

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR
CONVECCIÓN EN UNA FASE A TRAVÉS DE MINICANALES CIRCULARES
PARA APLICACIONES ELECTRONICAS DE ALTO PODER.**

ANTONIO MIGUEL RAMOS ARCHIBOLD

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
MAESTRIA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA**

2008

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR
CONVECCIÓN EN UNA FASE A TRAVÉS DE MINICANALES CIRCULARES
PARA APLICACIONES ELECTRONICAS DE ALTO PODER.**

ANTONIO MIGUEL RAMOS ARCHIBOLD

**Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:
MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

ASESOR:

Ing. Antonio José Bula Silvera Ph.D

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DEL NORTE
DIVISIÓN DE INGENIERIAS
MAESTRIA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA**

2008

Nota de Aceptación

Firma del Asesor.

Firma del Director de la Maestría.

Firma del Corrector.

Jurado No 1.

Jurado No 2.

Barranquilla Junio de 2008.

Sin temor a equivocarme, la familia unida representa la base principal para la consecución de las metas personales y grupales del ser humano, de manera que con gran entusiasmo dedico este logro a:

Mi madre Victoria por su continuo ejemplo de lucha sin tregua.

Mi padre Antonio por su insuperable ejemplo de rectitud y tesón.

Mi hermano Fabián por su incondicional y espontáneo apoyo.

A mis abuelos Bertha, Lemuel y Antonio quienes iluminan a diario mi trabajo con la luz divina.

Finalmente y de manera especial:

A mí queridísima hija Paula Carolina quien sin saber ha sido mi motivación y la razón de este trabajo.

Y

A mi amada esposa Milena por su paciencia, entendimiento y apoyo desmedido.

AGRADECIMIENTOS

De una forma muy especial expreso mis agradecimientos a:

Antonio Bula Silvera, Coordinador del programa de Maestría en Ingeniería Mecánica, por sus invaluable enseñanzas tanto académicas como personales, así como, su colaboración y apoyo.

Marco Sanjuán Mejía, Director del departamento de Ingeniería Mecánica, por su gran labor facilitadora en pro de este trabajo y sus apreciadas enseñanzas de liderazgo, visión y gestión.

A la Universidad del Norte por facilitar las herramientas para la realización de este trabajo.

A la Dirección de Investigaciones y Proyectos por su continuo y significativo apoyo, especialmente al grupo de asistentes de la Dirección de este departamento.

Mercedes Cely Bautista, por su desinteresada ayuda.

A mis compañeros de estudios de Maestría, por sus continuos derroches de amistad incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE ANEXOS	11
LISTA DE SIMBOLOS	12
RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN	15
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	17
1.1. ANTECEDENTES.....	17
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
1.3. JUSTIFICACIÓN	25
1.4. OBJETIVOS	26
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.	26
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	26
1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	27
2. MARCO TEORICO	28
3. HIPÓTESIS O PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.	30
4. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	31
4.1. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN	31
4.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	31
4.2.1. ELECCIÓN DE LOS FACTORES, LOS NIVELES Y LOS RANGOS.	31
4.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.	34
4.3.1. DISEÑO, FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA DE MINI CANALES.	34
4.3.2. INSTRUMENTACIÓN, SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA Y ADQUISICIÓN DE DATOS.	39
4.3.3. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBAS.	41
4.4. TRATAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	43

4.4.1. MODELACIÓN DEL FENÓMENO DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	43
5. RESULTADOS	46
5.1 TABULACION DE DATOS OBTENIDOS	46
5.2 RESULTADOS ADIMENSIONALES	53
6. ANALISIS DE RESULTADOS.....	54
6.1. DESARROLLO Y VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DEL EXPERIMENTO FACTORIAL.	54
6.2. INTERPRETACIÓN DE EFECTOS ACTIVOS EN EXPERIMENTO FACTORIAL.	58
6.3. INTERPRETACIÓN ADIMENSIONAL DE LOS RESULTADOS.	66
7. CONCLUSIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificación de Factores, Rangos y Niveles.....	20
Tabla 2. Lista de materiales del sistema completo.....	21
Tabla 3. Datos de temperatura, para probetas de cinco (5) canales.	46
Tabla 4. Datos de temperatura, para probetas de siete (7) canales.....	47
Tabla 5. Datos de Numero de Nusselt Global.	49
Tabla 6. Resultados de residuales estandarizados.	50
Tabla 7. Análisis de varianza del experimento.	51
Tabla 8. Análisis de varianza definitivo.....	52
Tabla 9. Valores de Coeficientes de regresión.....	56
Tabla 10. Características Geométricas de las probetas utilizadas.	66

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Disipador de calor convencional	18
Figura 2. Consumo de Poder en Procesadores.....	19
Figura 3. Dispositivo Mini canales	19
Figura 4. Gráfica de Explosionado del sistema completo.....	34
Figura 5. Detalles del sistema de distribución de agua.....	37
Figura 6. Detalles del ensamble de Mini canales.....	38
Figura 7. Detalles del posicionamiento de los sensores.....	39
Figura 8. Lazo de control de temperatura.	40
Figura 9 Modulo HT10X	40
Figura 10. Esquema de la operación de las corridas.....	42
Figura 11. Orden Interno de mini canales en las probetas.....	42
Figura 12. Gráfica de probabilidad normal de los residuales.	55
Figura 13. Gráfica de los residuales contra valores ajustados.	56
Figura 14. Gráfica de probabilidad normal de los efectos.	57
Figura 15. Efecto del flujo volumétrico.....	58
Figura 16. Efecto del Diámetro de los canales.....	59
Figura 17. Efecto del Número de canales.	59
Figura 18. Efecto de la ubicación física de los canales.....	60
Figura 19. Efecto de la interacción AC.....	61
Figura 20. Efecto de la interacción BC.....	62
Figura 21. Efecto de la interacción BD.....	62
Figura 22. Superficie de respuesta y Gráfica de contorno para la interacción BC.	64
Figura 23. Superficie de respuesta y Gráfica de contorno para la interacción BD.	65
Figura 24. Variación de Nu como función de Re en canal No1 de probeta de cinco canales.	67

Figura 25. Variación de Nu como función de Re en canal No3 de probeta de cinco canales.	68
Figura 26. Variación de Nu como función de Re en canal No5 de probeta de cinco canales.	68
Figura 27. Efecto del número de canales sobre Nu para el canal No1 y $D_h=0.25$ y 0.5mm.	69
Figura 28. Efecto del número de canales sobre Nu para el canal No3 y $D_h=0.25$ y 0.5mm.	70
Figura 29. Efecto del número de canales sobre Nu para el canal No3 y $D_h=0.25$ y 0.5mm.	71

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1.	59
ANEXO 2.	60
ANEXO 3.	61
ANEXO 4.	62
ANEXO 5.	63
ANEXO 6.	64
ANEXO 7.	65
ANEXO 8.	66

LISTA DE SIMBOLOS

A = área.

CH=Ubicación del canal.

C_p =Calor específico del agua.

D =diámetro del mini canal.

D_h = diámetro hidráulico del mini canal.

F =flujo volumétrico.

L =Longitud del mini canal.

L^* =

N =número de canales contenidos en la probeta.

Nu =número de Nusselt.

\bar{P} = Presión promedio.

Pr =número de Prandlt.

Q =Calor.

Re = Número de Reynolds

RE=Residuales Estandarizados

SSR= Solid State Rele

T =temperatura.

TC= Temperature Controler

TT= Temperature transmitter

U =Coeficiente Global de Transferencia de Calor.

V = Voltios.

W =ancho de la probeta.

e =espesor de la probeta.

k =conductividad térmica del agua.

\dot{m} =Flujo masico de agua.

r =Radio del tubo.

u = velocidad promedio.

ν = Viscosidad cinemática.

\bar{u} = Componente promedio de la velocidad en eje horizontal de sistema cartesiano.

\bar{v}_r = Componente promedio de la velocidad radial en sistema cilíndrico.

$\frac{d}{dr}$ = Derivada total respecto a eje radial de sistema axisimétrico.

$\frac{\partial}{\partial r}$ = Derivada parcial respecto a eje radial de sistema axisimétrico.

$\frac{d}{dx}$ = Derivada total respecto a eje horizontal de sistema cartesiano.

Símbolos Griegos

Δ = delta, cambio en una propiedad.

μ = viscosidad dinámica a una temperatura dada.

π = pi

ρ = densidad del fluido.

Subíndices

e = entrada

m = media.

s = salida

w = pared.

RESUMEN

En la actualidad el incremento en la velocidad de procesamiento de datos y señales a través de sistemas electrónicos constituye la base y el motor de todas aquellas aplicaciones donde es necesario el uso de computadores personales, servidores, estaciones de trabajo e instrumentos electrónicos; es por esto, que la industria de circuitos integrados apunta al diseño y fabricación de chips y componentes electrónicos de menor tamaño con mayor velocidad de procesamiento, lo que origina que en dichos componentes la cantidad de calor a remover aumente significativamente.

Debido a esto se plantea una alternativa para el enfriamiento de los dispositivos electrónicos llamada enfriamiento por mini canales. Los mini canales son canales de flujo, posicionados en forma paralela a la dirección del flujo con diámetros muy pequeños (0.3 – 2.0 mm) que tienen el potencial para ser utilizados eficientemente en procesos de intercambio de calor. Para ello, se debe determinar de manera experimental la influencia que tienen sobre el número de Nusselt factores como el número de canales, el diámetro de los canales, el material utilizado para los canales y el flujo de fluido refrigerante; además de determinar el comportamiento térmico individual de cada canal en función del número de Nusselt. Para esto, se establecerá una metodología para las mediciones de Temperatura a lo largo de los mini canales que permita una adecuada obtención de resultados y, de este modo, realizar a través de un diseño de experimentos la caracterización de las variables mencionadas con anterioridad.

INTRODUCCIÓN

A través del continuo desarrollo de micro componentes para la industria electrónica, de procesos químicos y ciencias de la salud, sumado esto a los significativos avances en las técnicas de fabricación de estos dispositivos, hacen que la investigación experimental enfocada a la obtención de diseños óptimos, parámetros de operación y configuraciones especiales de dispositivos de micro flujo (MFD¹) halla tomado especial importancia desde inicios de la década de los 80's.

De esta manera los primeros trabajos desarrollados por Tuckerman y Pease [1] sobre características de flujo y transferencia de calor en micro canales fundamentaron una serie de trabajos experimentales que se han visto enfocados principalmente en mediciones del factor de fricción y coeficientes de transferencia de calor por convección y la forma como los factores principales inciden sobre estos. Es así como Wu y Little [2], Peng et al [3] y Peng y Peterson [4] han desarrollado estudios experimentales para el desarrollo de correlaciones del factor de fricción en probetas siliconadas con micro canales de sección transversal trapezoidal y rectangular realizados con técnicas fotolitográficas con diámetros hidráulicos entre 55.81 y 72.38 μm .

En este sentido a través del desarrollo de esta investigación se pretende determinar de manera experimental la influencia que presentan sobre el número de Nusselt en probetas de aleación de aluminio 7075 con mini canales circulares factores como el número de canales, el diámetro de los canales y el flujo de fluido refrigerante, utilizando agua en estado líquido y régimen turbulento. Igualmente se espera Determinar cual el comportamiento térmico de cada canal por separado variando condiciones de flujo.

¹ Micro Fluid Device. Dispositivo cuya longitud característica se encuentra entre 1 μm y 1mm.

A nivel nacional este trabajo de investigación, de acuerdo con la bibliografía consultada, no tiene precedentes hasta la fecha, de manera que puede representar una base para futuras investigaciones en el tema y de la misma forma una herramienta para la industria de componentes electrónicos en América latina. A nivel internacional este tipo de investigaciones han sido desarrolladas en probetas con números elevados de canales por lo que resulta complicado realizar mediciones de distribución de temperaturas a través de cada canal. En otros casos los resultados obedecen a flujos completamente laminares.

El proceso de experimentación se llevará a cabo inicialmente con el diseño, fabricación, instrumentación y ensayo de las diferentes configuraciones de las probetas para seguidamente realizar el análisis de los resultados obtenidos, durante el este último proceso se incluye el diseño y resultados de un diseño experimental factorial.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

1.1. ANTECEDENTES

La primera generación de dispositivos para enfriamiento de unidades de procesamiento central (CPU) corresponden a los disipadores de calor, estos equipos utilizados en forma masiva desde su aparición con el procesador Pentium han logrado satisfacer los requerimientos de remoción de calor a través de estos años solo con la implementación de ligeros cambios en cuanto a sus dimensiones, tipo de material de la superficie extendida y velocidad de giro del ventilador.

El dispositivo está compuesto por dos partes principales, una placa disipadora con arreglo de superficies extendidas dispuesta directamente sobre la parte superior del procesador y un ventilador de tiro forzado ó inducido posicionado sobre las aletas, como se aprecia en la figura 1.

Los requerimientos en cuanto a elevadas velocidades de procesamiento de datos y señales por parte de la industria de los sistemas y computadores han generado el desarrollo de unidades de procesamiento con un incremento significativo en la energía a disipar (Ver figura 2), de manera que el uso de disipadores de calor como método tradicional de enfriamiento en dichas unidades ha alcanzado limites operacionales al manejar aire como fluido de trabajo. De acuerdo con Ortega [5], utilizando aire como fluido de enfriamiento, se dificulta la obtención de diseños de disipadores de calor convencionales con índices favorables. Manejando como valor máximo de disipación de calor 100 W/cm^2 .

En este sentido, la búsqueda de alternativas para el desarrollo de métodos de enfriamiento para componentes electrónicos se ha enfocado hacia el diseño de dispositivos que utilicen un fluido de trabajo con mejores propiedades térmicas que el aire; es así como, a principios de la década del 80 se inician los primeros trabajos con

Tuckerman y Pease [1] realizando estudios experimentales de transferencia de calor por convección forzada en micro canales utilizando agua como fluido de trabajo. Dentro de los resultados más relevantes obtenidos se encuentra un máximo de $790\text{W}/\text{cm}^2$ de flujo de calor rechazado con un incremento de 71°C en la temperatura del agua.

Los micro canales se han convertido en el principal dispositivo estudiado de la nueva generación de sistemas de enfriamiento para componentes electrónicos de alto poder, hacen parte de los dispositivos de micro flujo (MFD) y son canales orientados en la dirección del flujo realizados al interior de una matriz sólida que tienen el potencial para ser utilizados eficientemente en procesos de intercambio de calor, en la figura 3 se muestra esquemáticamente un dispositivo de micro canales.

De acuerdo con Morini [6], todo aquel dispositivo cuya longitud característica tenga dimensiones entre $1\mu\text{m}$ y 1mm , es un micro dispositivo. Generalmente los micro-sistemas pueden subdividirse en tres categorías:

- MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)
- MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems)
- MFD (Micro-Flow Devices)

Figura 1. Disipador de calor convencional.²



² Tomado de Verax Ventilation (http://www.verax.de/verax.php?template=catalog_entry&entryid=42)

Figura 2. Consumo de poder en procesadores Comerciales. Tomado de Lok [14]

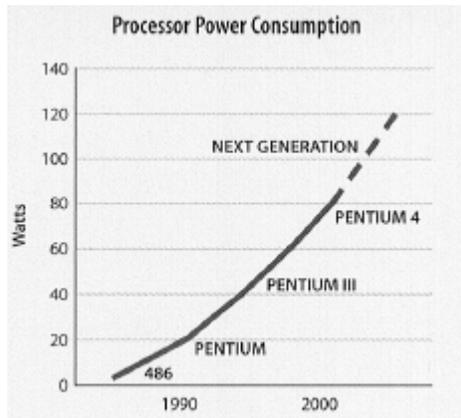
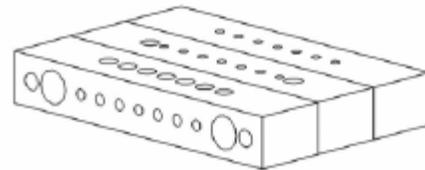


Figura 3. Dispositivo Mini canales. Tomado de Ramos, Bula y Cely [15]



Los trabajos iniciales realizados por Tuckerman y Pease [1] han servido como base para una significativa cantidad de trabajos experimentales realizados desde entonces sobre micro y mini canales en función de las características hidrodinámicas y de transferencia de calor.

Los primeros trabajos experimentales realizados para la medición del factor de fricción a través de micro canales siliconados con diámetros hidráulicos de 55.81, 55.92 y 72.38 μm y una sección transversal trapezoidal fueron realizados por Wu y Little [2]. Las pruebas experimentales fueron realizadas en 100 micro canales de vidrio en una matriz siliconada, utilizando como fluido de trabajo una variedad de sustancias gaseosas como N_2 , H_2 y Ar. Las mediciones obtenidas del factor de fricción estuvieron entre un 10 y 30% por encima del valor teórico predicho por la teoría convencional.

Los autores concluyeron que las desviaciones observadas en los valores obtenidos del factor de fricción tuvieron su origen en los valores elevados de la rugosidad relativa de

las superficies de las probetas así como en la distribución asimétrica de ésta en las paredes.

Pfalher et al. [7], ensayaron experimentalmente micro canales de sección transversal rectangular con diámetros hidráulicos entre 1.6 y 3.4 μm ; de la misma forma experimentaron en micro canales de sección trapezoidal con dimensiones de 100 μm de ancho y 0.5 – 50 μm de alto. Para números de Reynolds entre 50 y 300, utilizaron como fluidos de trabajo líquidos (isopropanol, aceite siliconado) y gases (helio y nitrógeno). Los valores medidos del factor de fricción fueron ligeramente bajos a los predichos teóricamente. El número de Poiseulle ($f\text{Re}$) decreció con el número de Reynolds en los canales más pequeños estudiados. Adicionalmente encontraron que la naturaleza polar del fluido de trabajo afecta el factor de fricción.

Choi et al. [8] realizaron mediciones experimentales de flujo laminar completamente desarrollado de nitrógeno gaseoso, a través de micro tubos de silicio con diámetros de 3, 7, 10, 53, 81 μm . Durante su estudio utilizaron un amplio rango de valores para el número de Reynolds comprendido entre 30 y 20000. Encontraron que el número de Poiseulle en régimen laminar es menor que el valor convencional de ($f\text{Re} = 16$). Por otro lado no se encontró evidencia de las variaciones del factor de fricción con la rugosidad relativa de la superficie de las paredes.

