11582,6
3,20259	11582,6
3,21556	11582,6
3,22853	11582,6
3,24149	11582,6
3,25446	11582,6
3,26742	11582,6
3,28039	11582,6
3,29335	11582,6
3,31929	11582,6
3,33225	11582,6
3,34522	11582,6
3,35818	11582,6
3,37115	11582,6
3,38412	11582,6
3,39708	11582,6
3,42301	11609,8
3,47488	11528,1

3,47488	11528,1
3,47488	11528,1
3,48784	11446,5
3,50081	11446,5
3,51378	11419,2
3,53971	11419,2
3,55267	11419,2
3,56564	11827,6
3,57861	11446,5
3,59157	11473,7
3,60454	11528,1
3,63047	11555,4
3,64344	11582,6
3,6564	11582,6
3,68233	11582,6
3,6953	11582,6
3,70827	11582,6
3,72123	11582,6
3,7342	11582,6
3,74716	11582,6
3,76013	11582,6
3,7731	11582,6
3,7731	11582,6
3,78606	11582,6
3,79903	11582,6
3,81199	11582,6
3,83793	11582,6
3,83793	11582,6
3,85089	11582,6
3,86386	11582,6
3,86386	11582,6
3,87682	11582,6
3,88979	11582,6
3,90276	11582,6
3,91572	11582,6
3,92869	11528,1
3,94165	11473,7
3,94165	11473,7
3,95462	11419,2
3,96759	11419,2
3,98055	11419,2
3,99352	11419,2
4,00648	11419,2

4,01945	11718,7
4,01945	11718,7
4,01945	11718,7
4,01945	11718,7
4,01945	11718,7
4,03241	11718,7
4,05835	11718,7
4,07131	11718,7
4,08428	11718,7
4,09724	11691,5
4,11021	11691,5
4,12	11637
4,13614	11582,6
4,14911	11555,4
4,14911	11555,4
4,16207	11555,4
4,17504	11555,4
4,18801	11555,4
4,21394	11555,4
4,2269	11555,4
4,23987	11555,4
4,2658	11555,4
4,27877	11555,4
4,27877	11555,4
4,29173	11582,6
4,3047	11582,6
4,31767	11582,6
4,33063	11582,6
4,3436	11582,6
4,35656	11582,6
4,36953	11582,6
4,3825	11582,6
4,39546	11582,6
4,40843	11582,6
4,43436	11582,6
4,47326	10793,1
4,47326	10793,1
4,48622	9867,51
4,48622	9867,51
4,49919	9622,5
4,51216	9404,72
4,52512	9214,16
4,53809	9050,82

4,55105	8914,7
4,57699	8751,36
4,60292	8424,68
4,61588	8397,46
4,61588	8397,46
4,62885	8343,01
4,64182	8315,79
4,65478	8315,79
4,66775	8288,57
4,68071	8261,34
4,69368	8261,34
4,70665	8234,12
4,71961	8179,67
4,73258	8152,45
4,74554	8125,23
4,75851	8125,23
4,77147	8125,23
4,79741	8125,23
4,81037	8125,23
4,82334	8125,23
4,8363	8125,23
4,84927	8125,23
4,8752	8125,23
4,88817	8125,23
4,90113	8125,23
4,92707	8125,23
4,953	8125,23
4,953	8125,23
4,96596	8125,23
4,96596	8125,23
4,97893	8125,23
4,9919	8152,45
5,00486	8152,45
5,01783	8152,45
5,03079	8152,45
5,04376	8152,45
5,05673	8125,23
5,06969	8152,45
5,08266	8125,23
5,09562	8152,45
5,10859	8125,23
5,12156	8152,45
5,13452	8125,23

5,13452	8125,23
5,14749	8152,45
5,14749	8152,45
5,16045	8125,23
5,17342	8152,45
5,17342	8152,45
5,18639	8152,45
5,19935	8152,45
5,21232	8125,23
5,21232	8125,23
5,22528	8152,45
5,23825	8152,45
5,25122	8152,45
5,26418	8152,45
5,26418	8152,45
5,27715	8152,45
5,29011	8125,23
5,29011	8125,23
5,30308	8125,23
5,31605	8125,23
5,31605	8125,23
5,32901	8125,23
5,34198	8125,23
5,34198	8125,23
5,36791	8125,23
5,38088	8125,23
5,38088	8125,23
5,39384	8125,23
5,40681	8152,45
5,40681	8152,45
5,40681	8152,45
5,41977	8778,58
5,43274	8152,45
5,43274	8152,45
5,44571	9785,84
5,45867	9921,96
5,45867	9921,96
5,48	10412
5,49757	10765,9
5,49757	10765,9
5,49757	10765,9
5,49757	10765,9
5,49757	10765,9

5,51053	10847,5
5,5235	10874,8
5,54943	10956,4
5,5624	11010,9
5,5624	11010,9
5,58833	11065,3
5,6013	11092,6
5,61426	11092,6
5,62723	11119,8
5,65	11147
5,65	11147
5,67	11147
5,69	11147
5,72	11147
5,73	11147
5,74392	11174,2
5,76985	11174,2
5,78282	11174,2
5,80875	11174,2
5,82172	11174,2
5,84765	11174,2
5,86062	11174,2
5,88655	11174,2
5,89951	11174,2
5,91248	11174,2
5,93	11147
5,93	11147
5,93841	11119,8
5,95138	11092,6
5,96434	11038,1
6,01621	10684,2
6,01621	10684,2
6,03	10902
6,03	10902
6,04214	10956,4
6,05511	10956,4
6,05511	10956,4
6,06807	10956,4
6,08104	10983,7
6,08104	10983,7
6,094	11010,9
6,10697	11010,9
6,10697	11010,9

6,11994	11010,9
6,14587	11010,9
6,15883	11010,9
6,1718	11010,9
6,18476	11010,9
6,19773	11010,9
6,2107	11010,9
6,2107	11010,9
6,22366	11010,9
6,23663	11010,9
6,24959	11038,1
6,26256	11038,1
6,27553	11038,1
6,28849	11038,1
6,30146	11038,1
6,31442	11038,1
6,32739	11038,1
6,34036	11038,1
6,35332	11010,9
6,36629	11010,9
6,37925	11010,9
6,39222	11010,9
6,40519	11010,9
6,41815	11010,9
6,43112	10439,2
6,44408	10575,3
6,45705	10765,9
6,48298	11201,5
6,48298	11201,5
6,48298	11201,5
6,49595	11201,5
6,50891	11255,9
6,50891	11255,9
6,52188	11283,1
6,53485	11310,3
6,53485	11310,3
6,54781	11337,6
6,56078	11310,3
6,56078	11310,3
6,57374	11283,1
6,58671	11283,1
6,59968	11255,9
6,61264	11228,7

6,61264	11228,7
6,62561	11201,5
6,63857	11174,2
6,65154	11174,2
6,66	11147
6,67747	11119,8
6,67747	11119,8
6,7034	11092,6
6,71637	11065,3
6,72934	11065,3
6,72934	11065,3
6,75527	11065,3
6,76823	11065,3
6,7812	11092,6
6,79417	11092,6
6,80713	11092,6
6,83306	11092,6
6,84603	11119,8
6,87196	11119,8
6,87196	11119,8
6,88493	12235,9
6,88493	12235,9
6,89789	11119,8
6,89789	11119,8
6,89789	11119,8
6,89789	11119,8
6,91086	12480,9
6,92382	11119,8
6,93679	12562,6
6,97569	12698,7
6,98865	12916,5
6,98865	12916,5
7,00162	12998,2
7,00162	12998,2
7,01459	13025,4
7,02755	13052,6
7,04052	13107,1
7,05348	13134,3
7,05348	13134,3
7,07942	13243,2
7,15721	13324,9
7,15721	13324,9
7,17018	13352,1