Mala y Li [9] presentaron su trabajo experimental analizando el flujo de agua a través de micro tubos de cristal de silicio y acero inoxidable de sección transversal circular, con diámetros hidráulicos comprendidos entre 50 y 254 μm . Para las probetas de menor diámetro, observaron una tendencia no lineal entre la caída de presión y el flujo volumétrico para números de Reynolds bajos. Además encontraron valores del factor de fricción consecuentemente elevados con respecto a los valores teóricos convencionales. Adicionalmente, sus resultados experimentales mostraron una relación entre el tipo de

material y las características hidrodinámicas; esto es, para el mismo flujo volumétrico y diámetro de los micro tubos, se observó un gradiente de presión elevado a través de las probetas fabricadas de cristal de silicio que en las de acero inoxidable.

Rahman [10], trabajó experimentalmente en las mediciones de coeficientes de transferencia de calor y caídas de presión en micro canales especialmente fabricados en la cara posterior de una oblea de silicio con chips posicionados en la cara opuesta, el fluido de trabajo utilizado fue agua. Los factores trabajados durante la investigación fueron flujo volumétrico, tamaño de los canales y la configuración de estos, en este último factor se presentaron dos configuraciones la configuración en paralelo y la serie; en la primera se fabricaron canales paralelos que se dispusieron a lo largo de la matriz sólida, entre la entrada y la salida del fluido de trabajo, mientras que en la configuración en serie solo un canal atraviesa toda la matriz sólida en un recorrido en zig-zag desde la entrada hasta la salida del fluido.

Para diferentes tipos de obleas, el autor encontró que los números de Nusselt locales (Nu) son mayores en las cercanías a la entrada que a la salida del dispositivo, para los diferentes números de Reynolds ensayados. Por otro lado, dado que, la longitud de los canales en U es tres veces mayor que en los canales en I, el autor destaca el hecho que los números locales de Nusselt son mayores en las probetas en U que en la I.

Finalmente el autor compara las variaciones experimentales en régimen laminar y turbulento de Nu en función de Re con correlaciones convencionales para este tipo de sistemas y encuentra que los valores experimentales de Nu local son mayores que los valores convencionales, el motivo de este comportamiento de acuerdo con el autor se debe al impacto significativo de la rugosidad superficial.

Jiang et al. [11], ensayaron experimentalmente micro intercambiadores de calor de cobre, de poco espesor y de sección transversal rectangular con diámetros hidráulicos de $300\mu\text{m}$, en los cuales realizaron mediciones del factor de fricción, como parámetro hidrodinámico. Las mediciones de rugosidad se realizaron a través de un microscopio de barrido electrónico que mostró valores entre 5.8 y $36.3\mu\text{m}$; originando un valor promedio de $0.1\mu\text{m}$.

Los valores obtenidos del factor de fricción fueron mayores que los predichos teóricamente. Los autores justifican este hecho, debido a que el efecto de entrada hidrodinámica no es despreciable para el espesor de probetas utilizadas. Por otro lado los autores destacan la irregularidad en cuanto a las secciones transversales de sus probetas, las cuales no eran completamente rectangulares originada por el proceso de fabricación de estas.

Teniendo en cuenta que, el grueso de los trabajos mencionados en la revisión presentada, apuntan, hacia el desarrollo de expresiones y variaciones de las condiciones hidrodinámicas en diferentes configuraciones de microcanales estudiados, tomando como parámetros de medición el factor de fricción y el número de Poiseulle. Entonces el grupo de investigación, decide dedicar los esfuerzos y enfocar esta investigación hacia el desarrollo de las condiciones térmicas en los minicanales basados en métodos experimentales y estadísticos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente los retos de la industria de dispositivos electrónicos, especialmente la industria de circuitos integrados se encuentran orientados hacia la búsqueda de dispositivos de menor tamaño y cuya velocidad de procesamiento de información sea mucho mayor que los niveles actuales, con lo que continuamente se ven incrementadas las cantidades de energía disipada en forma de calor a través de estos elementos (Ver figura 2), haciendo esto, que los métodos actuales de enfriamiento para estos dispositivos se encuentren en el límite de sus condiciones de operación y se conviertan en soluciones con relaciones de costo-efectividad muy altas e ineficientes.

Es por eso, que para remover los niveles de energía requeridos por estos nuevos dispositivos sin aumentar el tamaño de los disipadores ó incrementar el número y tamaño de ventiladores, se requiere un proceso de enfriamiento alternativo como lo es el enfriamiento por mini canales utilizando un fluido de trabajo con mejores propiedades térmicas, como es el caso del agua.

Tomando como base lo anterior se pretende el estudio experimental del proceso de transferencia de calor en mini canales y de esta forma determinar la influencia de factores como el número de canales, el diámetro de los canales y el flujo de fluido refrigerante sobre el número ⁹ de Nusselt; así como, la determinación de la eficacia de cada canal. En este sentido, se diseñará un análisis experimental factorial y a partir de los resultados obtenidos, realizar las correlaciones entre dichos parámetros y las correspondientes inferencias.

En cuanto a la influencia de las características hidrodinámicas se espera que con el incremento de número de Reynolds se presente en general un incremento en la variable

de salida, manifestándose de manera más significativa en los canales de menor diámetro hidráulico.

La caracterización del proceso de enfriamiento mediante la utilización del sistema de mini canales, así como, la medición de la eficiencia de cada mini canal, permitirá la creación del conocimiento necesario para la implementación de este tipo de tecnologías en el ámbito local y nacional de manera que la industria de componentes electrónicos presente en el país logre estándares de competitividad que permitan su posicionamiento a escala mundial.

Por otro lado el desarrollo de esta investigación le permite al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte estar al nivel de grupos de investigación homogéneos en el ámbito mundial, donde actualmente se estudian este tipo de tecnologías logrando con esto un mejor posicionamiento en cuanto a investigación se refiere.

El aporte que tendrá esta investigación con relación a investigaciones realizadas con anterioridad a nivel internacional radica en el hecho que, a través de la instrumentación a implementar será posible determinar la eficiencia de cada mini canal sobre la cantidad de calor removido teniendo en cuenta la influencia de los demás mini canales.

1.3. JUSTIFICACIÓN

A través del estudio experimental del fenómeno de transferencia de calor por convección en una fase, realizado en mini canales enfriados por agua, se pretende ampliar el conocimiento desde el punto de vista térmico en este tipo de sistemas, con miras a acortar cada vez más la necesidad de diseñar y fabricar dispositivos electrónicos con mejor desempeño y, de esta forma, contribuir a la búsqueda de soluciones energéticas para aplicaciones con altos niveles de exigencia y mejores índices de operación.

Teniendo en cuenta la utilidad del conocimiento derivado de la presente investigación, así como el impacto directo que pudiese tener sobre las aplicaciones comprendidas desde un computador personal con mejor desempeño para programas con alta exigencia en resolución gráfica, hasta el incremento en la velocidad de transmisión de datos en un transductor de presión ubicado en un tramo de un oleoducto, resulta de gran importancia el desarrollo de este tipo de estudios.

Finalmente, en el ámbito local y regional los resultados de este trabajo tienen el potencial de iniciar el estudio para la posible comercialización de este tipo de tecnologías dado que la fabricación, montaje e instrumentación del sistema, se realizó completamente con equipos y recurso humano de la Universidad del Norte.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

Caracterizar a través de la implementación de un experimento factorial el fenómeno de transferencia de calor por convección presente en mini canales de sección circular.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Realizar el diseño, la fabricación y el montaje del dispositivo de enfriamiento por mini canales.
- Especificar e implementar la instrumentación y el sistema de adquisición de datos requerido para efectuar adecuadamente el proceso de experimentación.
- Establecer las inferencias y el análisis correspondiente a los datos experimentales obtenidos.
- Desarrollar correlaciones experimentales para el proceso de transferencia de calor por convección en mini canales circulares como función de los factores de diseño del sistema.
- Estudiar y analizar el comportamiento térmico individual de cada mini canal como función del número de Nusselt.

1.5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

A partir del inicio de la investigación se detectaron como limitaciones de la investigación, la falta de consideración de algunos factores, que a juicio de los investigadores afectaban la transferencia de calor en el dispositivo de mini canales, tales como:

- El número de filas de agujeros en la probeta.
- La distancia de separación de los agujeros en la probeta

Dichos factores no serán incluidos debido a que el proceso de fabricación a utilizar no permite la inclusión de estas variables.

Por otro lado, solo se utilizará una aleación de aluminio 7075 como material para la fabricación de las probetas, abriendo la posibilidad de utilizar otros materiales y de esta forma realizar comparaciones con los resultados de esta investigación.

De la misma forma y debido al rango del transductor de flujo utilizado para el bombeo de agua a los mini canales, los niveles de los flujos volumétricos a utilizar se limitaron a cuatro (1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 lt/min).

2. MARCO TEORICO

En este estudio se plantea una aproximación experimental para la solución del problema de transferencia de calor por convección en fase simple entre un fluido y una superficie sólida que en este caso es un canal o arreglos de canales de sección circular.

Se parte de la consideración de una región lo suficientemente apartada de la entrada del mini canal donde el perfil de velocidad se encuentre completamente desarrollado y permanezca constante de allí en adelante mientras el perfil de temperatura se desarrolla.

Se asume que la temperatura del fluido en algún punto corriente arriba debe ser uniforme e igual a la temperatura superficial del canal. Además se plantea considerar las propiedades termo-físicas del fluido de trabajo como constantes, así como los efectos viscosos despreciables.

A continuación se presentan las ecuaciones diferenciales para la capa limite hidrodinámica de flujos turbulentos, conocidas en la literatura como *Reynolds-averaged equations* de acuerdo con Kays and Crawford [16], para un sistema de coordenadas axisimétrico.

El conjunto de expresiones son derivadas a partir de las ecuaciones de conservación de masa, Navier stokes y conservación de energía utilizadas para modelar flujos laminares; sin embargo, difieren en su forma básica por la adición del término dependiente del tiempo, reflejando el hecho de que un flujo turbulento es inherentemente transitorio.

Como consecuencia de la reformulación de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno se introducen dos variables adicionales, llamadas *Reynolds Stresses* para la ecuación de cantidad de movimiento y *Turbulent Heat Fluxes*.

La ecuación diferencial de cantidad de movimiento para la situación descrita viene dada por:

$$\bar{u} \frac{d\bar{u}}{dx} + \bar{v}_r \frac{d\bar{u}}{dr} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\nu + \varepsilon_M) r \frac{d\bar{u}}{dr} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{d\bar{P}}{dx} = 0$$

Donde ε_M representa la difusividad de eddy para cantidad de movimiento y tiene magnitud similar a la viscosidad cinemática.

Evaluando la entalpía a través de:

La ecuación diferencial para la conservación de energía viene dada por:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + \bar{v}_r \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\alpha + \varepsilon_H) \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} \right] = 0$$

3. HIPÓTESIS O PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.

Se plantea como hipótesis principal de investigación para este estudio la siguiente:

Dada la obtención de expresiones experimentales que relacionen el número de Nusselt promedio con: el flujo volumétrico, el diámetro de los canales y el número de canales en las probetas de trabajo.

Se esperan los siguientes efectos:

- Incremento del número de Nusselt con el aumento del flujo volumétrico.
- Decremento del número de Nusselt con el aumento del diámetro de los canales.
- Decremento del número de Nusselt con el aumento de la cantidad de canales.

4. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

4.1. TIPO DE LA INVESTIGACIÓN

Este estudio corresponde a una investigación básica de carácter experimental-correlacional, cuyo propósito central es someter a prueba una determinada hipótesis para establecer los resultados que de ella se desprenden; así como, establecer el grado de relación que existe entre las variables consideradas en el proceso estudiado. Para esto se llevará a cabo un experimento, que puede definirse como: una serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de la variable de salida [12].

En este sentido, este proceso experimental tiene como principal propósito el estudio y caracterización del proceso de transferencia de calor presente en mini canales de manera que permita determinar los factores (controlables y no controlables) que afectan la ocurrencia del proceso descrito anteriormente. De otro lado, a través de este conocimiento se espera el mejoramiento en las condiciones de operación de dispositivos electrónicos; así como, el posible diseño de nuevos productos en este campo.

4.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación utiliza como estrategia de experimentación la conducción de un experimento factorial multinivel, utilizando como modelo estadístico el modelo con efectos fijos, descrito por la siguiente expresión:

$$y_{ijkmn} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \kappa_m + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\alpha\kappa)_{im} + (\beta\gamma)_{jk} + (\beta\kappa)_{jm} + (\gamma\kappa)_{km} + (\alpha\beta\gamma\kappa)_{ijkm} + \varepsilon_{ijkm};$$
$$i = 1, 2, \dots, a \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, b \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, c \quad ; \quad m = 1, 2, \dots, d \quad ; \quad n = 1, 2, \dots, e$$

De esta manera el interés se centra en probar la igualdad de las medias de los tratamientos o probar que los efectos de los tratamientos³ son cero.

La expresión del modelo presentado, requiere de ciertos supuestos para probar que no hay diferencias en las medias de los tratamientos. Estos supuestos son:

- Descripción adecuada de las observaciones a través del modelo
- Distribución normal e independiente de los errores con media cero y varianza σ^2 constante pero desconocida.

4.2.1. Elección de los factores, los niveles y los rangos. Para el diseño estadístico del experimento se seleccionaron como factores de diseño⁴:

- El flujo volumétrico.
- El diámetro de los canales.
- El número de canales maquinados en la probeta.
- La ubicación del canal en la probeta.

³ Los efectos de los tratamientos hacen referencia al segundo termino de la ecuación N°1

⁴ Factores que se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento.

Una vez identificados los factores de diseño, se establecieron los rangos dentro de los cuales estos se harían variar, lo anterior, de acuerdo a:

- Las restricciones del equipo de suministro de agua.
- El conocimiento del proceso por parte del investigador principal.

Tabla 1. Especificación de Factores, Rangos y Niveles.

FACTOR	RANGO	NIVELES
Flujo Volumétrico	1,0 - 2,5 (lt/min)	1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5
Diámetro del Canal	1,0 - 2,0 (mm)	1,0 - 1,5 - 2,0
Numero de Canales	5,0 - 7,0 (Unidades)	5,0 - 7,0
Ubicación del Canal	1,0 - 5,0	1,0 - 3,0 - 5,0

4.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.

4.3.1. **Diseño, fabricación y montaje del sistema de mini canales.** El sistema utilizado para la realización de las corridas experimentales consta de cuatro módulos o subsistemas ilustrados en la figura 4 y especificados de la siguiente manera:

Figura 4. Gráfica de Explosionado del sistema completo.

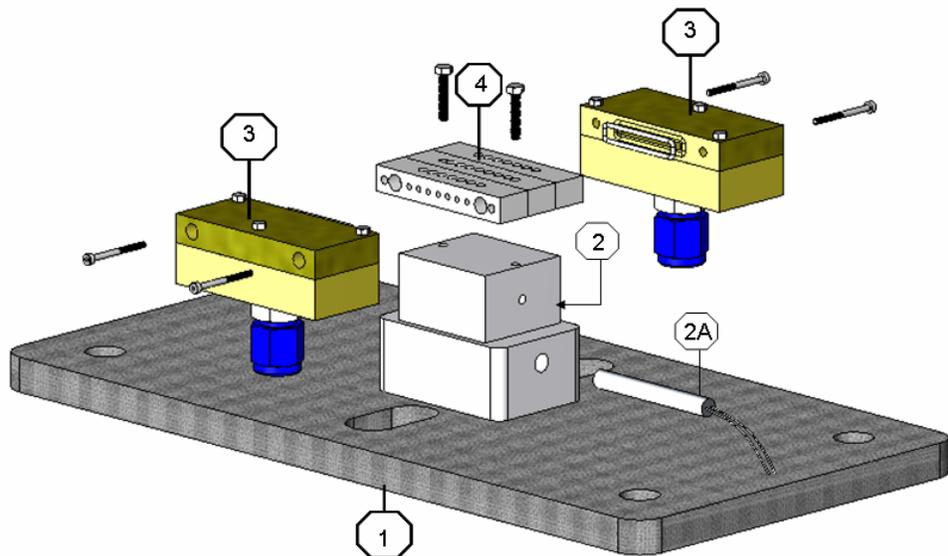


Tabla 2. Lista de materiales del sistema completo.

ITEM	CAANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	Placa soporte rectangular de 300x150x12mm	Poliuretano
2	1	Soporte Calentador	Aleación de Aluminio 6061-T4
2A	1	Resistencia tipo cartucho	Acero Inoxidable 304 con recubrimiento de Incoloy
3	2	Sistema de distribución de agua	Baquelita
4	1	Ensamble de Minicanales	Aleación de Aluminio 6061-T4

Placa Soporte:

Este módulo tiene como función soportar los tres subsistemas restantes y permitir su fijación al banco de suministro del fluido de trabajo. El plano de este componente, así como la ficha técnica del material utilizado para su fabricación se ilustran en los anexos 1 y 2 respectivamente.

Soporte Calentador:

Partiendo del hecho que, esta investigación pretende estudiar y describir un sistema alternativo de enfriamiento para componentes electrónicos que disipan altas cantidades de calor⁵, este módulo tiene como propósito servir como fuente generadora de energía. Para esto se insertó en el soporte una resistencia de tipo cartucho de ¼ in de diámetro y 2 in de longitud como se aprecia en la figura 4 (Ítem 2^a).

La resistencia disipa 120W cuando el voltaje de alimentación es de 115 V. El material utilizado para las resistencias es acero inoxidable 304 con un recubrimiento de Incoloy⁶ y el del soporte del calentador es una aleación de aluminio 6061. (Ver Anexo 3 y 4 para la ficha técnica de cada material respectivamente)

La fijación entre el soporte calentador y el ensamble de mini canales se realizó a través de elementos roscados, ilustrados en la figura 4. El plano de detalle correspondiente a este módulo se puede apreciar en el Anexo 5.

⁵ De acuerdo con Ortega [5], para un área superficial de 1 in², los niveles de alta disipación energética se encuentran por encima de 100Watts.

⁶ Aleación de Níquel-Cromo con excelente resistencia a la oxidación y carburación. Mantiene su estructura molecular estable durante la exposición a altas temperaturas.

Sistema de distribución de agua:

El módulo está compuesto por dos componentes internamente acanalados unidos a través de elementos roscados. El inferior integra un acople mecánico polimérico (PFA 420) para la conexión a través de tubería flexible entre el sistema de distribución y el banco de suministro; por otro lado se tiene el superior que conecta el sistema de distribución con el ensamble de mini canales.

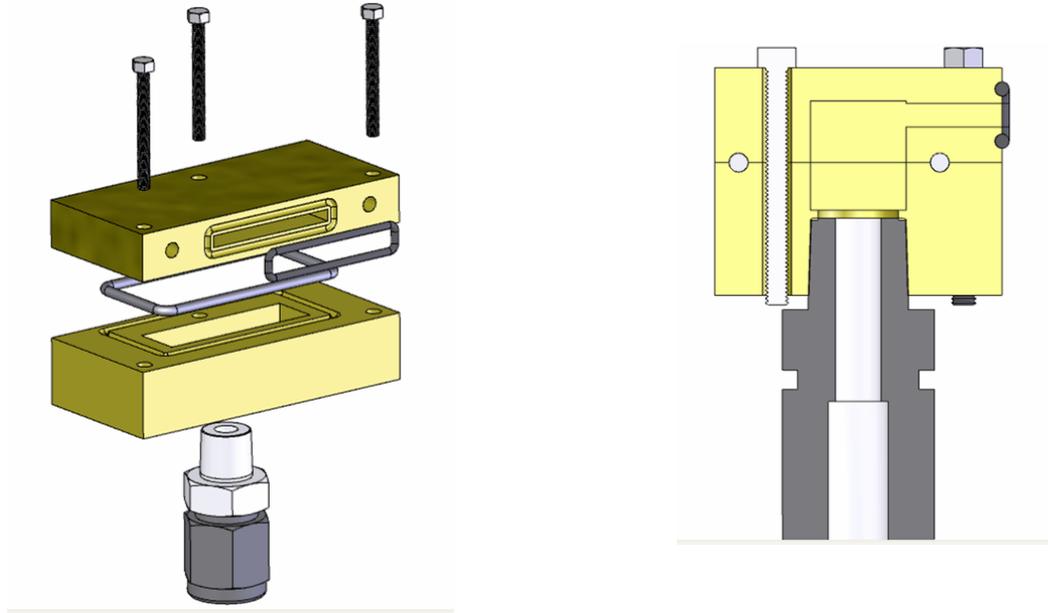
Teniendo en cuenta que uno de los factores de diseño es el número de canales contenidos en el ensamble de mini canales, este módulo se diseñó bajo el requerimiento funcional de utilizarse para distintos tipos de probetas; es decir, iguales dimensiones nominales pero distintos números de agujeros. Esto es, en su parte frontal se maquinó un agujero de sección rectangular, cuyas dimensiones se adaptaban a las probetas con pocos agujeros, así como a las de mayor cantidad de estos.

Este requerimiento a su vez disminuyó el tiempo de las corridas experimentales, pues solo se cambiaba el ensamble de mini canales entre corrida y corrida. En la figura 5 se observan los detalles mencionados.

Otro de los factores considerados para el diseño de este módulo, fue la selección del material de fabricación, dado que la pérdida de calor a través de estos dispositivos se deseaba evitar. Por esto se utilizó Baquelita como material para la fabricación. En el Anexo 6 se encuentra la ficha técnica de este material.

Adicionalmente a los requerimientos de diseño ya mencionados, se deseaba garantizar la correcta estanqueidad entre las dos secciones que componen el módulo, para esto se maquinó en el superior una ranura para un sello tipo O-ring de 2mm de diámetro. Finalmente los planos de detalle del sistema de distribución se encuentran en el Anexo 7.

Figura 5. Detalles del sistema de distribución de agua.



Ensamble de Mini canales:

Para el proceso de diseño de este módulo se consideraron primordialmente requerimientos de manufactura. Dado que solo se disponía del proceso de taladrado, resultó imperativo tener en cuenta la probeta con menor diámetro de canales a fabricar y, en este sentido, seleccionar la herramienta de corte adecuada para el proceso, en términos de parámetros como profundidad de corte y velocidad de corte.

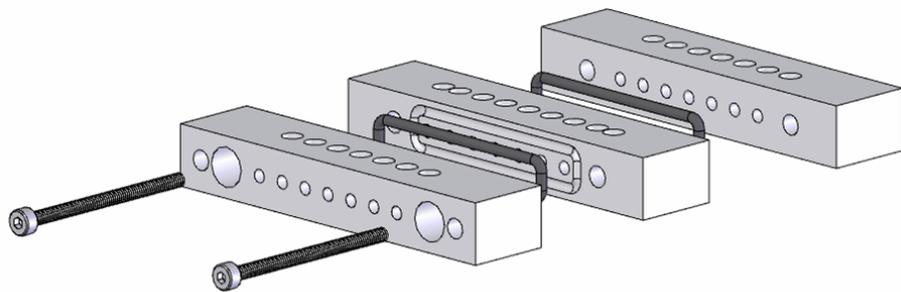
Como resultado de lo anterior el menor diámetro de canal a fabricar era de 1mm como se aprecia en la tabla 1 y con este diámetro solo se encontraron brocas con profundidad de corte de 0.5 in, lo cual no era suficiente para los 39 mm de longitud proyectados para cada canal.

La solución a la situación anterior fue seccionar las probetas en tres componentes de 13 mm de longitud como se muestra en la figura No 6. En la que se puede apreciar

cada una de las secciones y el método de sujeción utilizado para mantener la rigidez del ensamble.

Por otro lado, con la decisión de fraccionar el ensamble se presentó otra situación: la de garantizar la estanqueidad entre secciones. De manera que se maquinaron canales en cada una de las caras de la sección central para alojar un sello tipo O-ring de 1.5mm de diámetro y garantizar de este modo el sellado adecuado del ensamble.

Figura 6. Detalles del ensamble de Mini canales.

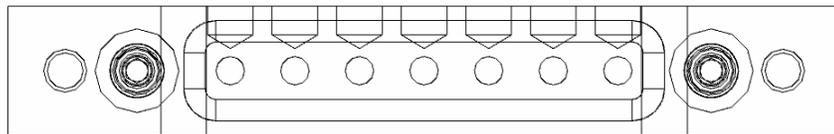


El material con el que se realizó la fabricación de este módulo fue una aleación de Aluminio 6061. El plano de detalle de este módulo así como, de cada una de sus secciones se presenta en el Anexo 8.

4.3.2 Instrumentación, sistema de control de temperatura y adquisición de datos. La instrumentación del sistema se realizó a través del posicionamiento de una serie de termopares tipo J en la parte superior del ensamble de mini canales, para lo cual se perforaron agujeros del mismo diámetro alineados con cada uno de los mini canales. En la figura 7 se indican los detalles del posicionamiento de los sensores.

Cada sensor presentaba un bulbo de 1/8 in de diámetro y 10 mm de longitud.

Figura 7. Detalles del posicionamiento de los sensores.

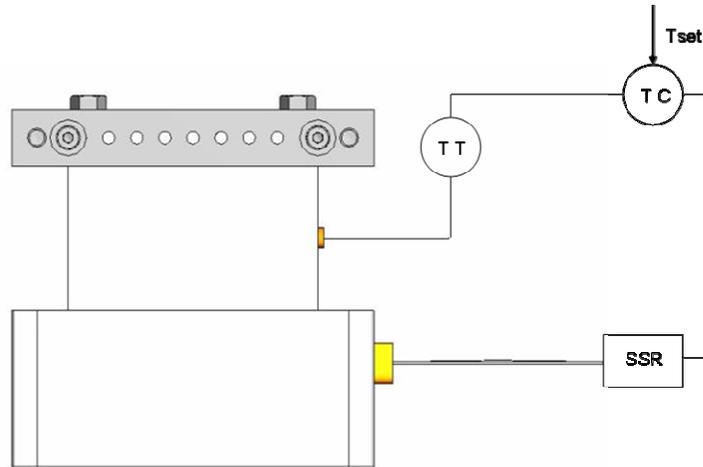


En este punto, una de las limitantes era la imposibilidad de realizar termo pozos para medir directamente la temperatura del fluido de trabajo, dado que la cercanía entre los mini canales y el tamaño de estos no lo permitió; por esto la profundidad de los agujeros para la inserción de los sensores de temperatura se efectuó lo más cerca posible de los canales pero sin llegar hasta ellos.

Teniendo en cuenta que se requería una condición de temperatura constante en la superficie inferior del ensamble de los mini canales, a partir de la fuente generadora de energía se implementó un lazo simple de control de temperatura, con el fin de controlar la temperatura en dicha superficie y, de esta forma, tener la posibilidad de realizar las pruebas bajo diferentes condiciones de temperatura constante.

En la figura 8 se ilustra esquemáticamente el lazo de control implementado

Figura 8. Lazo de control de temperatura.



En la figura 8 se observa que el controlador de temperatura (T C) recibe dos señales, la del valor deseado (set point) y la señal que sale del sensor (T T), este realiza la comparación entre estas dos señales y realiza la acción de control sobre el actuador que, en este caso es un relé de estado sólido (SSR), quien a su vez energiza o no la resistencia eléctrica de tipo cartucho insertada en el soporte.

El sistema de adquisición de datos utilizado para la recolección de las señales de temperatura superficial de cada mini canal, es un módulo Armfield[®] HT10X para adquisición de datos en sistemas de transferencia de calor. El módulo consta de una interfase a través de la cual es posible visualizar en tiempo real los datos adquiridos en un computador personal. En la figura 9 se ilustra el modulo mencionado.

Figura 9 Modulo HT10X



4.3.3 Operación del sistema de pruebas. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en seis (6) probetas de aluminio cada una con dimensiones nominales de $W=58\text{mm}$, $L=39\text{mm}$ y $e=9\text{mm}$.

En tres de las cuales se realizaron cinco mini canales ($N=5$), cada una con diámetros de canal diferente. Para las restantes se realizaron siete mini canales ($N=7$) con igual variación en diámetros.

Una corrida típica del sistema inicia con el montaje de los módulos anteriormente mencionados, principalmente el ajuste entre el ensamble de mini canales, el soporte calentador y el sistema de distribución de agua. Posteriormente se procede a la preparación y conexión de la línea de alimentación del fluido de trabajo, así como a la calibración del sensor de flujo utilizado (sensor de tipo turbina). Seguidamente se energiza el lazo de control, definiendo el valor del set point a trabajar (80°C para todas las corridas). En este punto se posicionan los sensores en la parte superior del ensamble de mini canales y, una vez se alcanza el valor de temperatura deseado, se inicia el suministro de agua a través de la probeta de pruebas utilizando un banco hidráulico Armfield ® F1-10, para este propósito. La figura 10 muestra esquemáticamente la corrida del sistema completo.

Finalmente resulta importante mencionar que, durante las corridas experimentales los mini canales de las respectivas probetas se numeraron de manera que fuese posible establecer su ubicación en el interior de cada probeta. En la figura 11 se muestra este arreglo.

Figura 10. Esquema de la operación de las corridas.

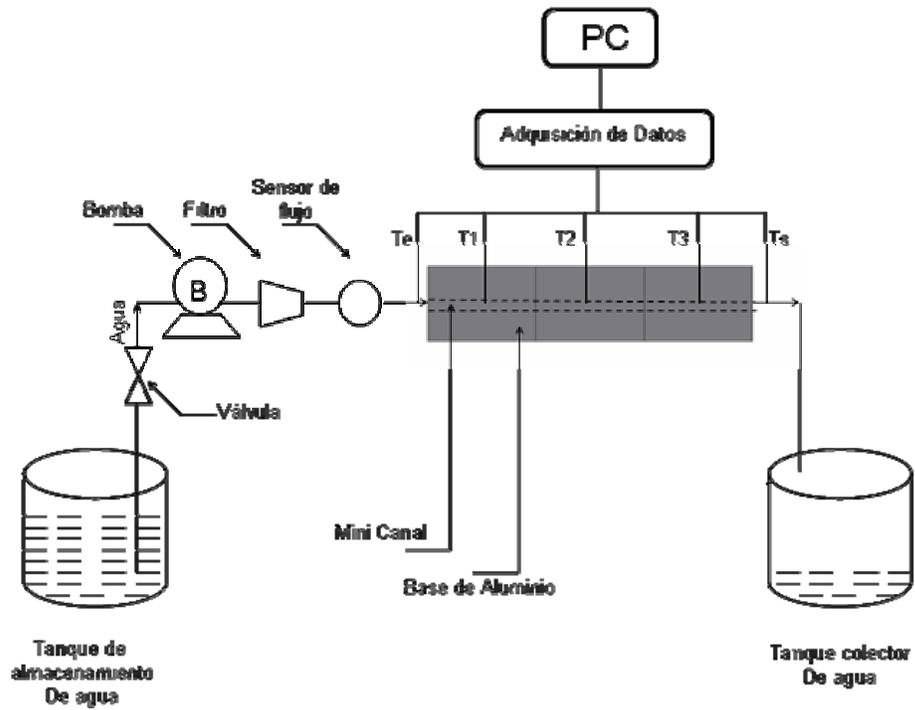
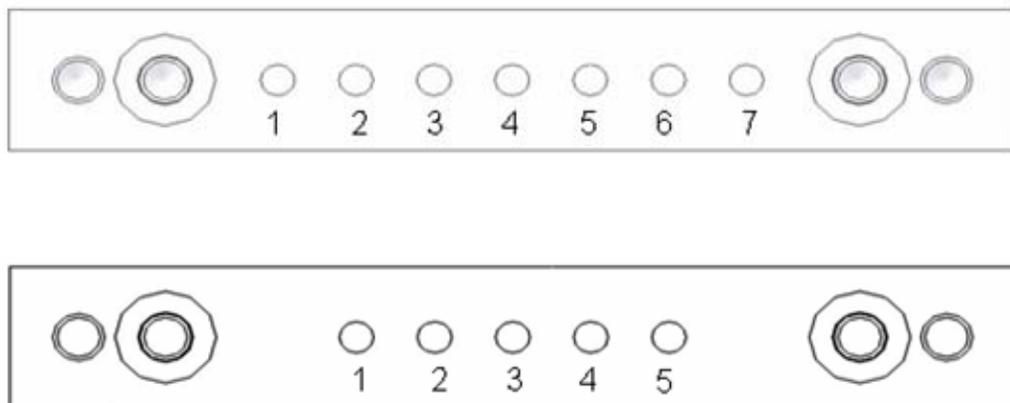


Figura 11. Orden interno de mini canales en las probetas.



4.4. TRATAMIENTO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

4.4.1. Modelación del fenómeno de transferencia de calor. Partiendo del balance energético del sistema, se tiene que la cantidad de calor total removida por el agua viene dada por:

$$Q = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad [\text{Ec. 1}]$$

Teniendo en cuenta la ley de enfriamiento de Newton, el coeficiente de transferencia de calor promedio por convección, viene dado por:

$$h = \frac{Q}{A_w \Delta T_m} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

$$A_w = N \pi D L \quad [\text{Ec. 3}]$$

Representa el área total de las paredes internas de los mini canales.

$$\Delta T_m = \frac{1}{3} (T_1 + T_2 + T_3) - \frac{1}{2} (T_e + T_s) \quad [\text{Ec. 4}]$$

Representa la diferencia media de temperatura entre las paredes de los mini canales y la mezcla de agua.

Reemplazando las ecuaciones 1 y 3 en la 2 se tiene:

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{N \pi D L \Delta T_m} \quad [\text{Ec. 5}]$$

Sabiendo que el número de Nusselt viene dado por:

$$Nu = \frac{hD}{K} \quad [\text{Ec. 6}]$$

La ecuación No 5 se puede expresar de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{N\pi KL\Delta T_m} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Analizando el término del lado derecho de la ecuación 7, es posible expresarlo en función de números adimensionales conocidos como Re y Pr.

Teniendo que, el número de Reynolds para canales circulares expresado en función del flujo masico, viene dado por:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu D} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Y que el número de Prandlt se expresa como:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Tomando como base las ecuaciones 8 y 9 para reemplazarlas en la ecuación 7, se obtiene:

$$Nu = aL_x^{-1}\Delta T^* Re^n Pr^m \quad [\text{Ec. 10}]$$

Donde:

$$a = \frac{1}{4N} \quad [\text{Ec.11}]$$

$$Lx = \frac{L}{D} \quad [\text{Ec.12}]$$

$$\Delta T^* = \frac{(T_s - T_e)}{\Delta T_m} \quad [\text{Ec.13}]$$

5. RESULTADOS.

5.1. TABULACION DE DATOS OBTENIDOS.

Tabla 3. Datos de Temperatura en tres posiciones, para probetas de cinco (5) canales.