7,18314	13352,1
7,18314	13352,1
7,19611	13352,1
7,20908	13352,1
7,22204	13352,1
7,23501	13324,9
7,23501	13324,9
7,24797	13352,1
7,24797	13352,1
7,26094	13352,1
7,27391	13352,1
7,27391	13352,1
7,28687	13352,1
7,29984	13352,1
7,29984	13352,1
7,3128	13352,1
7,32577	13352,1
7,32577	13352,1
7,33874	13352,1
7,3517	13352,1
7,36467	13352,1
7,37763	13352,1
7,3906	13352,1
7,40357	13352,1
7,41653	13352,1
7,4295	13352,1
7,44246	13352,1
7,45543	13352,1
7,4684	13352,1
7,48136	13352,1
7,48136	13352,1
7,49433	13352,1
7,52026	13352,1
7,53323	13352,1
7,53323	13352,1
7,54619	13352,1
7,55916	13352,1
7,57212	13352,1
7,58509	13379,3
7,59806	13379,3
7,61102	13379,3
7,62399	13379,3
7,63695	13352,1

7,66288	13352,1
7,67585	13352,1
7,68882	13352,1
7,70178	13352,1
7,71475	13352,1
7,72771	13352,1
7,72771	13352,1
7,74068	13379,3
7,75365	13352,1
7,76661	13352,1
7,77958	13352,1
7,79254	13379,3
7,80551	13379,3
7,81848	13379,3
7,84441	13352,1
7,84441	13352,1
7,85737	13352,1
7,85737	13352,1
7,87034	13352,1
7,88331	13352,1
7,89627	13352,1
7,89627	13352,1

**ANEXO C. Datos de variación en la posición del micro-evaporador.**

**Tabla 1C. Datos del coeficiente de transferencia e calor en la longitud del micro-evaporador en el tiempo.**

longitud	coeficiente de transferencia de calor
0,139906	0,428943
0,193157	0,389948
0,264076	0,358752
0,317265	0,335355
0,370424	0,319757
0,441282	0,304159
0,547476	0,304159
0,618303	0,29636
0,724467	0,304159
0,795233	0,311958
0,901367	0,327556
0,989801	0,343154
1,06057	0,350953
1,149	0,366551
1,21977	0,37435
1,2905	0,389948
1,37897	0,397747
1,4674	0,413345
1,55584	0,428943
1,66191	0,460139
1,73264	0,475737
1,82111	0,483536
1,89184	0,499133
1,96255	0,52253
2,01558	0,538128
2,08629	0,561525
2,13942	0,553726
2,22776	0,592721
2,3692	0,631716
2,5283	0,67851
2,66974	0,717504
2,81115	0,764298
2,95256	0,811092
3,04097	0,834489
3,12937	0,857886

3,23547	0,881282
3,37688	0,928076
3,51832	0,967071
3,67743	1,01386
3,8189	1,04506
3,97804	1,08406
4,13718	1,12305
4,24325	1,15425
4,36702	1,18544
4,49085	1,20104
4,65002	1,23224
4,80922	1,25563
4,98612	1,27903
5,14535	1,29463
5,32228	1,31023
5,44617	1,31023
5,51694	1,31802
5,57004	1,31802
5,64093	1,29463
5,71181	1,27123
5,87126	1,23224
6,03067	1,20104
6,19012	1,16205
6,34953	1,13085
6,50892	1,10745
6,68603	1,07626
6,84539	1,06066
7,00477	1,03726
7,18185	1,01386
7,34124	0,990468
7,51829	0,97487
7,69534	0,959272
7,8547	0,943674
8,03175	0,928076
8,2088	0,912478
8,36815	0,89688
8,54518	0,889081
8,6337	0,881282
8,68683	0,873484
8,75763	0,873484
8,89925	0,865685
8,98778	0,857886
9,09403	0,842288

9,18253	0,842288
9,27102	0,842288
9,41265	0,834489
9,51887	0,82669
9,6428	0,818891
9,78442	0,811092
9,87295	0,803293
9,97917	0,795494
10,0677	0,787695
10,1562	0,787695
10,2093	0,787695
10,3863	0,779896
10,5457	0,764298
10,7227	0,764298
10,8996	0,764298
11,0058	0,787695
11,1121	0,756499
11,2715	0,733102
11,4309	0,701906
11,5903	0,662912
11,7143	0,647314
11,8206	0,623917
11,9445	0,608319
12,0862	0,584922
12,2455	0,577123
12,3695	0,561525
12,5111	0,545927
12,6704	0,538128
12,9006	0,530329
13,0245	0,52253
13,2015	0,514731
13,3608	0,514731
13,5024	0,514731