Ch N°1--Dh= 0,26--1 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,25--2,5 lt/min					
P1	31,35	30,76	30,66	30,76	30,66	29,59	29,79	29,98	30,18	30,08	29,20	28,61	28,42	28,52	28,61	29,10	29,10	29,10	28,91	28,42
P2	31,74	31,84	31,64	31,35	31,35	30,57	30,57	30,57	31,05	30,96	29,59	29,59	29,30	29,00	29,00	29,49	29,49	29,69	29,69	29,49
P3	30,18	30,37	30,47	30,37	30,27	29,30	29,30	29,10	29,10	29,49	27,83	28,22	28,13	28,03	27,73	27,93	28,42	28,42	28,32	28,03
Ch N°2--Dh= 0,26--1 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,25--2,5 lt/min					
P1	30,76	31,05	30,96	30,57	31,05	29,10	29,69	29,49	29,69	29,49	28,42	28,13	28,32	28,22	28,81	28,91	28,81	28,13	28,13	28,22
P2	31,25	31,74	31,84	31,74	31,74	29,79	29,88	30,08	29,88	30,37	29,10	29,00	28,71	28,71	28,81	29,10	29,30	29,20	29,00	28,81
P3	29,88	29,98	30,18	30,37	29,88	28,91	28,52	28,52	28,52	28,61	28,03	27,93	27,73	27,54	27,44	28,13	28,13	27,93	27,73	27,64
Ch N°3--Dh= 0,26--1 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,25--2,5 lt/min					
P1	31,45	30,96	31,45	31,45	31,45	29,30	29,69	29,79	29,10	29,10	28,42	28,42	28,32	28,52	28,91	28,71	28,71	28,22	28,13	28,42
P2	32,23	31,74	31,84	32,13	32,32	29,79	29,98	30,47	30,37	30,27	29,49	29,20	29,10	29,10	29,10	29,39	29,39	29,10	29,00	29,3
P3	30,96	30,66	30,37	30,37	30,66	29,00	28,61	29,20	29,20	29,10	28,42	28,22	28,32	27,93	27,83	27,93	28,32	28,13	28,32	28,22
Ch N°4--Dh= 0,26--1 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,25--2,5 lt/min					
P1	31,84	32,42	32,32	32,23	31,74	29,98	30,37	29,98	29,98	29,79	29,39	29,49	29,39	29,49	29,98	29,20	29,49	29,49	29,39	29,2
P2	32,81	32,91	33,30	33,30	33,30	30,86	30,76	30,76	31,15	31,15	30,37	30,27	30,37	30,47	30,57	29,69	29,69	30,18	30,27	30,18
P3	31,74	31,64	31,64	32,03	32,13	30,08	29,59	29,88	29,98	29,98	29,49	29,39	29,39	29,20	29,10	28,61	28,61	28,61	28,61	29
Ch N°5--Dh= 0,26--1 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,25--2,5 lt/min					
P1	33,30	33,30	33,98	33,98	33,89	31,64	31,05	31,25	31,74	31,84	31,05	31,05	31,54	31,45	31,45	30,76	30,66	30,18	30,37	30,66
P2	34,77	34,67	34,67	34,86	35,25	32,62	32,71	32,42	32,52	32,71	32,13	32,32	32,42	32,32	32,81	31,74	31,84	31,84	31,35	31,35
P3	33,89	33,69	33,40	33,50	33,69	31,25	31,74	31,74	31,25	31,35	31,45	31,25	31,25	31,15	31,54	30,37	30,47	30,76	30,57	30,27
Ch N°1--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,375--2,5 lt/min					
P1	32,23	32,52	31,74	31,93	32,42	31,74	31,25	31,15	31,25	31,25	30,66	30,57	30,66	30,08	30,18	30,08	29,88	29,69	29,49	30,08
P2	32,91	32,62	32,71	32,52	32,42	31,54	31,93	31,84	31,54	31,45	30,96	31,05	30,96	30,47	30,37	30,57	30,47	29,98	29,79	30,18
P3	31,64	31,45	31,74	31,84	31,84	30,27	30,96	30,76	30,86	30,66	29,69	29,79	29,39	29,79	29,49	29,20	29,30	29,20	29,20	28,81
Ch N°2--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,375--2,5 lt/min					
P1	31,93	31,25	31,54	31,25	31,45	30,18	30,57	30,47	30,47	30,47	29,39	29,69	29,88	29,88	29,79	28,81	28,81	28,81	29,20	28,71
P2	32,52	32,71	32,52	32,42	32,03	30,76	31,05	30,96	30,66	30,96	29,59	29,88	29,88	30,08	30,18	29,20	29,20	29,20	29,20	29,2
P3	30,96	31,35	31,54	31,45	31,35	29,59	29,79	30,08	29,79	30,08	29,10	28,61	28,81	28,71	29,20	28,61	28,71	28,22	28,22	28,32
Ch N°3--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,375--2,5 lt/min					
P1	32,03	31,45	31,64	31,35	31,54	30,08	30,27	30,57	30,47	30,08	29,59	29,10	29,10	29,20	29,39	29,10	28,91	29,10	29,20	29,1
P2	32,52	32,42	32,81	32,81	32,81	31,05	30,96	31,25	31,35	31,45	30,27	30,18	30,08	29,79	29,79	29,69	29,59	29,59	29,30	29,79
P3	31,15	31,35	31,25	31,54	31,64	30,18	30,08	30,37	29,79	29,88	29,39	29,30	29,30	29,20	28,91	28,42	28,91	28,32	28,42	28,81
Ch N°4--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,375--2,5 lt/min					
P1	31,54	31,74	31,93	31,93	31,54	30,86	30,86	30,76	30,47	30,96	30,27	29,88	30,27	29,59	29,49	29,10	29,20	29,39	29,10	29,39
P2	32,81	33,01	33,11	33,40	33,50	32,23	32,42	32,32	31,74	32,23	30,96	31,05	31,05	30,96	30,86	30,27	29,88	30,08	30,47	30,57
P3	31,84	31,54	31,54	31,64	32,13	30,47	30,47	30,66	30,66	30,37	29,49	29,98	29,49	29,79	29,88	29,39	29,00	28,91	29,39	29
Ch N°5--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,375--2,5 lt/min					
P1	33,11	33,01	33,01	32,62	33,11	31,93	31,54	32,03	32,23	32,13	31,05	30,66	30,66	30,76	30,76	30,37	29,98	30,27	30,08	30,57
P2	34,57	34,96	35,16	35,06	35,16	33,98	33,89	33,98	33,50	33,98	32,81	32,71	32,23	32,23	32,32	32,13	31,74	32,03	31,54	31,64
P3	32,91	33,01	33,50	33,40	33,01	32,13	32,23	32,13	31,74	31,84	31,15	31,25	31,05	30,86	30,66	30,47	30,47	30,47	30,47	30,08
Ch N°1--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,5--2,5 lt/min					
P1	31,54	31,64	31,84	31,64	31,35	29,98	30,18	30,18	30,66	30,37	29,88	29,59	29,30	29,69	29,88	28,52	28,71	28,91	28,81	28,61
P2	34,96	34,86	34,96	35,55	35,35	34,18	33,79	33,69	33,69	34,28	33,11	33,20	32,71	32,71	33,01	32,13	31,93	32,03	32,42	32,13
P3	31,35	31,35	31,35	31,25	31,74	30,37	30,57	29,98	29,98	30,27	29,30	29,30	29,59	29,10	29,20	29,10	29,00	28,52	29,00	29,1
Ch N°2--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,5--2,5 lt/min					
P1	31,15	31,64	31,25	31,05	31,25	29,69	29,88	30,27	30,18	30,18	29,30	29,49	28,91	29,10	29,49	28,32	28,42	28,52	28,91	28,61
P2	34,57	34,96	35,16	34,77	34,67	33,79	33,30	33,40	33,89	33,89	32,81	32,32	32,52	32,32	32,32	32,03	31,74	31,54	31,74	32,23
P3	31,15	31,05	31,54	31,64	31,35	30,18	29,88	29,59	29,69	30,08	28,91	28,91	29,30	29,20	28,81	28,81	28,61	28,42	28,13	28,61
Ch N°3--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,5--2,5 lt/min					
P1	31,93	31,84	31,54	31,64	32,13	30,27	30,18	30,37	30,57	30,66	29,49	29,00	29,20	29,49	29,10	28,42	28,52	28,81	29,00	28,81
P2	35,74	35,74	35,74	35,35	35,35	34,47	34,28	33,89	33,98	34,28	33,11	33,11	32,62	32,81	32,81	31,93	31,74	31,93	31,74	32,32
P3	31,45	31,93	32,03	31,74	31,35	30,66	30,47	30,66	29,98	30,08	29,10	29,59	29,39	28,91	29,39	28,81	28,61	28,42	28,22	28,22
Ch N°4--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,5--2,5 lt/min					
P1	32,52	32,13	32,52	32,42	32,71	31,05	31,15	31,45	31,25	31,25	29,79	30,18	29,79	29,69	29,98	29,59	29,59	29,30	29,00	29,2
P2	36,91	36,91	36,43	36,33	36,62	34,96	34,96	34,96	35,25	35,45	33,30	33,40	33,89	33,30	33,79	33,01	33,30	33,30	33,20	32,81
P3	32,42	32,62	32,52	32,03	32,03	31,15	30,86	30,76	30,66	30,96	29,69	29,39	29,98	29,98	29,39	28,81	28,91	29,30	29,30	29,3
Ch N°5--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,5--2,5 lt/min					
P1	34,08	33,79	33,40	33,50	33,69	32,23	32,03	32,23	32,13	32,62	31,05	30,96	31,45	31,25	31,05	30,18	30,08	30,08	30,27	30,66
P2	38,18	38,57	38,48	38,28	37,99	37,11	37,21	36,82	36,62	36,82	35,16	35,84	35,25	35,74	35,16	34,86	34,77	34,38	34,28	34,38
P3	33,30	33,50	33,79	33,69	33,69	32,23	32,42	32,32	31,93	31,74	31,05	31,15	30,57	30,76	30,86	30,37	30,47	30,37	29,88	29,79

Tabla 4. Datos de Temperatura en tres posiciones, para probetas de siete (7) canales.

	Ch N°1--Dh= 0,25--1 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,25--2,5 lt/min				
P1	33,50	33,50	33,40	33,30	32,42	32,91	33,30	33,20	32,62	32,62	32,23	31,74	31,93	32,13	32,52	30,96	31,05	31,54	31,64	31,7
P2	24,41	24,51	24,41	24,41	24,41	27,93	27,93	27,83	27,83	27,83	27,05	27,05	27,05	27,15	27,05	27,54	27,64	27,54	27,64	27,6
P3	32,13	32,23	32,42	32,03	32,71	32,32	31,93	31,93	32,52	31,74	32,03	32,03	31,84	31,15	31,15	31,05	31,25	30,66	30,76	30,5
	Ch N°2--Dh= 0,25--1 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,25--2,5 lt/min				
P1	32,13	32,52	32,81	32,71	32,62	31,74	31,35	31,45	31,54	31,64	30,96	30,86	30,86	31,25	31,45	30,86	30,47	30,66	30,96	30,3
P2	31,93	31,93	31,93	32,32	32,42	31,35	30,86	30,96	30,96	31,05	30,57	30,47	30,37	30,86	30,66	30,66	30,57	30,57	30,66	30,2
P3	31,84	31,35	31,54	31,54	31,74	30,96	31,25	31,15	30,96	30,76	30,76	30,66	30,37	30,86	30,37	30,47	30,47	30,27	29,98	30,4
	Ch N°3--Dh= 0,25--1 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,25--2,5 lt/min				
P1	32,23	32,42	33,01	32,91	32,81	31,74	31,64	31,64	31,45	31,25	30,76	30,86	30,76	30,86	31,25	30,76	30,76	30,37	30,37	30,6
P2	32,23	32,23	32,23	32,62	32,91	31,64	31,64	31,64	31,54	31,45	30,96	30,96	30,96	30,57	30,96	30,76	30,66	30,66	30,27	30,2
P3	32,03	31,74	31,54	31,64	31,93	30,96	31,25	31,25	31,25	31,15	30,86	30,76	30,66	30,66	30,27	29,98	30,37	30,37	30,27	30
	Ch N°4--Dh= 0,25--1 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,25--2,5 lt/min				
P1	32,52	32,62	32,71	32,52	33,40	31,64	31,35	31,35	31,45	31,45	30,86	30,96	31,15	31,45	31,54	30,66	31,05	30,96	30,96	30,6
P2	32,81	32,81	32,71	32,62	32,62	31,64	31,54	31,25	31,35	31,15	30,96	30,76	31,05	30,76	30,96	30,37	30,66	30,66	30,76	30,5
P3	32,32	32,32	31,93	32,32	31,84	31,25	31,25	31,15	31,25	30,96	30,86	30,66	30,96	30,47	30,47	30,08	29,98	29,98	30,57	30,4
	Ch N°5--Dh= 0,25--1 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,25--2,5 lt/min				
P1	33,69	33,69	33,59	33,01	33,20	31,84	31,84	32,13	31,84	32,23	31,35	31,84	31,45	31,74	31,25	30,66	30,76	30,76	30,96	31,3
P2	33,30	33,40	33,59	33,11	33,40	31,54	31,64	31,84	31,64	31,93	31,05	31,35	31,45	31,15	31,05	30,96	30,76	30,57	30,66	30,8
P3	32,32	32,62	32,62	32,81	33,01	31,74	31,25	31,25	31,45	31,25	30,76	30,76	31,25	30,66	30,86	30,66	30,76	30,66	30,27	30,4
	Ch N°6--Dh= 0,25--1 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,25--2,5 lt/min				
P1	33,59	33,69	34,18	34,18	34,28	32,23	32,13	32,23	32,42	32,81	32,23	32,13	32,03	31,64	31,74	31,25	30,96	31,64	31,25	31,1
P2	33,98	33,89	34,18	34,08	34,38	32,52	32,62	32,32	32,32	32,42	31,74	32,32	32,23	32,03	31,74	31,35	31,35	31,64	31,25	31,5
P3	33,50	33,11	33,11	33,11	33,20	32,32	32,23	32,03	32,13	31,93	31,35	31,54	31,84	31,74	31,74	30,76	31,15	30,66	30,66	31,3
	Ch N°7--Dh= 0,25--1 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,25--1,5 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,25--2,0 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,25--2,5 lt/min				
P1	34,57	34,38	34,47	35,25	35,25	33,79	33,59	32,81	32,91	32,81	32,91	32,42	32,23	32,71	33,20	32,13	32,03	31,54	31,54	31,8
P2	32,23	31,93	31,84	31,74	31,54	31,25	31,05	30,86	30,76	30,66	30,27	30,37	30,27	30,08	30,08	30,76	30,66	30,66	30,57	30,5
P3	34,77	34,77	34,38	34,57	33,98	32,71	33,30	33,40	33,30	33,40	32,42	32,71	32,52	31,93	32,03	31,84	32,03	31,93	31,93	31,3
	Ch N°1--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,375--2,5 lt/min				
P1	33,40	33,69	34,08	34,28	33,30	31,15	31,25	31,45	31,93	31,74	31,15	31,15	31,05	31,05	31,05	30,47	30,47	30,47	30,08	29,9
P2	26,07	25,98	26,07	26,07	26,07	25,00	25,00	25,00	24,90	25,00	25,20	25,10	25,29	25,20	25,10	24,02	23,93	23,93	23,93	23,9
P3	34,67	34,77	34,18	33,89	34,47	32,13	32,03	31,64	31,35	31,64	30,47	30,37	30,57	30,57	30,96	29,98	30,08	30,37	30,66	30,7
	Ch N°2--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,375--2,5 lt/min				
P1	33,98	33,59	33,69	33,69	34,18	31,54	31,45	30,86	30,96	31,25	30,37	29,79	29,88	29,88	30,47	29,88	29,49	29,30	29,30	29,3
P2	35,94	36,04	35,64	36,13	36,23	32,71	32,52	32,62	32,23	32,23	31,35	31,45	31,25	30,96	31,05	30,76	30,86	30,66	30,47	30,3
P3	34,18	34,67	34,57	34,67	34,18	31,25	31,64	31,74	31,54	31,25	30,47	30,66	30,66	30,47	29,98	29,98	30,08	29,98	29,98	29,9
	Ch N°3--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,375--2,5 lt/min				
P1	34,28	33,89	33,98	34,28	34,67	31,35	31,74	31,64	31,54	30,96	29,79	29,88	29,98	29,79	30,47	29,59	29,98	29,88	29,98	29,6
P2	36,72	36,43	36,23	36,23	36,43	32,62	32,71	32,91	33,01	32,81	31,35	31,15	30,96	31,54	31,15	30,37	30,37	30,66	30,76	30,8
P3	34,77	34,86	34,77	34,47	34,38	31,35	31,05	31,25	31,93	31,74	30,47	30,47	30,47	30,57	29,98	29,59	29,39	29,49	29,59	29,8
	Ch N°4--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,375--2,5 lt/min				
P1	34,96	34,86	34,86	35,06	34,57	31,93	31,54	31,25	31,45	32,03	31,15	31,25	31,15	30,86	30,57	30,27	30,37	30,18	30,18	29,8
P2	37,50	37,40	37,60	37,50	37,01	33,40	33,40	32,91	32,91	33,01	31,93	32,13	32,13	32,03	32,23	30,96	30,86	31,05	30,86	30,7
P3	35,06	35,35	35,55	34,96	35,25	31,64	32,03	31,93	31,84	31,45	30,47	30,57	30,57	30,86	30,96	29,69	29,69	29,88	29,59	30,9
	Ch N°5--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,375--2,5 lt/min				
P1	35,55	35,74	35,74	35,74	35,45	32,03	32,62	32,52	32,71	32,32	31,74	31,45	31,05	30,96	31,15	30,76	30,27	30,37	30,37	30,7
P2	38,09	38,28	38,28	38,67	38,57	33,89	34,38	33,89	34,47	34,38	32,71	32,52	32,42	32,71	32,81	32,03	31,45	31,45	31,64	31,5
P3	35,94	35,84	36,04	36,33	36,43	32,71	32,23	32,13	32,23	32,81	31,05	31,05	31,35	31,54	31,74	30,37	30,66	30,86	30,37	30,2
	Ch N°6--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,375--2,5 lt/min				
P1	37,11	37,11	36,62	36,62	36,82	33,20	33,01	33,59	33,11	33,01	32,03	32,62	31,93	32,71	32,03	31,64	31,74	31,35	31,15	31,3
P2	40,04	40,04	39,84	39,55	40,04	35,55	35,55	35,55	35,16	35,45	33,98	34,18	33,89	33,98	33,79	33,20	33,20	33,11	32,91	32,6
P3	37,30	37,70	37,70	37,70	37,70	33,69	33,69	33,20	33,40	33,69	32,52	32,03	32,03	31,93	32,13	31,35	31,64	31,74	31,64	31,3
	Ch N°7--Dh= 0,375--1 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,375--1,5 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,375--2,0 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,375--2,5 lt/min				
P1	36,72	36,52	36,52	36,82	36,91	33,40	34,08	33,89	33,20	33,20	32,42	32,42	33,01	33,30	33,30	31,45	31,54	31,35	31,64	32,2
P2	34,28	33,98	33,79	33,69	33,50	30,57	30,18	30,18	29,98	29,79	32,13	32,03	31,54	31,45	31,15	31,25	31,15	30,96	30,96	30,8
P3	37,89	37,89	37,70	37,79	37,40	33,20	33,50	33,40	33,89	34,18	32,91	32,62	32,13	32,32	32,42	32,13	31,93	32,03	31,35	31,4

	Ch N°1--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°1--Dh= 0,5--2,5 lt/min				
P1	33,01	32,23	32,81	32,81	32,3	32,23	32,13	31,93	31,93	31,05	31,05	30,76	31,25	31,25	30,76	31,15	31,15	30,96	30,66	30,27
P2	26,66	26,66	26,66	26,66	26,7	26,37	26,37	26,46	26,37	26,37	25,00	24,90	24,80	24,80	24,80	25,49	25,39	25,49	25,39	25,39
P3	31,54	32,32	31,64	31,84	32,2	30,37	30,47	30,57	30,57	31,15	30,27	29,98	29,88	29,98	30,57	29,79	29,98	29,79	30,27	30,47
	Ch N°2--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°2--Dh= 0,5--2,5 lt/min				
P1	31,93	32,03	31,64	31,45	31,74	30,96	30,96	30,57	30,47	30,96	29,98	29,98	29,98	30,08	29,88	29,79	30,18	30,18	30,18	30,18
P2	33,60	33,20	33,11	33,11	33,20	32,13	32,03	32,03	32,03	32,13	30,86	31,05	30,47	30,47	30,96	30,27	30,27	30,37	30,76	30,76
P3	31,15	31,25	31,25	31,15	31,25	30,18	30,27	30,47	30,37	29,88	30,08	29,98	29,88	29,69	29,98	29,00	29,20	29,10	29,30	29,39
	Ch N°3--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°3--Dh= 0,5--2,5 lt/min				
P1	31,35	31,25	31,35	31,64	31,93	30,96	30,86	30,86	30,76	30,66	29,98	30,27	30,57	30,57	30,47	29,59	29,39	29,49	29,69	30,08
P2	32,91	32,62	32,62	32,52	32,81	31,45	31,54	31,64	31,93	31,84	30,76	30,66	30,86	30,96	31,25	30,66	30,57	30,66	30,18	30,47
P3	31,15	30,96	30,96	30,66	30,66	29,59	29,69	29,79	29,79	30,08	29,79	29,49	29,39	29,59	29,69	29,49	29,49	29,59	29,30	29,00
	Ch N°4--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°4--Dh= 0,5--2,5 lt/min				
P1	31,93	31,74	31,35	31,25	31,54	30,86	30,57	30,47	30,37	30,37	30,57	29,98	30,18	30,57	30,57	30,18	30,08	30,08	29,88	29,59
P2	32,81	33,01	32,91	32,52	32,52	31,93	32,13	31,93	31,54	31,54	31,35	31,05	30,86	30,96	31,45	30,86	30,66	30,76	30,66	30,37
P3	30,57	30,57	30,96	30,86	30,47	30,08	30,18	30,27	30,08	30,18	30,08	29,98	29,88	29,49	29,69	29,00	29,10	29,10	29,49	29,39
	Ch N°5--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°5--Dh= 0,5--2,5 lt/min				
P1	31,84	31,84	32,42	32,13	32,32	30,76	30,86	31,25	31,25	30,96	30,76	30,76	30,96	30,76	30,27	30,47	29,98	30,47	30,18	30,57
P2	33,01	32,91	33,40	33,11	33,11	31,93	31,84	32,03	32,32	32,42	31,35	31,45	31,45	31,84	31,64	31,25	31,05	31,05	30,76	30,96
P3	31,35	31,15	31,15	30,96	30,96	30,47	30,37	30,08	30,08	30,37	29,88	29,88	29,88	30,08	30,37	29,98	29,88	29,49	29,39	29,39
	Ch N°6--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°6--Dh= 0,5--2,5 lt/min				
P1	33,01	33,20	33,20	33,11	32,81	31,84	32,03	32,32	32,13	32,13	30,96	31,05	31,45	31,64	31,25	30,66	30,66	30,66	30,66	31,15
P2	33,98	34,28	34,38	34,67	34,08	33,01	33,11	33,20	33,11	33,50	32,42	32,03	32,03	32,62	32,52	31,64	31,45	31,45	31,64	32,13
P3	31,84	31,84	31,84	32,13	32,03	31,15	30,96	31,05	30,96	31,35	30,96	30,86	30,57	30,76	31,05	30,47	30,47	30,47	30,08	30,27
	Ch N°7--Dh= 0,5--1 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,5--1,5 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,5--2,0 lt/min					Ch N°7--Dh= 0,5--2,5 lt/min				
P1	33,40	33,01	33,30	34,18	33,89	32,13	32,23	32,03	32,91	32,62	31,54	31,45	31,54	31,74	31,54	31,05	31,35	31,74	32,03	31,45
P2	33,69	33,40	33,20	33,11	32,71	31,45	31,35	31,15	31,05	30,96	31,74	31,64	31,35	31,35	31,15	31,64	31,45	31,35	31,25	31,25
P3	33,01	33,01	32,62	32,42	32,71	32,13	31,54	32,03	31,64	32,13	31,84	31,74	31,74	31,15	31,64	31,35	31,15	30,47	30,66	31,35

Para el experimento se realizó una replica, de manera que en la tabla 3 se observan dos valores de la variable de respuesta en cada posición.

Tabla 5. Datos de Numero de Nusselt Global.



A continuación se muestran en la tabla 4, los resultados del análisis de varianza para los datos del proceso de transferencia de calor en mini canales.

Tabla 6. Análisis de varianza del experimento.

Analysis of Variance for Nu						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
A:Diámetro Canal	2670.97	1	2670.97	19.34	0.0000	
B:Flujo Vol	20245.6	1	20245.6	146.59	0.0000	
C:NoCanales	10318.3	1	10318.3	74.71	0.0000	
D:canal	6448.78	1	6448.78	46.69	0.0000	
AA	13.6547	1	13.6547	0.10	0.7538	
AB	279.029	1	279.029	2.02	0.1579	
AC	12882.3	1	12882.3	93.28	0.0000	
AD	78.2119	1	78.2119	0.57	0.4533	
BB	804.999	1	804.999	5.83	0.0173	
BC	6369.65	1	6369.65	46.12	0.0000	
BD	7289.26	1	7289.26	52.78	0.0000	
CD	7.17227	1	7.17227	0.05	0.8201	
DD	1985.24	1	1985.24	14.37	0.0002	
AAE	560.464	1	560.464	4.06	0.0463	
AAC	406.719	1	406.719	2.94	0.0888	
AAD	101.806	1	101.806	0.74	0.3923	
ABB	131.625	1	131.625	0.95	0.3310	
ABC	3420.75	1	3420.75	24.77	0.0000	
ABD	6.67301	1	6.67301	0.05	0.8264	
ACD	2640.03	1	2640.03	19.12	0.0000	
ADD	1175.58	1	1175.58	8.51	0.0042	
BBB	265.004	1	265.004	1.92	0.1686	
BBC	0.432306	1	0.432306	0.00	0.9555	
BBD	25.3998	1	25.3998	0.18	0.6688	
BCD	0.413013	1	0.413013	0.00	0.9565	
BDD	1100.44	1	1100.44	7.97	0.0056	
CDD	10338.0	1	10338.0	74.85	0.0000	
Total error	16020.7	116	138.109			
Total (corr.)	313707.0	143				

La tabla corresponde a la salida del programa StatGraphics Plus 5.1[®] y muestra los efectos principales, las interacciones de segundo orden, así como las de tercer orden presentes en el modelo.

Resultados en gris se observan los efectos cuyo p-value es menor al valor especificado para la significancia ($\alpha=0.05$), es posible observar que los efectos principales son significativos, así como, algunas interacciones de segundo y tercer orden.

Teniendo en cuenta que no todas las interacciones son significativas en el modelo, se presenta a continuación la tabla anova definitiva en la tabla 5

Cabe destacar que el valor R^2 ajustado, ubicado en la parte inferior de dicha tabla, es de 0.9344, esto indica que el 93% de la variabilidad del número de Nusselt es debida al número de canales, el diámetro de estos, el flujo volumétrico y la ubicación de los canales, así como de las interacciones de segundo y tercer orden que resultaron significativas.

Tabla 7. Análisis de varianza definitivo.

Analysis of Variance for Nu						
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value	
A:Diámetro Canal	3075,24	1	3075,24	21,38	0,0000	
B:Flujo Vol	80656,8	1	80656,8	560,65	0,0000	
C:NoCanales	27632,2	1	27632,2	192,07	0,0000	
D:canal	26752,1	1	26752,1	185,95	0,0000	
AC	12882,3	1	12882,3	89,54	0,0000	
BC	6369,65	1	6369,65	44,28	0,0000	
BD	7289,26	1	7289,26	50,67	0,0000	
DD	1985,24	1	1985,24	13,80	0,0003	
ABC	3420,75	1	3420,75	23,78	0,0000	
ACD	2640,03	1	2640,03	18,35	0,0000	
ADD	1175,58	1	1175,58	8,17	0,0050	
BDD	1100,44	1	1100,44	7,65	0,0065	
CDD	10338,0	1	10338,0	71,86	0,0000	
Total error	18702,3	130	143,864			

Total (corr.)	313707,0	143				
R-squared = 94,0000 percent						
R-squared (adjusted for d.f.) = 93,4421 percent						
Standard Error of Est. = 11,9943						
Mean absolute error = 8,34551						
Durbin-Watson statistic = 2,18674 (P=0,1320)						
Lag 1 residual autocorrelation = -0,0939995						

Como resultado del diseño experimental se presentan en la tabla 6 los valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal obtenidos para este análisis.

Tabla No 8. Valores de Coeficientes de regresión.

Regression coeffs. for Nu	
constant	= -393.275
A:Diámetro Canal	= 75.526
B:Flujo Vol	= 353.31
C:NoCanales	= 58.5773
D:canal	= 167.058
AB	= -128.139
AC	= -14.2057
BC	= -43.9321
BD	= -7.79383
CD	= -26.9609
DD	= -26.9609
CDD	= 4.49349
ABC	= 21.3565

La expresión completa se presenta a continuación:

$$Nu = -393.27 + 75.52A + 353.31B + 58.57C + 167.05D - 128.13AB - 14.20AC - 43.93BC - 7.79BD - 26.96CD + 4.49CD^2 + 21.35ABC$$

5.2. RESULTADOS ADIMENSIONALES.

Como resultado del proceso de experimentación realizado, se presenta una correlación para la determinación del número de Nusselt promedio del proceso de enfriamiento en mini canales de sección circular, utilizando agua como fluido de trabajo.

$$\overline{Nu} = aP_M^l Re^m Pr^n$$

Donde:

$$a = \frac{T_s - T_e}{4L} = 28.08$$

$$P_M = \frac{D}{N\Delta T_m}$$

$$l = 0.9997$$

$$m = 0.9982$$

$$n = 1.0081$$

Valida para:

$$3000 \leq Re \leq 15000 ; 5 \leq Pr \leq 6$$

Los coeficientes de la correlación han sido ajustados con un valor de R^2 ajustado de 0.991 a través del método de mínimos cuadrados para expresiones no lineales.

El desarrollo fue realizado en el programa Matlab 6.0, utilizando el algoritmo de Gauss-Newton con modificaciones de Levenberg-Marquardt para la convergencia global.

6. ANALISIS DE RESULTADOS.

6.1. DESARROLLO Y VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS DEL EXPERIMENTO FACTORIAL.

Durante el proceso de recolección de datos se consideró un factor que puede tener cierto efecto sobre la variable de respuesta, sin embargo, su nivel se mantuvo constante y es:

- La temperatura ambiente del recinto donde se corrieron las pruebas.

Como factor no controlable o de ruido se tienen las variaciones de voltaje de la red de suministro de energía eléctrica local, las cuales originaron ligeros cambios en la velocidad de operación de motor eléctrico impulsor de la bomba, llevando esto a pequeñas variaciones de flujo volumétrico.

De la misma forma la humedad relativa del recinto donde se corrieron las pruebas se consideró un factor de ruido.

De acuerdo con lo mencionado en la sección 4.2, se presentan a continuación el desarrollo y los resultados del experimento factorial multinivel.

Para iniciar con el desarrollo del experimento factorial se verificarán los supuestos que se tuvieron en cuenta para plantear el modelo expresado en la Ecuación 1.

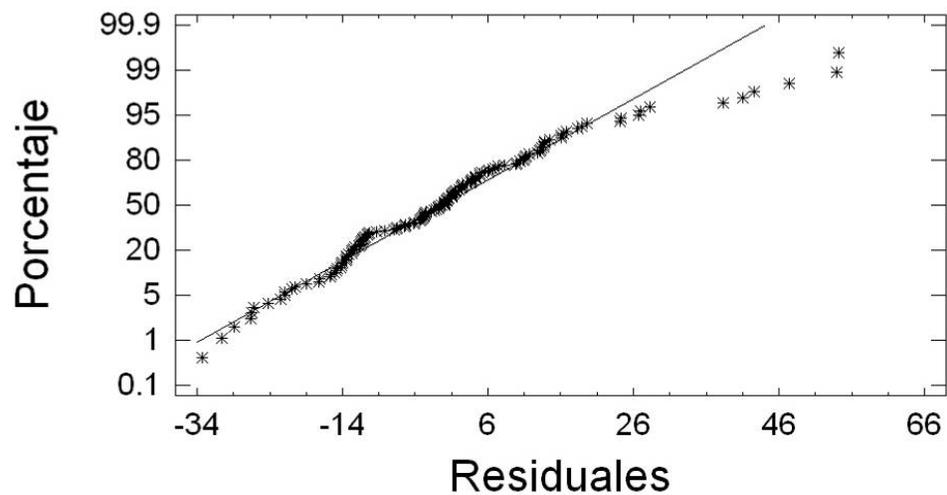
Teniendo en cuenta lo anterior, una práctica común para verificar el supuesto de normalidad de los errores, es construir una gráfica de probabilidad normal de los residuales⁷, esta gráfica tendrá la apariencia de una línea recta si el supuesto es adecuado.

⁷ Diferencia entre el valor de la observación correspondiente y una estimación de la observación.

En la figura 12 se muestra la gráfica de probabilidad normal de los residuales del experimento, en esta se observa un ligero sesgo, con cola derecha siendo mas larga y pronunciada que la izquierda, debido a la presencia de cinco observaciones alejadas asociadas con residuales de valor absoluto mayor que los demás.

Este hecho llevó al calculo de los residuales estandarizados⁸ (RE) para determinar sí en realidad estos puntos eran representativos del modelo o puntos atípicos. En la Tabla 7, se presentan los resultados para los cinco (5) puntos ubicados en el extremo de la cola derecha de la figura 12.

Figura 12. Gráfica de probabilidad normal de los residuales.



⁸ Cerca del 68% de los RE deberán estar incluidos dentro de los límites ± 1 , cerca del 95% de ellos deberán estar incluidos dentro de ± 2 y virtualmente todos ellos deberán estar incluidos dentro de ± 3 . Un residual mayor de 3 o 4 es un punto atípico potencial, de acuerdo con [12].

Tabla 9. Resultados de residuales estandarizados.

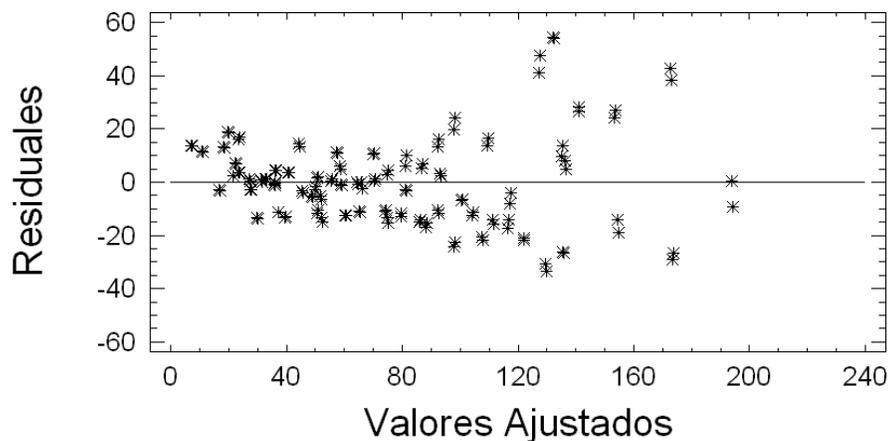
Residual	Residual Estandarizado	Identificación de la Corrida
54.21	3.58	D=1.5 - f=2.5 - N=7 - CH=1
53.88	3.56	D=1.5 - f=2.5 - N=7 - CH=1
47.38	3.02	D=1 - f=2 - N=5 - CH=3
42.57	2.76	D=1 - f=2.5 - N=5 - CH=3
41.01	2.59	D=1 - f=2 - N=5 - CH=3

En esta se observa que existen tres puntos que se pueden considerar como atípicos, de los cuales, dos presentan iguales valores en los niveles de los factores y el otro corresponde a otra combinación de niveles.

Con base en lo anterior, la gráfica de probabilidad normal de los residuales quedaría sin los tres puntos más externos en su cola derecha, garantizando adecuadamente el supuesto de normalidad.

Una verificación de la validez del modelo y los supuestos, es que los residuales no deberán estar relacionados con ninguna otra variable, incluyendo la respuesta predicha, esto es, está gráfica no debe presentar ningún patrón obvio. En la figura 13 se presenta la gráfica de los residuales contra los valores ajustados.