**Tabla 2C.**

longitud	coeficiente de transferencia de calor
0,122176	0,436742
0,175396	0,405546
0,210856	0,389948
0,210886	0,382149
0,228616	0,37435
0,246407	0,350953
0,299597	0,327556
0,352755	0,311958
0,405853	0,311958
0,458981	0,304159
0,512078	0,304159
0,565175	0,304159
0,635972	0,304159
0,67137	0,304159
0,724437	0,311958
0,830631	0,311958
0,865999	0,319757
0,936765	0,327556
0,989831	0,335355
1,0429	0,343154
1,2021	0,366551
1,2551	0,389948
1,32581	0,413345
1,37884	0,428943
1,48495	0,45234
1,52028	0,467938
1,57329	0,491334
1,66169	0,514731
1,71476	0,52253
1,80316	0,545927
1,8562	0,561525
1,90923	0,577123
2,01531	0,608319
2,05058	0,639515
2,15665	0,670711
2,28039	0,709705
2,35107	0,740901

2,40407	0,764298
2,43938	0,787695
2,49239	0,811092
2,63382	0,850087
2,7576	0,881282
2,86367	0,912478
2,93428	0,959272
3,02268	0,982669
3,05799	1,00607
3,14639	1,02946
3,25247	1,06066
3,30547	1,08406
3,35845	1,11525
3,44685	1,13865
3,51755	1,16205
3,62363	1,19324
3,72973	1,21664
3,78273	1,24003
3,88881	1,27123
3,97721	1,29463
4,04794	1,31023
4,13632	1,34142
4,22472	1,36482
4,24236	1,38042
4,34849	1,39601
4,41923	1,41161
4,48999	1,41941
4,54306	1,42721
4,63152	1,43501
4,70226	1,45061
4,77302	1,45841
4,82609	1,4662
4,89686	1,474
4,94995	1,474
5,05612	1,4818
5,18001	1,4818
5,28627	1,4662
5,32176	1,44281
5,37489	1,43501
5,41032	1,42721
5,46347	1,41161
5,4812	1,40381
5,53433	1,39601

5,60516	1,38821
5,64059	1,38042
5,69372	1,37262
5,81767	1,35702
5,92393	1,34142
5,97706	1,33362
6,03018	1,32582
6,08331	1,31802
6,22494	1,31023
6,33119	1,29463
6,41975	1,27903
6,49058	1,27123
6,6499	1,26343
6,75609	1,26343
6,86229	1,26343
6,93308	1,26343
6,98618	1,26343
7,05701	1,25563
7,11011	1,25563
7,18096	1,24003
7,30486	1,24003
7,34026	1,24003
7,37565	1,24003
7,44645	1,24003
7,53495	1,24003
7,60574	1,24003
7,65884	1,24003
7,72964	1,24003
7,76503	1,24003
7,8358	1,24783
7,8712	1,24783

**Tabla 3C.**

longitud	coeficiente de transferencia de calor
0,175273	0,436742
0,228616	0,37435
0,45849	0,428943
0,546188	0,631716
0,686585	0,935875
0,808822	1,35702
0,948697	1,79376
1,08842	2,2695
1,21041	2,75303
1,35029	3,18977
1,47262	3,58752
1,64835	3,90728
1,75362	4,14125
1,87724	4,21144
2,03874	3,64991
2,16423	3,24437
2,30708	2,92461
2,43193	2,68284
2,59208	2,46447
2,71671	2,2773
2,84124	2,11352
2,98336	1,98094
3,12541	1,86395
3,21431	1,76256
3,37409	1,63778
3,49838	1,5364
3,64028	1,45841
3,81752	1,39601
3,9239	1,34922
4,08343	1,28683
4,18984	1,23224
4,34938	1,16984
4,47343	1,13085
4,59754	1,07626
4,75692	1,05286
4,881	1,00607
5,02271	0,97487