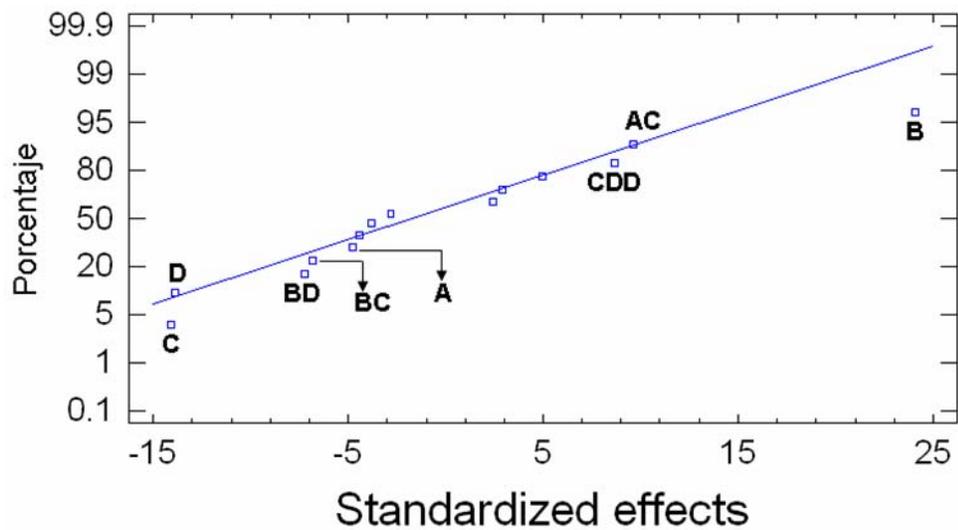
Figura 13. Grafica de los residuales contra valores ajustados.



En ella es posible observar que no existe ningún patrón obvio que comprometa el modelo y sus supuestos. Por otro lado, no se encuentran indicios de problemas de varianza no constante, dado que, los residuales no se hacen mayores conforme los valores ajustados se incrementan.

La gráfica de probabilidad normal de los efectos se aprecia en la figura 14 y en ella, es posible advertir con toda seguridad que el factor con mayor efecto sobre el número de Nusselt es el flujo volumétrico identificado con la letra B, seguido del número de canales realizados en la probeta (C).

Figura 14. Grafica de probabilidad normal de los efectos.



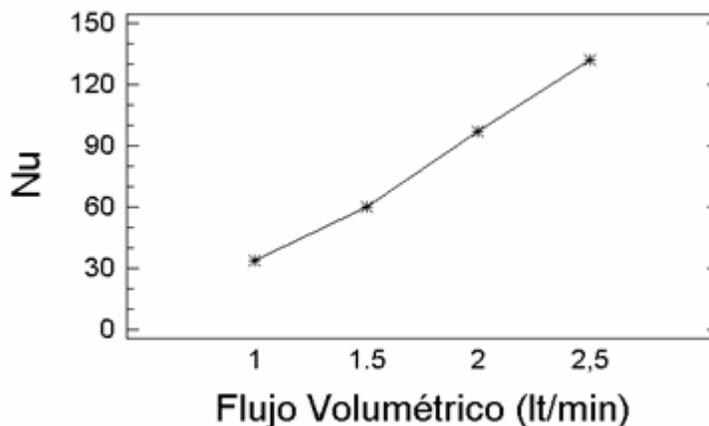
6.2. INTERPRETACIÓN DE EFECTOS ACTIVOS EN EXPERIMENTO FACTORIAL.

Se entiende por efecto, el cambio promedio en la variable de respuesta producido por un cambio en el nivel del factor estudiado.

Teniendo en cuenta la definición anterior se presentan a continuación las gráficas de los efectos principales del experimento, las cuales brindan una representación visual de los valores presentados en la figura 14.

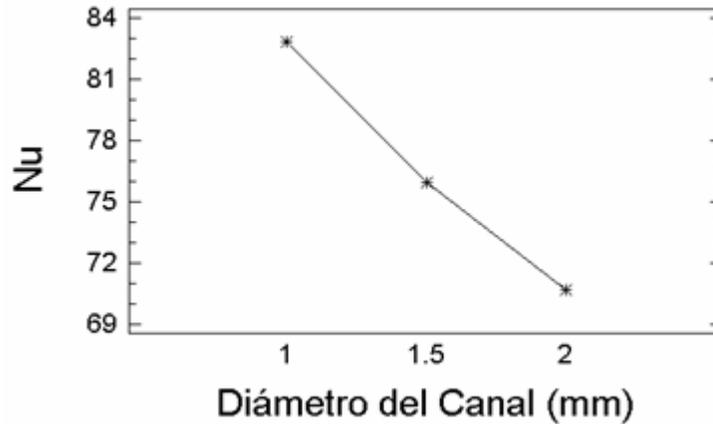
En la figura 15 se muestra el efecto del flujo volumétrico sobre el número de Nusselt promedio. En esta gráfica se observa que el efecto es positivo, es decir, el incremento del flujo volumétrico trae como consecuencia el aumento de Nu, lo cual coincide con la teoría del mecanismo de transferencia de calor por convección.

Figura 15. Efecto del Flujo Volumétrico.



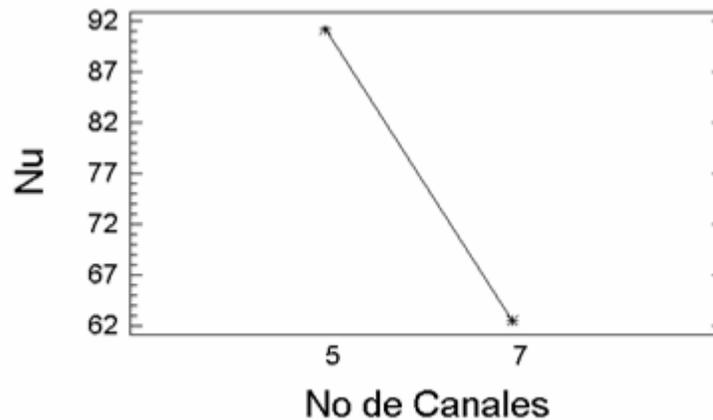
En la figura 16 se muestra el efecto que tiene el diámetro de los canales sobre Nu y a simple vista se observa que el número de Nusselt promedio disminuye con el incremento en el valor del diámetro de los mini canales; sin embargo, es importante destacar que el orden de magnitud del decremento para este factor (identificado con la letra mayúscula A en el análisis de varianza) no es comparable con el presentado por el flujo volumétrico a pesar de su significancia.

Figura 16. Efecto del Diámetro de los canales.



De otro lado, en la figura 17, se ilustra gráficamente el efecto que presenta sobre el número de Nusselt promedio, el número de canales realizados en la probeta de pruebas. Se observa que el efecto presenta pendiente negativa, originando esto, un decremento de Nu cuando el número de canales se incrementa de 5 a 7.

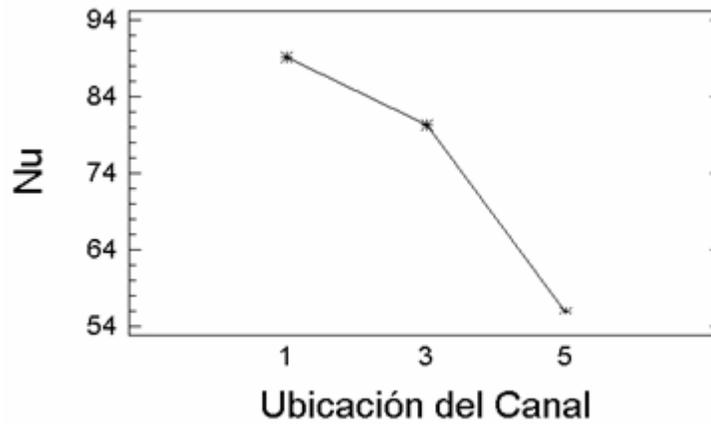
Figura 17. Efecto del Número de canales.



Para finalizar la descripción de los efectos principales del análisis experimental, se presenta el efecto de la ubicación física de los canales en la probeta sobre el número de Nusselt promedio.

En la figura 18 se ilustra este efecto y es claro que, el número de Nusselt es mayor en el primer canal ubicado de derecha a izquierda (Canal 1) que en los subsiguientes (Canales 3 y 5).

Figura 18. Efecto de la ubicación física de los canales.



Como análisis de los resultados presentados anteriormente referentes a los efectos principales, es posible afirmar que para maximizar el número de Nusselt promedio en el dispositivo de enfriamiento por mini canales se deben correr ensayos con los factores principales en los siguientes niveles:

- Flujo Volumétrico 2.5 lt/min.
- Diámetro del mini canal 1.0 mm.
- Número de mini canales realizados 5.
- Ubicación física No 1 del mini canal.

Una vez realizado el análisis de los efectos principales del modelo, es necesario examinar cualquier interacción que sea significativa y más cuando de acuerdo con Montgomery [12], los efectos principales no tienen mucho significado cuando están presentes en interacciones significativas.

Ahora bien, de acuerdo con el análisis de varianza (tabla 5) existen cuatro interacciones de segundo orden significativas (AC, BC, BD y DD) de las cuales solo las tres primeras presentan una contribución significativa en la suma de cuadrados, por lo cual a continuación se examinarán gráficamente estas interacciones.

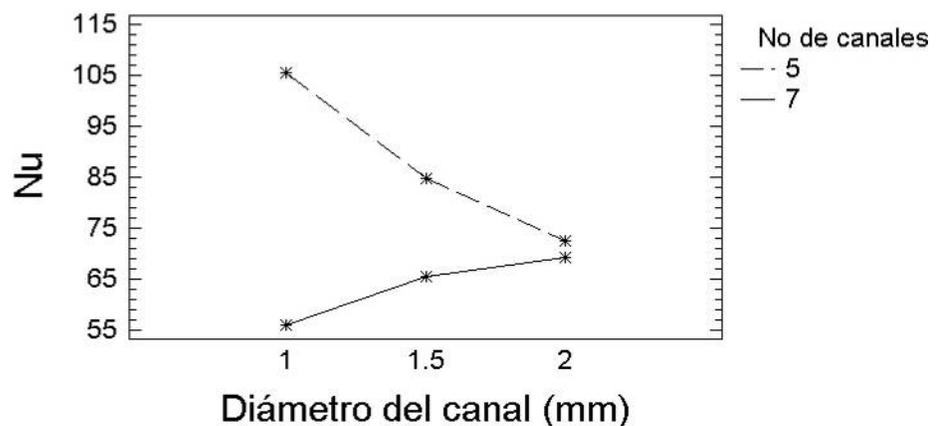
En la figura 19 se presenta gráficamente el efecto de la interacción entre el diámetro de los canales y el número de canales maquinados en la probeta de pruebas (AC).

Se observa claramente que debido a esta interacción, el efecto del diámetro de los canales es pequeño cuando el número de canales se encuentra en su nivel mas alto ($N=7$) y de mayor orden cuando el número de canales se encuentra en su nivel bajo. Por otro lado, es posible apreciar que, en las probetas con siete (7) canales el hecho de variar las dimensiones de los diámetros genera un incremento del número de Nusselt promedio; sin embargo, en las probetas con cinco (5) agujeros se presenta el fenómeno contrario; es decir, un decremento en Nu .

Además de lo anterior, resulta importante mencionar el gran efecto que presenta el número de canales al utilizar probetas con diámetros de 1mm y la forma como este efecto se diluye hasta verse reducido con las probetas con canales de 2mm de diámetro.

Finalmente, de acuerdo con este efecto de interacción, los mayores valores de Nu se obtienen con la probeta de 5 mini canales cada uno con diámetros de 1mm.

Figura 19. Efecto de la interacción AC.

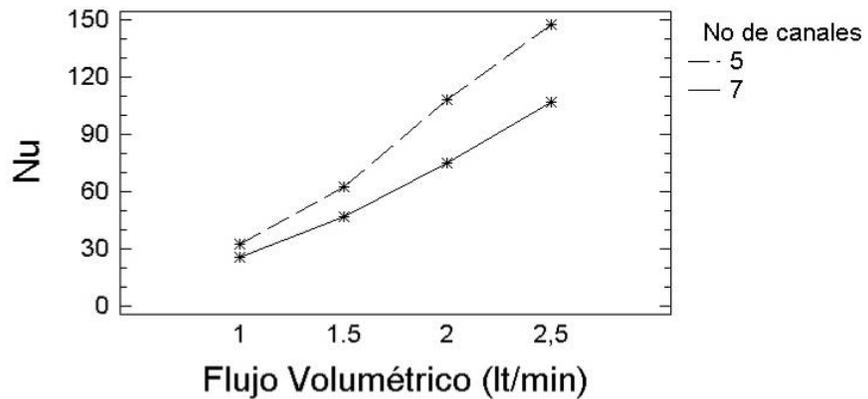


Continuando con la descripción de los efectos correspondientes a las interacciones de segundo orden, se presenta a continuación en la figura 20 la interacción entre el flujo volumétrico y el número de canales en la probeta.

Debido a la forma similar de las curvas se puede afirmar que esta interacción es pequeña, de otro lado, esta interacción indica que el número de canales tiene un efecto reducido con un flujo volumétrico bajo (1lt/min), incluso este mismo comportamiento es posible inferirlo para un flujo de 1.5 lt/min.

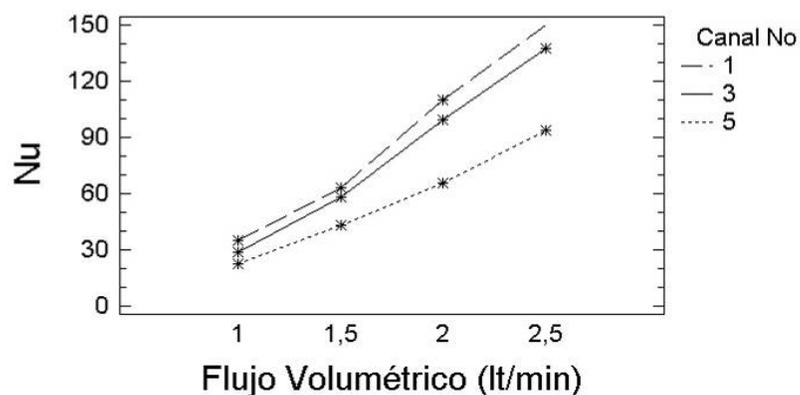
De la gráfica, también es posible establecer que, el efecto del flujo volumétrico es representativo y de orden creciente para ambos niveles del número de canales, sin embargo, los máximos valores para el número de Nusselt promedio se presentan en la probeta de cinco (5) mini canales.

Figura 20. Efecto de la interacción BC.



Para finalizar el análisis de los efectos de las interacciones de segundo orden que resultaron significativas en este estudio, se presenta la figura 21, donde se ilustra el efecto de la interacción BD.

Figura 21. Efecto de la interacción BD.

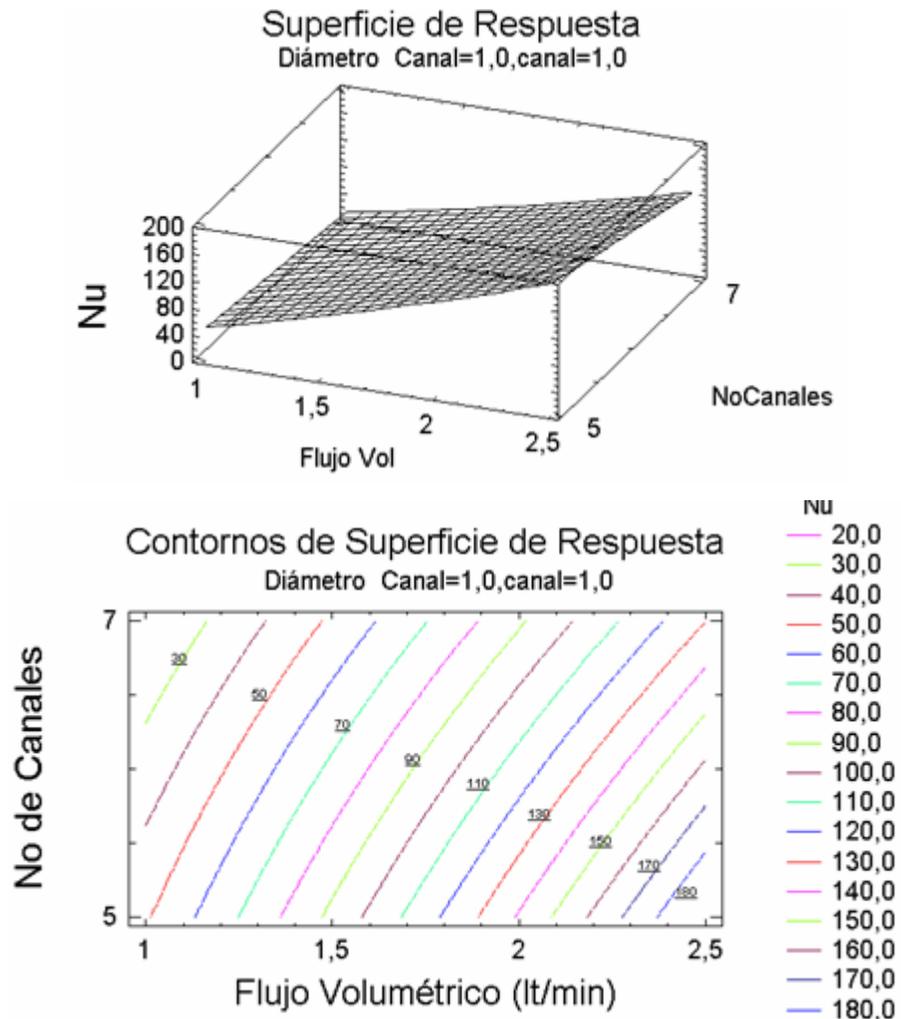


De la gráfica es posible apreciar en general que el efecto creciente del flujo volumétrico es grande para cualquier posición de los canales, sin embargo, en forma particular el canal No 1 presenta mejor comportamiento.

De otro lado, el efecto de la ubicación física de los canales en la probeta, especialmente los canales 1 y 3 no presenta ninguna diferencia significativa respecto a los niveles de flujo volumétrico, es decir, para cualquier valor de caudal empleado es igual el comportamiento en términos de Nu de los canales 1 y 3.