5,12903	0,943674
5,27069	0,928076
5,41237	0,904679
5,51866	0,881282
5,66034	0,857886
5,78433	0,834489
5,92598	0,818891
6,06767	0,795494
6,22699	0,787695
6,36868	0,764298
6,47496	0,740901
6,61659	0,733102
6,70511	0,725303
6,77594	0,717504
6,95296	0,709705
7,09458	0,701906
7,27164	0,686308
7,37789	0,670711
7,46642	0,662912
7,62574	0,655113
7,74967	0,647314
7,89129	0,639515
7,99755	0,623917
8,12147	0,616118
8,22767	0,616118
8,36923	0,623917
8,49315	0,616118
8,54628	0,608319
8,61708	0,608319
8,7056	0,60052
8,88262	0,592721
9,04195	0,584922
9,13044	0,584922
9,16584	0,584922
9,25434	0,584922
9,28973	0,584922
9,43139	0,569324
9,53761	0,561525
9,67921	0,561525
9,8208	0,561525
9,92699	0,561525
10,0155	0,561525
10,104	0,553726

10,1748	0,545927
10,2634	0,538128
10,2811	0,538128
10,3342	0,530329
10,3873	0,530329
10,4758	0,530329
10,5289	0,52253
10,6174	0,514731
10,7059	0,514731
10,7944	0,514731
10,8829	0,52253
10,9537	0,52253
11,0422	0,514731
11,1838	0,506932
11,29	0,506932
11,3786	0,499133
11,5202	0,499133
11,6618	0,499133
11,8034	0,491334
11,8919	0,491334
11,9981	0,491334
12,1043	0,491334
12,2459	0,483536
12,3521	0,475737
12,5292	0,460139
12,7947	0,460139
12,9715	0,499133
13,0953	0,52253
13,2014	0,553726
13,449	0,584922
13,4843	0,616118

**Tabla 4C.**

longitud	coeficiente de transferencia de calor
0,157605	0,428943
0,317204	0,350953
0,476588	0,327556
0,653548	0,335355
0,830386	0,37435
1,00716	0,428943
1,09544	0,483536
1,20139	0,545927
1,34265	0,631716
1,48393	0,709705
1,60743	0,811092
1,76641	0,889081
1,88985	1,00607
2,03107	1,09965
2,1546	1,19324
2,33113	1,31023
2,45466	1,40381
2,57812	1,513
2,71928	1,62218
2,84287	1,70017
2,96649	1,77036
3,12541	1,86395
3,28446	1,92634
3,37271	1,98873
3,49642	2,03553
3,67326	2,07452
3,83249	2,09012
3,93865	2,09792
4,04497	2,06672
4,15132	2,02773
4,27536	1,98873
4,38165	1,96534
4,45257	1,93414
4,54116	1,91075
4,61195	1,91075
4,71824	1,88735
4,85996	1,85615

5,00164	1,83276
5,09023	1,80936
5,21421	1,78596
5,35584	1,77816
5,44446	1,74697
5,56844	1,72357
5,657	1,70797
5,76329	1,68458
5,88724	1,66898
5,97583	1,64558
6,06442	1,62218
6,1884	1,59879
6,31242	1,56759
6,4718	1,54419
6,57815	1,5052
6,7376	1,4662
6,86164	1,42721
7,02106	1,39601
7,12741	1,35702
7,21596	1,34142
7,30458	1,31023
7,51715	1,26343
7,64117	1,23224
7,76525	1,18544
7,83614	1,16205
7,92476	1,13085
8,03101	1,11525
8,1196	1,09185
8,26135	1,05286
8,47392	1,00607
8,59797	0,967071
8,68652	0,951473
8,79281	0,928076
8,95222	0,89688
9,09394	0,865685
9,23563	0,842288
9,34191	0,818891
9,44817	0,803293
9,53672	0,787695
9,64298	0,772097
9,78464	0,756499
9,92626	0,7487
9,99712	0,733102

10,0679	0,725303
10,1388	0,709705
10,2096	0,701906
10,2982	0,686308
10,3867	0,670711
10,4929	0,670711
10,6169	0,655113
10,7054	0,639515
10,8117	0,631716
10,9002	0,631716
11,0064	0,616118
11,1126	0,616118
11,2012	0,60052
11,3251	0,584922
11,4491	0,577123
11,5907	0,569324
11,7146	0,569324
11,8031	0,569324
11,9447	0,569324
12,0686	0,561525
12,2279	0,553726
12,3871	0,577123
12,564	0,592721
12,6702	0,592721
12,7941	0,592721
12,8472	0,60052
12,9003	0,608319
12,9533	0,616118
13,0418	0,616118
13,1126	0,616118