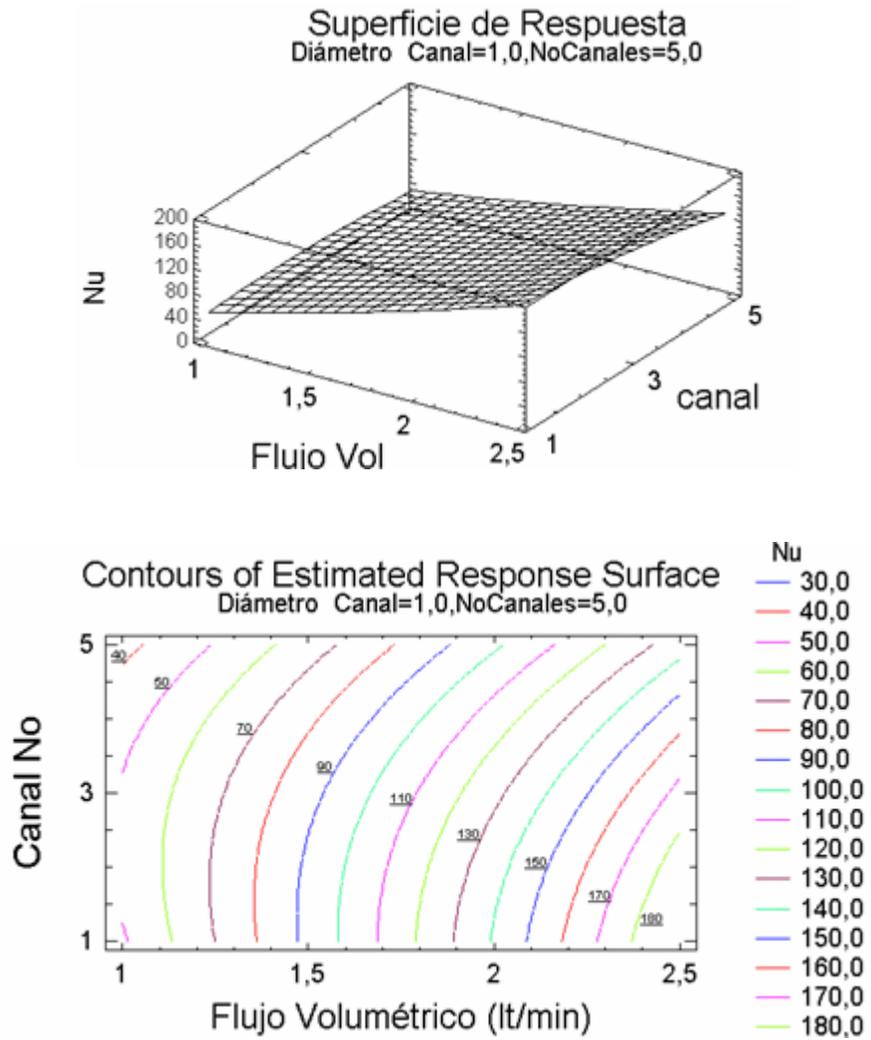
La figura 22 muestra la superficie de respuesta y la gráfica de contorno para el número de Nusselt promedio obtenida con el modelo de regresión para la interacción BC, tomando en sus niveles bajos al diámetro de los canales y la ubicación de los mismos. De la gráfica de contornos es posible observar una ligera curvatura en las líneas, debido a que la interacción entre estos dos factores resultó significativa. De otro lado y confirmando los resultados mencionados de la gráfica del efecto de dicha interacción, el máximo número de Nusselt promedio se presenta con la probeta que contiene cinco (5) mini canales al utilizar un flujo volumétrico de 2.5 lt/min.

Figura 22. Superficie de respuesta y Gráfica de contorno para interacción BC.



La figura 23 muestra la superficie de respuesta y la gráfica de contorno para el número de Nusselt promedio obtenida con el modelo de regresión para la interacción BD, tomando en sus niveles bajos al diámetro de los canales y el número de estos. De la gráfica de contornos se observa que las líneas presentan una curvatura mas pronunciada comparadas con el efecto anterior, lo que indica mayor significancia para esta interacción (BD). En general, para cualquiera de los canales analizados se obtienen valores máximos de Nu al utilizar el máximo flujo volumétrico, sin embargo, el canal No 1 presenta mejor comportamiento.

Figura 23. Superficie de respuesta y Gráfica de contorno para interacción BD.



6.3. INTERPRETACION ADIMENSIONAL DE LOS RESULTADOS.

Una vez realizada la interpretación estadística de los resultados arrojados por el experimento factorial, es conveniente realizar un análisis adimensional de las variables consideradas en este estudio con el fin de establecer comparaciones con las correlaciones clásicas de transferencia de calor por convección para flujo interno de agua en tuberías y de esta forma presentar los resultados de una manera estándar. En la tabla 8 se presentan las características geométricas de las probetas utilizadas en este estudio; en ésta, las probetas se identifican de acuerdo a su diámetro hidráulico y número de canales.

Tabla 10. Características Geométricas de las probetas utilizadas.

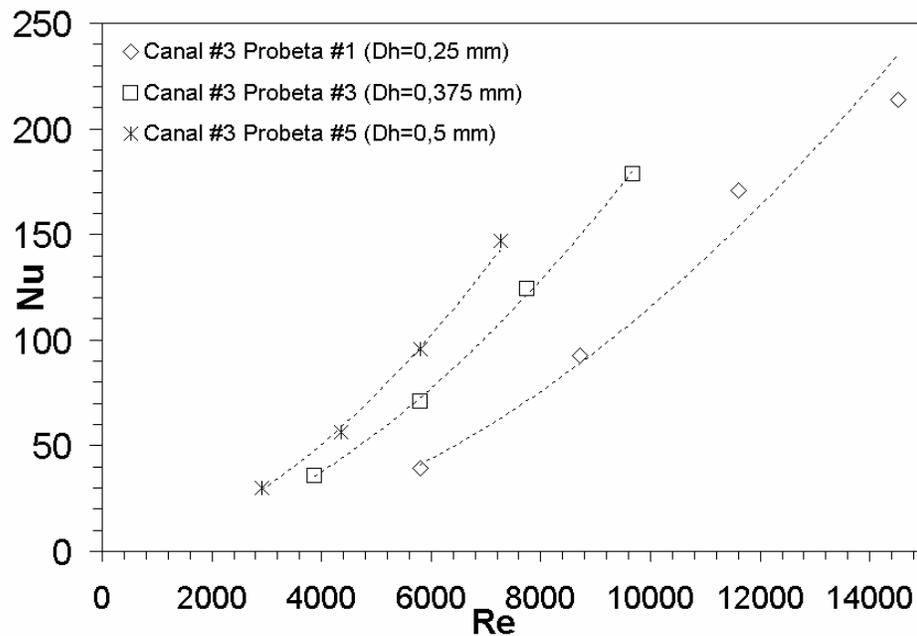
No de Probeta	D_h (mm)	N
1	0.25	5
2	0.25	7
3	0.375	5
4	0.375	7
5	0.5	5
6	0.5	7

A continuación se presentan los resultados del número del número de Nusselt promedio como función del número de Reynolds (Re) teniendo en cuenta el efecto de las características geométricas representadas en términos del diámetro hidráulico y del número de canales.

En la figura 24 se presentan los resultados de tres probetas de prueba con el mismo número de canales pero diferentes diámetros hidráulicos (Probetas No 1, 3 y 5). En ella se puede observar que a partir de valores de Re correspondientes a 5000, para un mismo valor del número de Reynolds la probeta de mayor diámetro hidráulico presenta mayores valores de Nu .

De otro lado resulta interesante observar el incremento de Nu con el aumento de Re. Finalmente la probeta con menor diámetro hidráulico presenta mayores valores de Nu promedio con el incremento de Re.

Figura 24. Variación de Nu como función de Re en canal No 1 de probeta de cinco canales.



Las figuras 25 y 26 presentan la variación de Nu como función de Re para las mismas probetas de la figura anterior, sin embargo, muestran el comportamiento para diferentes canales. De esta forma se pretende verificar el comportamiento descrito anteriormente en los canales restantes.

Se observa que la tendencia se mantiene, sin embargo, el orden de magnitud del número de Nusselt alcanzado en el canal No 5 de las probetas estudiadas es menor comparado con los canales 1 y 3.

Figura 25. Variación de Nu como función de Re en canal No 3 de probeta de cinco canales.

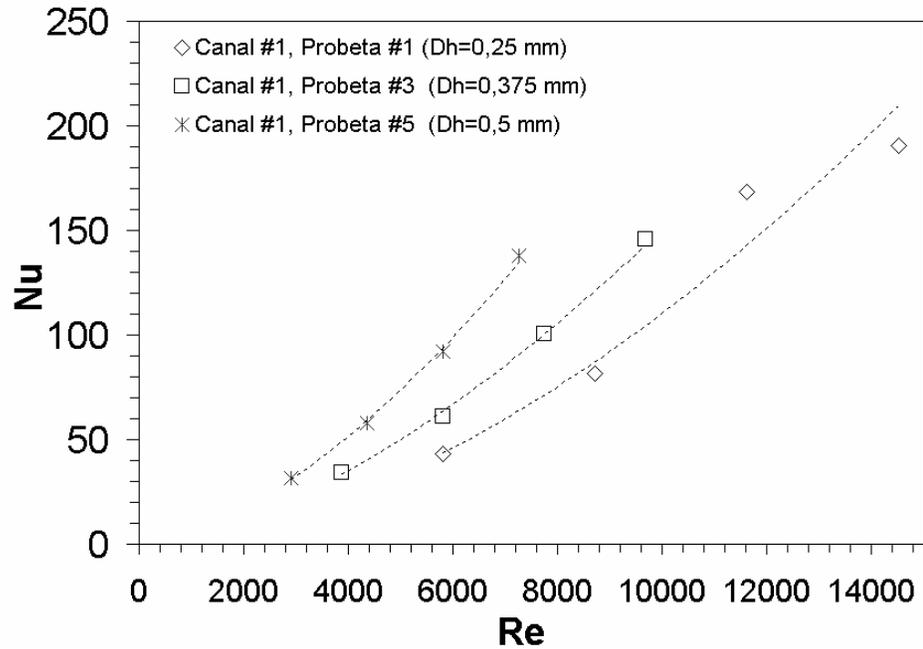
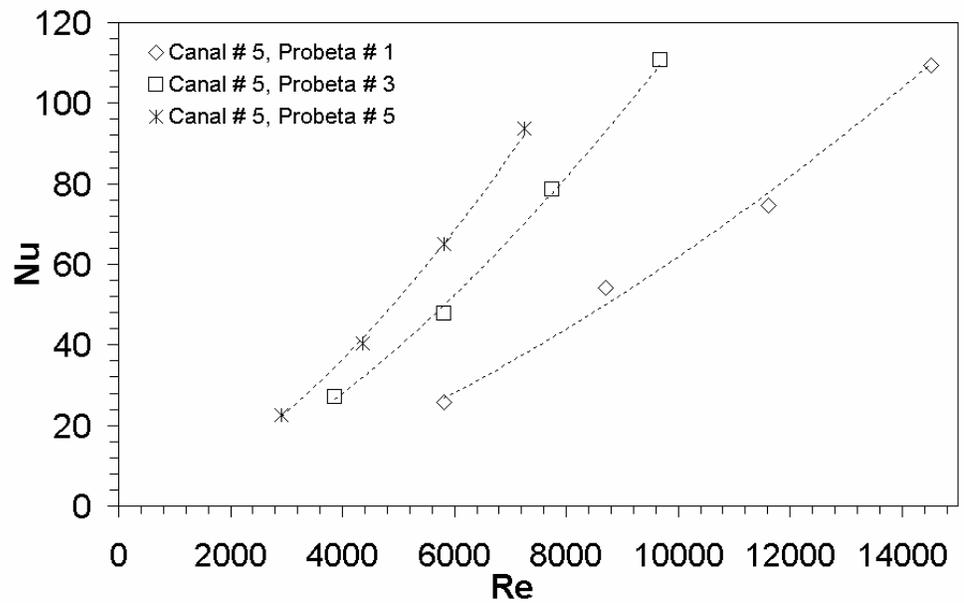


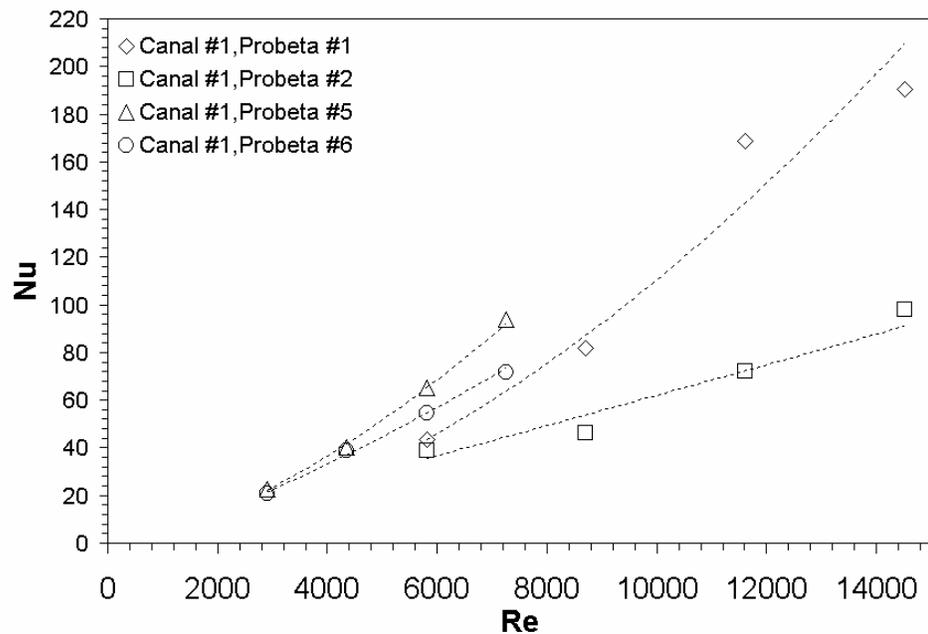
Figura 26. Variación de Nu como función de Re en canal No 5 de probeta de cinco canales.



Una vez realizado el análisis del efecto del diámetro hidráulico sobre el número de Nusselt promedio, se presenta a continuación la representación gráfica de las variaciones de Nu como función de Re para probetas con diámetros hidráulicos iguales pero diferente número de canales.

En la figura No 27 se muestra la gráfica de Nu contra Re para el canal No 1 de las probetas 1,2 y 5,6 de la tabla No 8.

Figura 27. Efecto del número de canales sobre Nu para el canal No1 y $D_h=0.25$ y 0.5mm .



En general, se observa un comportamiento incremental de Nu con el aumento de Re. De la misma forma, es evidente que, las probetas 1 y 2 presentan mayores valores de Nu que las probetas 5 y 6.

Para un mismo valor de Re, entre las probetas 1 y 2, se observa que la probeta No 1 presenta mayores valores de Nu. Esto quiere decir que para el canal No 1 de las probetas con igual diámetro hidráulico la probeta con menor número de canales ($N=5$) presenta valores de Nu mayores.

En las probetas 5 y 6 el análisis anterior cobra validez para $Re > 4000$, por debajo de este valor no existe diferencia significativa entre los valores de Nu .

Para el valor de $Re=6000$, es posible apreciar que, al comparar las cuatro probetas se obtiene el máximo valor de Nu con la probeta No 5 ($N=5$ y $D_h=0.5$).

En las figuras 28 y 29, se presentan los resultados análogos a la figura anterior para los canales 3 y 5.

En general la figura 27 presenta un patrón similar a la gráfica del canal No 1, sin embargo los valores de Nu obtenidos para las probetas 5 y 6 son mayores.

Figura 28. Efecto del número de canales sobre Nu para el canal No 3 y $D_h=0.25$ y 0.5mm .

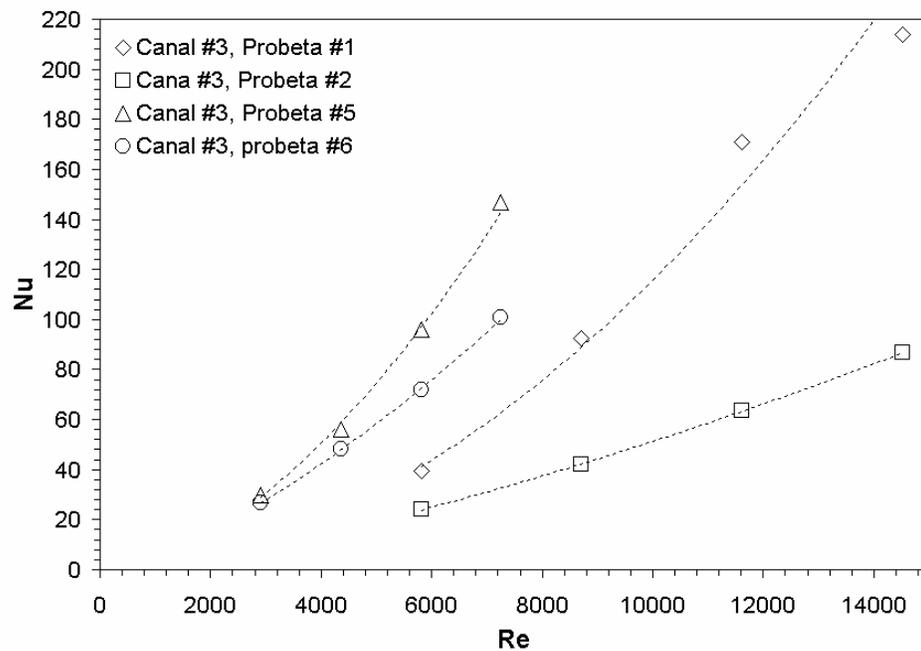
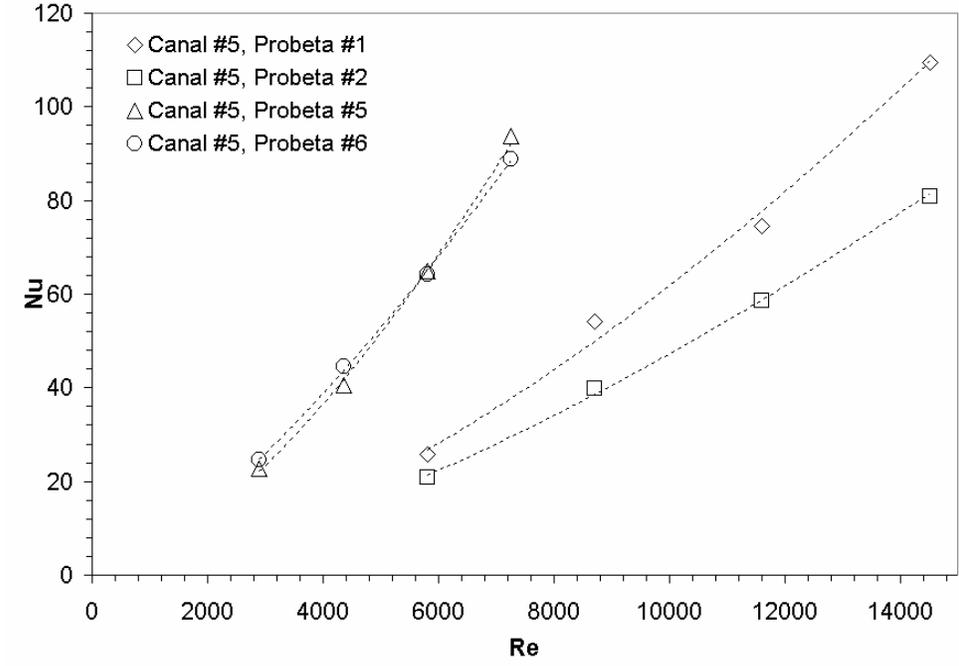


Figura 29. Efecto del número de canales sobre Nu para el canal No5 y $D_h=0.25$ y 0.5mm.



7. CONCLUSIONES

Tomando como punto de partida los resultados arrojados por el diseño experimental factorial se tiene que:

- Los factores principales contemplados en este estudio presentan un efecto significativo sobre la variabilidad del número de Nusselt promedio en la probeta de mini canales.

De esta forma es posible concluir que el flujo volumétrico es el factor con mayor efecto sobre Nu, con el 26% de contribución porcentual sobre la variabilidad de Nu. Cabe destacar que, este efecto es positivo, es decir, que con su incremento se obtienen aumentos del número de Nusselt.

De otro lado se tiene que el número de mini canales realizados en la probeta, así como, la ubicación física del canal presentan un efecto negativo sobre Nu con cerca del 9% de contribución porcentual sobre la variabilidad de este.

Finalmente y a pesar de los pronósticos iniciales se tiene que el diámetro de los canales presenta un efecto poco representativo al ser comparado con los tres factores mencionados anteriormente, pero estadísticamente significativo de acuerdo con el análisis de varianza, con el 1% de contribución porcentual sobre la variabilidad de Nu.

- Luego de analizar el impacto de los efectos principales sobre la variable de respuesta, no resulta extraño conocer que las interacciones de segundo orden conformadas por el flujo volumétrico, el número de canales y la ubicación física de los canales (BC y BD) presenten un efecto significativo sobre el número de Nu.

En general, resulta importante concluir que independiente del número de canales que posea la probeta se obtienen mayores números de Nusselt con el incremento del flujo volumétrico; sin embargo, las probetas con 5 agujeros presentan mejor comportamiento que las de 7 agujeros.

De la misma forma para la interacción BD se tiene que, en general independiente de la ubicación física del canal se obtienen mayores números de Nusselt con el incremento del flujo volumétrico, presentando el canal No1 una sutil diferencia a favor en términos del número de Nusselt.

Aunque el factor A (Diámetro de los canales) no es representativo comparado con los tres efectos principales restantes, cobra mucha importancia en la interacción AC, dado que presenta el 4% de contribución porcentual sobre la variabilidad de Nu.

Además, se concluye que, existe un comportamiento contrario para el número de Nusselt entre las probetas con 5 y 7 mini canales cuando el diámetro de los canales se incrementa. Esto es, para la probeta de cinco canales Nu decrece con el aumento del diámetro del canal, mientras que, para la probeta con siete canales Nu incrementa el incremento del diámetro del canal.

Finalmente, con relación al diseño experimental factorial se maximizan los valores del número de Nusselt en el mini canal No1, utilizando un flujo volumétrico de 2.5 lt/min, la probeta con cinco mini canales cada uno con un diámetro de 1mm.

Referente al análisis adimensional de los resultados, se concluye a partir del efecto que generan sobre Nu los parámetros geométricos de las probetas.

- Al ensayar probetas con igual cantidad de canales pero con diferentes diámetros hidráulicos, se concluye que, para los canales 1 y 3 la probeta con menor diámetro presenta los mayores valores de Nu.

Para el canal número cinco, se obtienen valores similares.

- Del mismo análisis, es posible afirmar que, manteniendo el mismo valor de Re, la probeta de mayor diámetro presenta el valor máximo de Nu.

- De otro lado, Al ensayar probetas con igual diámetro hidráulico pero con diferentes números de canales, se concluye que, en general los canales 1 y 3 de las probetas de menor diámetro presentan mayores valores de Nu.

De la misma forma es posible concluir que para el mismo valor de Re la probeta con cinco canales y mayor diámetro hidráulico presenta los máximos valores de Nu.

El comportamiento descrito anteriormente para el canal No1 es posible extenderlo para los canales 3 y 5.

BIBLIOGRAFÍA

[1]

Tuckerman D.B, Pease R.F. “High performance heat sinking for VLSI”, IEEE Electronic Device Letter EDL- 2 (1981) 126-129.

[2]

Wu P, Little W.A. “Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule–Thompson refrigerators”, Cryogenics 23 (1983) 273–277.

[3]

Peng F, Wang B.X., Peterson G.P, Ma H.B. “Experimental investigation of heat transfer in plates with rectangular microchannels”, Int. J. Heat Mass Transfer 38 (1) (1994) 127–137.

[4]

Peng X.F, Peterson G.P. “Convective heat transfer and flow friction for water flow in microchannel structures”, Internat. J. Heat Mass Transfer 39 (1996) 2599–2608.

[5]

Ortega, A., 2003, “Air cooling of electronic components: review of research developments in the period 1981-2001 and their impact on our understanding of cooling limits”, 2003 ASME IMECE, Washington D.C. Nov. 2003, paper # IMECE 2003-42412.

[6]

Morini, G L. “Single-phase convective heat transfer in micro channels a review of experimental results” International Journal of Thermal Sciences 43 (2004) 631-651.

[7]

Pfalher J, Harley J, Bau H.H, Zemel J.N. “Liquid and gas transport in small channels”, Proceedings of ASME DCS, vol. 31, 1990, pp. 149-157.

[8]

S.B. Choi, R.F. Barron, R.O. Warrington, Fluid flow and heat transfer in microtubes, in: Micromechanical Sensors, actuators and Systems, ASME DSC, vol. 32, Atlanta, GA, 1991, pp 123-134.

[9]

Mala G.M, Li D. “Flow characteristics of water in microtubes”, International. Journal. Heat Fluid Flow 20 (1999) 142–148.

[10]

Rahman M.M, “Measurements of heat transfer in microchannel heat sinks”, Int. Commun. Heat Mass Transfer 27 (4) (2000) 495–506.

[11]

Jiang P.X, Fan M.H, Si G.S, Ren Z.P. “Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous-media heat exchangers”, International Journal of Heat Mass Transfer 44 (2001) 1039–1051.

[12]

Montgomery, D.C. DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons; 2002.

[13]

Gutiérrez H, De la Vara R. ANALISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS. 2^{da} Edición. México: Mc Graw Hill; 2004.

[14]

Lok C. “Cooling off Computers” Technology Review, Feb 2004; 107, 1; ProQuest Science Journals pg. 77

[15]

Ramos A, Bula A, Cely M. 2005, “Experimental study of single-phase heat transfer in circular Milli-Channels for Cooling of Micro components”, 2005 ASME IMECE, Orlando FL. Nov. 2005, paper # IMECE 2005-82438.

[16]

Kays,W.M.; Crawford, M.E. “CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER”. 3rd Edition. New York: Mc Graw Hill; 1993.

ANEXO No 2.

PUR (Casting Resin, Unsaturated)

Designation

Polyurethane (Casting Resin, Unsaturated)

Tradenames

Celstran, Tecoflex, Tecothane

Density	1.04	-	1.06	Mg/m ³
Energy Content	* 120	-	135	MJ/kg
Recycle Fraction	* 0.045	-	0.055	
Water Absorption	0.1	-	0.2	%

Composition

Composition (Summary)

(-R'm-O-CO-NH-R-NH-CO-O)n R=isocyanate R'=polyol segment

% filler	0			%
Filler Type	Unfilled			

Mechanical

Bulk Modulus	* 5.829	-	6.121	GPa
Compressive Modulus	* 4.09	-	4.3	GPa
Compressive Strength	* 66.24	-	72.77	MPa
Elongation	3	-	6	%
Elastic Limit	* 55.2	-	60.64	MPa
Fracture Toughness	* 1.379	-	1.654	MPa.m ^{1/2}
Hardness - Vickers	* 16.6	-	18.2	HV
Modulus of Rupture	125	-	138	MPa
Poisson's Ratio	* 0.3754	-	0.3906	
Shape Factor	6.6			
Tensile Strength	69	-	75.8	MPa
Young's Modulus	* 4.09	-	4.3	GPa

Thermal

Maximum Service Temperature	* 362	-	377	K
Minimum Service Temperature	* 230	-	280	K
Specific Heat	* 1685	-	1752	J/kg.K
Thermal Conductivity	* 0.3038	-	0.316	W/m.K
Thermal Expansion	* 90.17	-	91.97	µstrain/K

Electrical

Dielectric Constant	* 6.54	-	7.194	
Dissipation Factor	* 0.06259	-	0.07511	
Resistivity	* 3.3e+018	-	3e+019	µohm.cm

Environmental Resistance

Fresh Water	Very Good
Organic Solvents	Poor
Oxidation at 500C	Very Poor
Sea Water	Very Good
Strong Acid	Poor
Strong Alkalis	Average
Weak Acid	Good
Weak Alkalis	Good

Typical Uses

Cushioning; packaging; insulation; foam-in-place buoyancy; shoe soles; car bumpers; tyres; wheels; gears; fuel hose; housings; panels; bearings; gears.

ANEXO No 3.

Composición Química del Incoloy

C	0.1 máx.
Cr	19-23
Ni	30-35
Ti	0.15-0.8
Al	0.15-0.8
Fe	39.5mín
Al+Ti	0.3-1.2

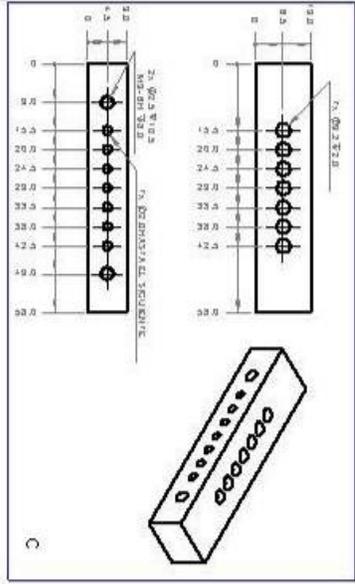
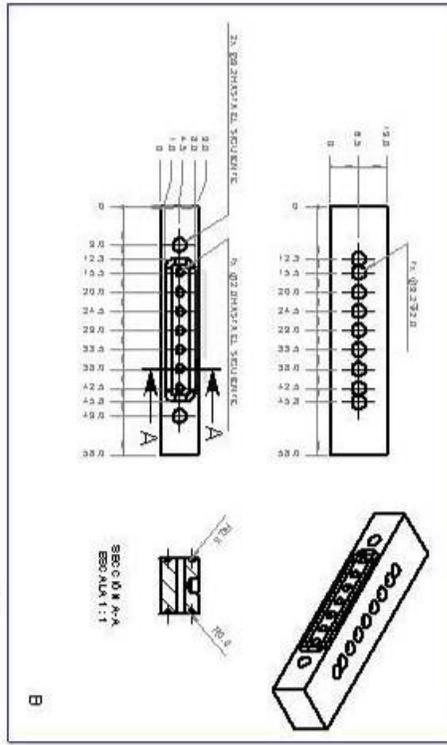
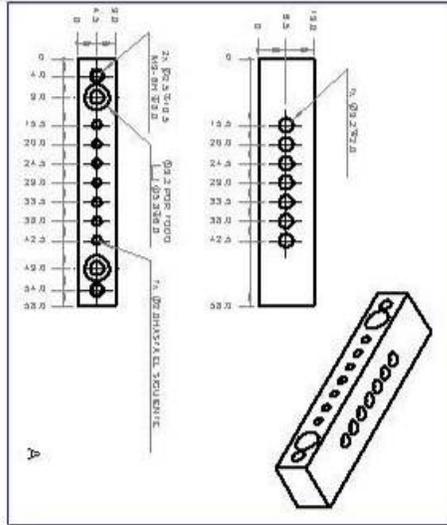
ANEXO No 4.

Wrought aluminium alloy, 6061, T4			
Designation			
Al alloy: 6061-T4 (wrought)			
Density	2.699	- 2.726	Mg/m ³
Energy Content	235	- 335	MJ/kg
Price	192.6	- 313.3	ESP/kg
Recycle Fraction	* 0.8	- 0.9	
Composition			
Base	Al (Aluminium)		
Al (Aluminium)	97	- 99	%
Cr (Chromium)	0	- 0.6	%
Cu (Copper)	0	- 0.6	%
Mg (Magnesium)	1		%
Si (Silicon)	0	- 0.6	%
Mechanical			
Bulk Modulus	66.9	- 70.33	GPa
Compressive Strength	97	- 172	MPa
Elongation	14	- 16.27	%
Elastic Limit	103	- 124	MPa
Endurance Limit	* 62	- 65.2	MPa
Fracture Toughness	* 34	- 35	MPa.m ^{1/2}
Hardness - Vickers	66.5	- 73.5	HV
Loss Coefficient	* 1e-004	- 2e-003	
Modulus of Rupture	103	- 124	MPa
Poisson's Ratio	0.33	- 0.3435	
Shape Factor	39		
Shear Modulus	26	- 27.33	GPa
Tensile Strength	172	- 241	MPa
Young's Modulus	68	- 71.49	GPa
Thermal			
Maximum Service Temperature	350	- 450	K
Melting Point	853	- 923	K
Minimum Service Temperature	0		K
Specific Heat	934	- 972.1	J/kg.K
Thermal Conductivity	161	- 174.4	W/m.K
Thermal Expansion	23.4	- 24.6	µstrain/K
Electrical			
Resistivity	4.2	- 4.4	µhm.cm
Environmental Resistance			
Flammability	Good		
Fresh Water	Very Good		
Organic Solvents	Very Good		
Oxidation at 500C	Very Poor		
Sea Water	Good		
Strong Acid	Very Good		
Strong Alkalis	Poor		
UV	Very Good		
Wear	Average		
Weak Acid	Very Good		
Weak Alkalis	Good		
Typical Uses			
Trucks, towers, canoes, railroads cars, furniture, pipelines, and other structural applications where strength, weldability, and corrosion resistance are needed			

ANEXO No 6.

Bakelite			
Designation			
Phenol formaldehyde (Cellulose Filled, Impact Modified, Molding)			
Density	1.38	- 1.42	Mg/m ³
Recycle Fraction	* 0.018	- 0.022	
Composition (Summary)			
PF + cellulose filler			
Base	Polymer		
Polymer	-1		%
Woodflour / Cellulose	-1		%
Mechanical			
Bulk Modulus	* 7.806	- 8.196	GPa
Compressive Strength	152	- 214	MPa
Elongation	1	- 2	%
Elastic Limit	35	- 40	MPa
Endurance Limit	* 9.64	- 17.92	MPa
Fracture Toughness	* 1.241	- 2.619	MPa.m ^{1/2}
Hardness - Vickers	* 10.5	- 12	HV
Modulus of Rupture	37.9	- 75.8	MPa
Poisson's Ratio	0.33	- 0.36	
Shape Factor	13		
Shear Modulus	* 2.301	- 3.323	GPa
Tensile Strength	24.1	- 44.8	MPa
Young's Modulus	* 6.19	- 8.94	GPa
Thermal			
Maximum Service Temperature	415	- 431	K
Minimum Service Temperature	* 230	- 280	K
Specific Heat	* 1378	- 1433	J/kg.K
Thermal Conductivity	0.251	- 0.377	W/m.K
Thermal Expansion	36	- 61.2	µstrain/K
Electrical			
Breakdown Potential	11.8	- 15	MV/m
Dielectric Constant	7.7	- 8.3	
Resistivity	3.3e+015	- 3e+016	µohm.cm
Power Factor	* 0.076	- 0.084	
Environmental Resistance			
Flammability	Good		
Fresh Water	Very Good		
Organic Solvents	Very Good		
Oxidation at 500C	Very Poor		
Sea Water	Very Good		
Strong Acid	Poor		
Strong Alkalis	Average		
Wear	Average		
Weak Acid	Good		
Typical Uses			
Electrical parts - sockets, switches, connectors, general industrial, water-lubricated bearings, relays, pump impellers, microwave cookware, handles, bottles tops, coatings, adhesives, bearings, foams and sandwich structures.			
Warning			
Attacked by alkalis			

ANEXO No 8.



Material: Aleación de Aluminio 6061-T4

CONSEJERÍA DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

UNIVERSIDAD DEL NORTE		INSTITUTO DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE FABRICACIÓN DE CALOR EN MINICANALES	
UNIVERSIDAD DEL NORTE	INSTITUTO DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE FABRICACIÓN DE CALOR EN MINICANALES	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD DEL NORTE	INSTITUTO DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE FABRICACIÓN DE CALOR EN MINICANALES	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD DEL NORTE	INSTITUTO DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE FABRICACIÓN DE CALOR EN MINICANALES	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD DEL NORTE	INSTITUTO DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES DE FABRICACIÓN DE CALOR EN MINICANALES	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	LABORATORIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