**Tabla 5C.**

longitud	coeficiente de transferencia de calor
0,139906	0,428943
0,264014	0,37435
0,334964	0,335355
0,476772	0,280763
0,565329	0,265165
0,795479	0,249567
1,09639	0,241768
1,46801	0,257366
1,78666	0,241768
2,12294	0,241768
2,28223	0,241768
2,42383	0,241768
2,61852	0,241768
2,77778	0,249567
2,9371	0,241768
3,09639	0,241768
3,27339	0,241768
3,45038	0,241768
3,6097	0,233969
3,71589	0,233969
3,94598	0,233969
4,06988	0,233969
4,24684	0,241768
4,38846	0,233969
4,58318	0,22617
4,68938	0,22617
4,8664	0,218371
5,00796	0,22617
5,23805	0,22617
5,34427	0,218371
5,53896	0,218371
5,69826	0,218371
5,91065	0,218371
5,98144	0,218371
6,22926	0,210572
6,33545	0,210572
6,54788	0,202773

6,70714	0,210572
6,86643	0,210572
6,99032	0,210572
7,20274	0,202773
7,30894	0,202773
7,52136	0,194974
7,64525	0,194974
7,83994	0,194974
7,99923	0,194974
8,19392	0,194974
8,37091	0,194974
8,51254	0,187175
8,6364	0,194974
9,02581	0,187175
9,309	0,187175
9,60988	0,187175
9,78691	0,179376
9,9462	0,179376
10,0878	0,179376
10,3002	0,179376
10,4948	0,187175
10,5655	0,210572
10,6715	0,265165
10,7243	0,343154
10,7771	0,413345
10,83	0,467938
11,0247	0,467938
11,2017	0,467938
11,3964	0,460139
11,538	0,460139
11,6796	0,460139
11,8035	0,460139
12,0513	0,45234
12,1752	0,45234
12,4584	0,460139
12,8123	0,467938
13,1309	0,460139
13,3079	0,460139
13,5203	0,467938



**Tabla 6C.**

longitud	coeficiente de transferencia de calor
0,193034	0,421144
0,281683	0,382149
0,423398	0,350953
0,56493	0,366551
0,670726	0,467938
0,758853	0,561525
0,811399	0,701906
0,899403	0,82669
0,934372	0,935875
1,00465	1,06846
1,02192	1,17764
1,12719	1,41161
1,12765	1,29463
1,19707	1,64558
1,1975	1,5364
1,28504	1,77816
1,32004	1,87955
1,35498	1,99653
1,40759	2,12132
1,46022	2,2383
1,49519	2,34749
1,5655	2,47227
1,6181	2,59705
1,6531	2,69844
1,70571	2,82322
1,77605	2,94021
1,79335	3,04159
1,86362	3,17418
1,95169	3,28336
2,03969	3,40815
2,11003	3,52513
2,28671	3,60312
2,35791	3,50173
2,41147	3,38475

2,46502	3,26776
2,51861	3,14298
2,5722	3,0182
2,64343	2,90901
2,69695	2,79983
2,80361	2,68284
2,89253	2,57366
2,99922	2,44887
3,08811	2,34749
3,2478	2,2461
3,38979	2,14471
3,53176	2,05113
3,69145	1,94974
3,90417	1,86395
4,09911	1,80156
4,29411	1,72357
4,50677	1,65338
4,7548	1,59099
4,96741	1,5364
5,23311	1,4818
5,41029	1,43501
5,69366	1,38821
5,95936	1,33362
6,15423	1,28683
6,43754	1,25563
6,70315	1,22444
6,96879	1,18544
7,28759	1,13085
7,5355	1,09965
7,78338	1,07626
7,99586	1,05286
8,3323	1,01386
8,56248	0,990468
8,81042	0,951473
9,09379	0,904679
9,34161	0,89688
9,62488	0,873484
9,89049	0,842288
10,156	0,842288
10,4393	0,811092
10,6518	0,787695
10,8819	0,772097

I